



NRR'03

Quatrièmes Journées
Nationales de Recherche en Robotique

Village de Murol les 8 et 9 octobre 2003
IFMA, Clermont-Ferrand le 10 octobre 2003



Coordonnées par :
-Philippe Bidaud LRP (FRE 2507)
-Philippe Martinet LASMEA (UMR 6602)



Comité scientifique

R. Alami	LAAS, Toulouse
M.J. Aldon	LIRMM, Montpellier
B. Arnaldi	IRISA, Rennes
P. Bidaud	LRP, PARIS 6
J.P. Briot	LIP6, PARIS 6
R. Cammoun	CEA, Fontenay aux Roses
R. Chatila	LAAS, Toulouse
N. Chaillet	LAB, Besançon
F. Chaumette	IRISA, Rennes
E. Colle	CEMIF, Evry
A. Crosnier	LIRMM, Montpellier
M. De Mathelin	ENSPS, Strasbourg
E. Dombre	LIRMM, Montpellier
D. Duhaut	UBS, Lorient
B. Espiau	INRIA Rhône-Alpes, Grenoble
G. Gogu	LaRAMA, Clermont Ferrand
W. Khalil	IRCCyN, Nantes
J.P. Lallemand	LMS, Poitiers
C. Laugier	INRIA Rhône-Alpes, Grenoble
C. Laugeau	ENSMP/CAOR Paris
P. Martinet	LASMEA, Clermont-Ferrand
D. Meizel	Heudiasyc, Compiègne
J.P. Merlet	INRIA, Sophia Antipolis
A. Micaelli	CEA, Fontenay aux Roses
M. Milgram	LISIF, Paris 6
M. Mouaddib	CREA, Amiens
N. M'Sirdi	LRV, Vélizy
F. Peyret	LCPC, Nantes
P. Ray	IFMA, Clermont-Ferrand
M. Richetin	LASMEA, Clermont-Ferrand
V. Rigaud	IFREMER, Toulon
P. Rives	INRIA, Sophia Antipolis
J. Troccaz	TIMC, Grenoble

Comité d'organisation

Nicolas Andreff	IFMA, LaRAMA, Clermont-Ferrand
Michel Berducat	Cemagref, Clermont-Ferrand
Philippe Bidaud	Université Pierre et Marie Curie, LRP, Paris
Chedli Bouzgarrou	IFMA, LaRAMA, Clermont-Ferrand
Roland Chapuis	CUST, LASMEA, Clermont-Ferrand
François Collange	IUT, LASMEA, Clermont-Ferrand
Jean-Pierre Derutin	CUST, LASMEA, Clermont-Ferrand
Jean-Christophe Fauroux	IFMA, LASMEA, Clermont-Ferrand
Grigore Gogu	IFMA, LaRAMA, Clermont-Ferrand
François Marmoiton	LASMEA-CNRS, Clermont-Ferrand
Philippe Martinet	IFMA, LASMEA, Clermont-Ferrand
Youcef Mezouar	IUP-GSI, LASMEA, Clermont-Ferrand
Viviane Pasqui-Boutard	Université Pierre et Marie Curie, LRP, Paris
Pascal Ray	IFMA, LaRAMA, Clermont-Ferrand
Guillaume Morel	Université Pierre et Marie Curie, LRP, Paris
Marc Richetin	Université Blaise Pascal, LASMEA, Clermont-Ferrand
Benoît Thuilot	IUP-GSI, LASMEA, Clermont-Ferrand

Avant-propos

La robotique constitue un domaine scientifique d'importance majeure en France. Elle intéresse aujourd'hui une large communauté d'un excellent niveau international. Cette communauté, qui s'est structurée au début des années 80 sous l'impulsion du programme ARA (Automatisation et Robotique Avancée) du CNRS n'a cessé de s'enrichir et d'étendre son domaine d'influence.

Les champs scientifiques couverts par la robotique s'insèrent dans plusieurs disciplines parmi lesquelles la mécanique, l'informatique, l'automatique, l'électronique et la physique. Mais la robotique tire une part essentielle de sa richesse dans le caractère pluridisciplinaire des travaux qu'elle engendre. Les projets de recherche développés actuellement dans le cadre du programme interdisciplinaire de recherche ROBEA du CNRS en fournissent les illustrations les plus diverses.

Même s'il ne lui correspond pas de cursus scientifique unique, que sa reconnaissance et son identité dans le monde universitaire sont délicates, la robotique a besoin pour son développement d'autonomie. Cette autonomie doit servir sa vivacité sans ignorer la nécessité d'un enracinement dans les domaines scientifiques qui constituent ses fondements. Comme toutes les recherches situées aux frontières des domaines, elle joue un rôle primordial d'enrichissement des méthodes et des approches.

La communauté robotique dispose de congrès scientifiques internationaux de très haut niveau qui l'identifie clairement. Dans ce contexte, les Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR) se veulent être un lieu privilégié pour réaliser à l'échelle nationale un point sur les orientations des recherches les plus actuelles, susciter et encourager de nouvelles directions de recherche.

Dans cette optique, les JNRR 2003 proposent, par des exposés de synthèse, analyses et réflexions sur un certain nombre de domaines particuliers.

- Les Systèmes Robotiques Avancés où, au-delà des problèmes de modélisation et des méthodes pour la conception des systèmes complexes, nous discuterons de nouvelles architectures mécaniques pour les systèmes de manipulation et de locomotion. Nous introduirons également certains principes biologiques et physiologiques comme base d'inspiration de systèmes robotiques. Enfin, à travers la micro-robotique, nous mettrons en évidence des techniques adaptées à l'échelle sub-millimétrique.
- Les Architectures Matérielles et Logicielles pour la commande des systèmes seront abordées sous deux angles particuliers : celui des architectures distribuées multi-niveaux et les outils de programmation synchrone associés ; et celui des environnements logiciels pour la fusion de données dans les commandes référencées multi-capteurs.
- Les relations entre la perception et le mouvement qui sont au cœur d'un très grand nombre de problèmes de robotique, qu'il s'agisse de reconstruction de l'environnement et/ou des mouvements à partir d'informations capteur, de localisation et de planification simultanée ou encore de suivi de cible par asservissement visuel.

- La Réalité Virtuelle et les interfaces immersives. Nous introduirons des environnements logiciels dédiés au développement d'application de Réalité Virtuelle ainsi que certaines techniques permettant l'intégration d'effets physiques complexes. Nous discuterons du problème de la restitution haptique et de la continuité temporelle entre perception et action simulée.
- Les techniques d'apprentissage où nous nous intéressons plus particulièrement à l'association des domaines de la génétique et des neuro-sciences cognitives pour l'élaboration d'outils plus pertinents d'aide à la décision et à l'action.

En robotique, la technologie joue un rôle très important. Les recherches présentent une composante expérimentale forte. Elle est également la base de l'évaluation de résultats théoriques. Les JNRR 2003 ont souhaité donner une place importante aux développements expérimentaux réalisés dans nos laboratoires, pas seulement pour les besoins de leur valorisation mais aussi pour reconnaître à sa juste valeur l'importance de la recherche expérimentale.

L'Association des Jeunes Chercheurs en Robotique participe également à cette manifestation en organisant une session poster.

L'organisation locale de cette édition JNRR 2003 repose sur un potentiel de recherche en robotique présent à Clermont-Ferrand au sein du LASMEA, UMR CNRS/Université Blaise Pascal (UBP), du LaRAMA, Equipe d'Accueil UBP/IFMA, et du Cemagref Clermont-Ferrand. Par ailleurs, ces JNRR 2003 sont patronnées localement par le grand projet TIMS "Technologies de l'Information pour la Mobilité et la Sécurité" de l'actuel Contrat de Plan 2000-2006 Etat/Région d'Auvergne, au sein duquel des actions de recherche en Robotique sont menées depuis plusieurs années.

En complément de la **forte participation du programme ROBEA**, de nombreux partenaires soutiennent financièrement cette manifestation :

- **Soutien académique** : Université Blaise Pascal, LASMEA, LRP, CUST, CUST-GE et Ecole doctorale SPI de Clermont-Fd
- **Soutien des collectivités territoriales** : Région d'Auvergne, Conseil Général, Communauté de Communes, CCI Clermont-Issoire et Ville de Clermont-Fd.
- **Soutien d'autres établissements publics** : DGA
- **Soutien du secteur privé** : Crédit Mutuel Enseignant, CRIIF, ECA, EDF/Novelect, Robosoft SA et Wany SA.

Nous remercions chaudement l'ensemble de ces partenaires. Nous remercions également l'IFMA pour accueillir la manifestation et mettre à disposition ses moyens logistiques.

Les coordonnateurs

Philippe Bidaud
LRP – FRE 2507 du CNRS
Université Pierre et Marie Curie

Philippe Martinet
LASMEA – UMR 6602 du CNRS
Université Blaise Pascal

Sommaire

Session 1 : Architectures matérielle et logicielle des systèmes robotiques

- RT MAPS, un atelier logiciel pour l'acquisition de données, le rejeu et le prototypage de systèmes robotiques mobiles complexes
B. Steux (Centre de Robotique - Ecole des Mines, Paris) p.15
- SynDEX : un logiciel de CAO niveau système pour l'aide à l'implantation de systèmes distribués temps réel embarqués
Y. Sorel (INRIA, Rocquencourt) p.19
- Architectures Logicielles pour la Robotique Autonome
F. Ingrand (LAAS, Toulouse)

Session 2 : Réalité Virtuelle et Interfaces

- Dynamic simulation and 3D interaction
C.Mendoza, C. Laugier, O.Galizzi et F.Faure (INRIA GRAVIR, Grenoble) p.27
- Effets de la latence en Réalité Virtuelle et téléopération
J.L. Vercher (UMR 6152 Université de la Méditerranée, Marseille) p.35
- Interfaces haptiques et pseudo-haptiques
A. Lecuyer, C. Andriot, A. Crosnier (INRIA/IRISA, Rennes, CEA, LIRMM, Montpellier) p.43
- Environnement logiciel et applications en réalité virtuelle
B. Arnaldi (INRIA/IRISA, Rennes) p.49

Session 3 : Systèmes Robotiques Avancés

- *Architectures mécaniques complexes pour la manipulation et la locomotion*
 - La conception d'un robot parallèle à trois degrés de liberté l'orthoglide
D. Chablat (IRCCyN, Nantes) p.57
 - Optimisation et contrôle de la configuration d'un rover articulé
F. Ben Amar (LRP Université Pierre et Marie Curie CNRS, Paris) p.63
- *Biomécanique du mouvement*
 - Biologistes et Roboticiens sur une même route. Jusqu'où s'étend l'intérêt de ce mutualisme?
J.P. Gasc (Muséum d'Histoire Naturelle, Paris)
 - Afférences sensori-motrices et stabilité posturale
P. Thoumié (Service de Rééducation Neuro-Orthopédique de l'Hopital Rothschild, Paris) p.69

- Applications des outils de l'automatique au problème de la restauration du mouvement de membres paralysés sous stimulation électrique fonctionnelle
D.Guiraud, H.El Makssoud, P.Poignet, P.Fraisse, E.Dombre (INRIA, Sophia Antipolis ;LIRMM/CNRS, Montpellier) p.75
- **Micro-robotique et micromanipulation**
 - Microsystèmes pour la robotique et micromanipulation
L.Buchaillet, S.Regnier (IEMN/CNRS ,Lille ; LRP/CNRS, Paris) p.81
 - Micro et nano précision
J.David, S.Leleu (L2MA/ENSAM, Lille)
S.Duhem, L.Lahousse, G.P.Vailleau (BMN/LNE, Paris) p.89

Session 4 : Perception et Mouvement

- Analyse-synthèse du mouvement humain
F.Multon, A.Crétual (Laboratoire de Physiologie et Biomécanique de l'Exercice Musculaire, Université de Haute Bretagne, IRISA, Rennes) p.97
- Modélisation et localisation simultanée en robotique mobile
(R. Chatila - LAAS)
- Avancées récentes en asservissement visuel
F.Chaumette (IRISA, Rennes) p.103
- Restitution et modélisation des paysages pour la production cartographique à partir d'imagerie aéroportée
H.Le Men, M.Pierrot Deseilligny (IGN) p.109

Session 5 : Apprentissage

- Quelques jalons historiques et quelques réflexions sur l'apprentissage
M.Milgram (LISIF/CNRS, Paris VI) p.117
- L'approche animat et la robotique évolutionniste
S.Doncieux, J.A.Meyer (LIP6, Paris VI) p.121
- Apprentissage artificiel, une introduction
(A. Cornejuols - IIE-LRI/Paris XI et L. Miclet - ENSSAT-IRISA)
- Comportement et cognition : ce que nous apprend un mini-cerveau
(M. Giurfa - Centre de recherche sur la Cognition Animale - CNRS-Université Paul Sabatier Toulouse III) p.127

Session Posters :

- Etude et mise en convoi d'un véhicule urbain avec accrochage immatériel
Jonathan Bom (LASMEA/CNRS, Clermont Ferrand) p.137
- Capteur de vision rapide `a partir d'un imageur CMOS
Pierre Chalimbaud, François Berry (LASMEA/CNRS, Clermont Ferrand) p.139

- Planification de mouvements
N. Jouandeau (Laboratoire d'Intelligence Artificielle, Paris 8) p.141
- Contrôle des mouvements d'un robot à l'aide d'une mémoire visuelle
Anthony Remazeilles, François Chaumette, Patrick Gros (IRISA, Rennes) p.143
- Développement d'une interface haptique portable utilisant des couples gyroscopique
M.E.Brau, M. F.Gosselin (CEA/LIST/DTSI/SRSI/LPR Fontenay aux roses)
M. J.P. Lallemand (Laboratoire de Mécanique des Solides, Poitiers) p.145
- Modélisation de la répétabilité des robots manipulateurs industriels par des ellipsoïdes stochastiques
Jean-François Brethé ,(GREAH, Le Havre) p.147
- Système de gestion de flotte pour le transport CTS
Anjali Awasthi, Samra Benabid, Angel Talamona, Michel Parent (IMARA , INRIA Rocquencourt) p.149
- R.O.S. : Un système d'exploitation robuste pour robot mobile
Nicolas Neveu (Equipe I.A.R.M., Paris 8, St Denis) p.151
- Localisation en environnement dynamique
E. Seignez, (IEF/CNRS, Université Paris XI, Orsay) p.153
- Forceps Intelligent et Sécurisé
Ruimark Silveira (Laboratoire d'Automatique Industrielle INSA, Lyon) p.155
- Premiers résultats expérimentaux suite à la conception d'un prototype de tête de coloscope
Guillaume Thomann (Laboratoire d'Automatique Industrielle INSA, Lyon) p.157
- Navigation d'un robot mobile d'intérieur par vision artificielle
G. Blanc, Y. Mezouar, T. Château, P. Martinet , (LASMEA/CNRS, Clermont) p.159

Session Démonstrations :

- Microrobotique collective pour le transport d'objets
Lounis Adouane, Nadine Lefort (LAB/CNRS, Besançon) p.163
- Microrobot à pattes réalisé par microfabrication
Agnès Bonvilain, Nicolas Chaillet (LAB/CNRS, Besançon) p.165
- MOC : Microrobot On Chip
Cédric Clevy, Joël Agnus, Nicolas Chaillet (LAB/CNRS, Besançon) p.167
- Table de micropositionnement actionnée par des fils en alliage à mémoire de forme (AMF)
Yassine Haddab, Joël Abadie (LAB/CNRS, Besançon) p.169
- Développement et contrôle d'un micromanipulateur magnétique de cellules (WIMS)
Michaël Gauthier, Emmanuel Piat (LAB/CNRS, Besançon) p.171
- Plate-forme robotisée du Centre Technique d'Arcueil
André Dalgalarondo, Delphine Dufourd, David Filliat (DGA, CTA, Arcueil) p.173
- Récupération et positionnement automatique d'un instrument chirurgical en laparoscopie
Alexandre Krupa, Michel de Mathelin, Christophe Doignon, Jacques Gangloff (EAVR-LSIIT, Illkirch)
Guillaume Morel (LRP/CNRS, Paris) p.175
- Dermarob : robot de prélèvement cutané
G. Duchemin, É. Dombre, F. Pierrot et P. Poignet (LIRM/CNRS, Montpellier) p.177

- TAIPAN : un véhicule sous-marin autonome (AUV)
Bruno Jouvencel, (LIRM/CNRS, Montpellier) p.179
- Commande de la posture du robot Hylos
Christophe Grand, Faïz BenAmar, Frédéric Plumet et Philippe Bidaud (LRP/CNRS, Paris) p.181
- Suivi automatisé de véhicules
Joël G. Morillon, Laurent Vasseur, François Useo, Vincent Marion, Jérôme Dento et Nourrdine Cherfaoui (Thales Systèmes Aéroportés, EM/ROB – CN300, 2, Avenue Gay-Lussac, 78851 Elancourt) p.183
- Guidage latéral d'un véhicule urbain électrique de type Cycab, à partir des informations fournies par un récepteur GPS cinématique
J.Bom, B.Thuilot, F.Marmoiton, P.Martinet (LASMEA/CNRS, Clermont Fd) p.185
- Guidage automatique de véhicules agricoles par un unique GPS cinématique en présence de glissements
R.Lenain, C.Cariou (LASMEA/CNRS, Cemagref, Clermont Fd) p.187
- Télé-échographie robotisée. Le projet OTELO et son premier démonstrateur OTELO.
Equipe robotique médicale (C.Novales, LVR, Bourges) p.189
- Démonstrateur I4R : architecture et identification géométrique par vision
N.Andreff (LARAMA/IFMA, Clermont Fd)
F.Pierrot (LIRMM/CNRS, Montpellier) p.193

Session 1

Architectures matérielle et logicielle des systèmes robotiques

- RT MAPS, un atelier logiciel pour l'acquisition de données, le rejeu et le prototypage de systèmes robotiques mobiles complexes
B. Steux (Centre de Robotique - Ecole des Mines, Paris)
- SynDEx : un logiciel de CAO niveau système pour l'aide à l'implantation de systèmes distribués temps réel embarqués
Y. Sorel (INRIA, Rocquencourt)

^{RT}MAPS : Un atelier logiciel pour l'acquisition de données, le rejeu et le prototypage de systèmes robotiques mobiles complexes

Bruno STEUX - Maître de Conférence à l'Ecole des Mines de Paris
Claude LAURGEAU - Professeur à l'Ecole des Mines de Paris

Introduction

^{RT}MAPS, acronyme de Mines Automotive Prototyping System, est à la fois un atelier logiciel et une méthodologie de travail pour conduire des projets innovants sur les systèmes embarqués temps réel exploitant notamment des capteurs à haut débit tel que des capteurs vidéo mono ou stéréoscopique, des entrées audio, des radars, des télémètres, des capteurs de localisation (GPS centrale inertielle, odomètres...) associés à des systèmes d'informations géographiques...

Cet atelier logiciel a été développé à partir de 1998 au Centre de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris. En 2000, il a remporté un prix au concours national ANVAR de l'innovation et conduit à la création d'une start-up : Intempora, qui l'a industrialisé et le commercialise. Actuellement il est utilisé par les chercheurs du Centre de Robotique pour la conduite de leur recherche (une quinzaine de doctorants).

Au niveau industriel, ses principales références sont la Direction des Recherches de Renault, Thalès, Air Bus, le CEA, l'INRETS, l'INRIA, l'Université d'Orsay ...

Les idées innovantes de ^{RT}MAPS

1. **Le concept de BDDS** (Bases de Données Datées et Synchronisées) et de ENU (Enregistreur Numérique Universel).

Les systèmes de transport terrestres, aériens, maritimes, spatiaux sont tous potentiellement en voie de devenir des systèmes robotiques mobiles autonomes. Dès lors, ils disposeront de plus de systèmes de perception multi capteurs à haut débit et multi actionneurs.

Le passage au tout numérique pose le problème de l'acquisition directe d'informations numériques à très haut débit avec des périodes variables, ou à apparition aléatoire, en assurant leur datation et leur synchronisation. Les contraintes technologiques actuelles se situent au niveau des transferts de données via les bus et des mémoires de masse.

La technologie ^{RT}MAPS tire le meilleur projet des technologies matérielles actuelles en s'appuyant sur les noyaux de Windows, Linux ou QNX. Par exemple, sur le véhicule prototype du programme européen CARSENSE, des BDDS ont été créées, associées à 3 flux vidéo, 2 radars large et courte portée, un télémètre laser et deux bus CAN.

Au niveau de l'acquisition des données, ^{RT}Maps supporte la plupart des cartes d'acquisition vidéo (Matrox...), ainsi qu'un ensemble de caméras numériques (WebCams, caméscopes DV, caméras numériques sur IEEE1394). Les radars et lidars les plus populaires sont également supportés (Bosch, Mitsubishi, SICK, IBEO), ainsi que les capteurs les plus divers (centrales inertielle, GPS, données analogiques...).

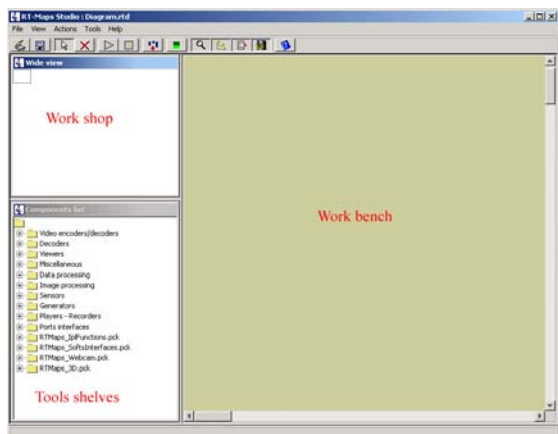


Vue du premier Enregistreur Numérique Universel (Source Carsense : 3 caméras, 2 radars, un télémètre laser et 2 bus CAN)

2. L'atelier logiciel de prototypage

Il permet évidemment la relecture des bases de données datées et synchronisées et leur visualisation à l'aide de composants logiciels constituant le VNU : Visualiseur Numérique Universel.

L'atelier logiciel comprend une interface de développement entièrement graphique.



Il se présente sous la forme d'une fenêtre divisée en trois, la zone (A) représente l'établi proprement dit (work bench) sur lequel on placera l'ouvrage à réaliser (le programme proprement dit), une zone (B) (work shop) qui est un zoom puissant capable d'étendre la taille de l'établi, la zone (C) qui est le magasin (tools shelves) dans lequel sont stockés les outils logiciels génériques. Il y en a actuellement plus d'une centaine disponibles. Les outils sont placés sur l'établi et connectés par des liaisons donnant au développeur un environnement puissant de programmation graphique qui accroît de manière importante sa productivité.

L'Atelier Logiciel ^{RT}MAPS est un logiciel « glue » modulaire et ouvert capable de s'interfacer avec d'autres logiciels. C'est ainsi qu'il communique avec des logiciels tels que Matlab/Simulink, Excel, Navtech ADAS-RP... Précisément ^{RT}MAPS est bien pourvu en outils de manipulation et de visualisation de bases de données et en perception, notamment en traitement d'images. La bibliothèque de contrôle commande bénéficie des liens avec Scilab et Scicos. Par ailleurs, les programmes développés sous l'environnement ^{RT}MAPS peuvent être compilés et exécutés directement sur un processeur cible embarqué.

Il est possible de créer très simplement ses propres composants en C++ à l'aide de ^{RT}Maps SDK (Software Development Kit). L'interface de programmation est complètement indépendante du système d'exploitation.

3. Exemple d'applications traitées

3.1. Conduite automatique d'une voiture par asservissement visuel



En juin, à l'occasion du congrès IV'2002, le véhicule Lara (A) a roulé pendant deux jours en conduite automatique par asservissement visuel (B) sur les pistes de Satory (C). La démonstration a été présentée au journal de vingt heures sur TF1 et France 2.

3-2 Réalisation d'un scanner 3D pour environnement urbain



Un scanner 3D pour environnement urbain a été mis au point en exploitant le véhicule Lara et la technologie ^{RT}MAPS. Voici la façade de l'Ecole des Mines de Paris (A) numérisée en trois dimensions par télémétrie laser à partir du véhicule Lara (B) avec la technologie ^{RT}MAPS (C).

3.2. Affichage directe sur le tableau de bord d'une signalétique intelligente



L'exploitation simultanée à bord du véhicule du GPS et des Systèmes d'Informations Géographiques Enrichis (SIGE), du radar, de la vision artificielle et des informations présentes sur le bus CAN permettent de mettre en œuvre une assistance à la conduite sécuritaire par affichage d'une signalétique embarquée sur tableau de bord numérique.

Conclusion

Par l'utilisation d'un outil unique pour acquérir les données, les enregistrer, les simuler et les traiter, ^{RT}Maps permet d'accroître sensiblement la productivité des équipes de développement travaillant sur des projets complexes. Les multiples applications mises en œuvre sur cette plateforme ont prouvé son efficacité et sa robustesse.

SynDEx : un logiciel de CAO niveau système pour l'aide à l'implantation d'applications distribuées temps réel embarquées

Y. Sorel

INRIA Rocquencourt
78153 le Chesnay Cedex
yves.sorel@inria.fr

Résumé

SynDEx est un logiciel de CAO niveau système fondé sur la méthodologie adéquation algorithme-architecture pour le prototypage rapide et l'optimisation d'applications distribuées temps-réel embarquées complexes. Il permet de spécifier à l'aide de graphes les algorithmes applicatifs et les architectures distribuées, de lancer des heuristiques d'optimisation de l'implantation des algorithmes sur les architectures conduisant à une simulation temporelle de l'exécution temps réel, et enfin de générer automatiquement des exécutifs distribués temps réel sans interblocage et à faible surcoût.

1 Introduction

SynDEx est un logiciel de CAO niveau système fondé sur la méthodologie adéquation algorithme-architecture (AAA) pour aider à la réalisation d'applications distribuées temps-réel embarquées complexes comme on en trouve dans les domaines de l'avionique, de l'automobile, des télécommunications, de la robotique mobile, etc... Ces applications sont, avant tout, *réactives* [1] c'est-à-dire qu'elles interagissent en permanence avec l'environnement auquel elles sont connectées. Elles doivent de plus respecter des contraintes temps réel sous peine de conséquences catastrophiques (temps réel critique). Ces contraintes sont de deux types : la *latence* qui correspond à la durée entre le début et la fin d'une réaction, la *cadence* qui correspond à la durée entre deux réactions consécutives (période). Ces applications sont embarquées c'est-à-dire qu'elles nécessitent de minimiser les ressources matérielles nécessaires, comme par exemple le nombre de processeurs, le nombre de médias de communication, les tailles mémoire, la consommation électrique, etc... Enfin pour des raisons de performances ou bien de modularité ces applications nécessitent une implantation sur une architecture matérielle distribuée (parallèle, répartie) constituée de plusieurs processeurs et/ou de circuits intégrés spécifiques communicant tous ensemble.

A l'aide d'heuristiques d'optimisation et de techniques de génération automatique de code, SynDEx permet d'effectuer du prototypage rapide qui conduit progressivement à un produit de série optimisé. De plus il assure que la simulation fonctionnelle effectuée sur une station de travail

se comportera de la même manière lorsqu'elle sera exécutée sur l'architecture cible distribuée, tout en respectant les contraintes temps réel spécifiées par l'utilisateur.

Tout d'abord nous présentons la méthodologie AAA ainsi que les modèles de graphe sur lesquels elle est fondée, nous présentons ensuite rapidement les fonctionnalités du logiciel SynDEx et illustrons son utilisation à travers une application de robotique mobile.

2 Méthodologie AAA

La méthodologie AAA est fondée sur des modèles de graphes, autant pour spécifier les algorithmes applicatifs et les architectures matérielles distribuées, que pour déduire les implantations possibles en termes de transformations de graphes. L'adéquation revient à résoudre un problème d'optimisation consistant à choisir une implantation dont les performances, déduites des caractéristiques des composants matériels, respectent les contraintes temps réel et d'embarquabilité.

2.1 Modèle d'algorithme

La spécification fonctionnelle d'une application conduit à un algorithme obtenu en général par composition de plusieurs algorithmes. Par exemple dans une application de robotique mobile un algorithme de commande de trajectoire peut utiliser dans sa boucle de rétroaction un algorithme de traitement d'image effectuant de la vision active et des algorithmes de commande pour les moteurs électriques servant à faire évoluer le robot. Un algorithme, tel que défini par Turing et Post, est une séquence (ordre total) finie d'opérations exécutable par une machine à états finie. Cette définition doit être étendue afin de permettre d'une part la prise en compte du *parallélisme physique* des architectures distribuées, composées de plusieurs machines à états finies interconnectées, et d'autre part la prise en compte de l'interaction infiniment répétitive de l'application avec son environnement.

Notre modèle d'algorithme est un *graphe de dépendances de données conditionné factorisé* [2] dont chaque sommet est une *opération* qui consomme des données, réalise l'opération en réaction à l'arrivée de ces données en produisant des données résultat, et dont chaque arc est une dépendance de donnée entre opérations. Les arcs définissent une rela-

tion d'ordre partiel sur l'exécution des opérations correspondant au *parallélisme potentiel* (opérations non reliées par une dépendance de donnée) de l'algorithme spécifié par l'utilisateur. Ce graphe, qui est infini, correspond à la répétition d'un motif identifiant une réaction de l'application. Ceci permet de réduire le graphe à son motif qui est un *graphe flot de données* classique [3]. Lorsque une opération d'un motif a besoin du résultat produit par une opération d'un motif précédent, ce qui correspond à une dépendance de donnée inter-motif, cela introduit lors de la factorisation un cycle qui doit impérativement être évité en introduisant un sommet particulier appelé *retard* (équivalent au z^{-n} de l'automatique et du traitement du signal). L'ensemble des retards représentent l'état de l'algorithme qui est ainsi clairement identifié. Enfin, notre modèle suit la sémantique des langages synchrones. Cela veut dire, que pour assurer un parfait déterminisme nécessaire dans le contexte temps réel, d'une part on fait l'hypothèse que lorsqu'une opération reçoit ses données, elle s'exécute et produit instantanément ses données, cela étant vrai pour toute opération du graphe, celui-ci s'exécute donc instantanément, et d'autre part afin d'assurer qu'un motif sera terminé avant qu'un autre commence, on introduit un arc de précédence sans donnée entre chaque motif. Les exécutions successives du motif définissent un *temps logique* dont chaque instant correspond à une réaction de l'application.

Par ailleurs chaque opération du graphe peut être décrite par un sous-graphe permettant une spécification hiérarchique de l'algorithme jusqu'aux *opérations atomiques* que l'on ne peut spécifier à l'aide d'un sous-graphe. Un sous-graphe peut être répété un nombre fini de fois et peut contenir, à son tour, un sous-graphe lui aussi répété un nombre fini de fois. Chaque répétition peut aussi être réduite par factorisation à son motif répétitif auquel est associé un nombre de répétition. Cela correspond à du *parallélisme potentiel de données* cas particulier du *parallélisme potentiel d'opérations* dont nous avons implicitement parlé jusqu'à présent. Enfin un sommet peut être conditionné. Il correspond alors à un ensemble de sous-graphes dont un seul sera exécuté en fonction de la valeur de l'*entrée de conditionnement* du sommet conditionné. La factorisation et le conditionnement correspondent aux structures de contrôle respectivement « For i=1 to...Do... » et « If...Then...Else... » que l'on trouve dans les langages impératifs.

Le graphe d'algorithme peut être, ou bien directement spécifié comme tel, ou bien déduit d'une spécification séquentielle ou CSP (Communicating Sequential Processes de Hoare) par analyse de dépendances, ou encore produit par les compilateurs des langages synchrones Esterel et Signal, qui présentent l'intérêt de faire des vérifications formelles en termes d'ordre sur les réactions. De manière plus générale, tout *langage de haut niveau orienté métier* possédant une sémantique compatible avec celle des langages synchrones, est un candidat capable de produire lors de sa compilation un graphe d'algorithme. Le langage

AIL (Architecture Implementation Language) défini par les constructeurs et équipementiers français du domaine de l'automobile, le langage Scicos orienté vers la spécification d'applications d'automatique, le langage AVS orienté vers la spécification d'applications de traitement d'images, ont des compilateurs qui produisent des graphes d'algorithmes. Ils permettent tous, bien sûr, d'effectuer des simulations fonctionnelles sur station de travail monoprocesseur.

2.2 Modèle d'architecture

Les modèles les plus classiquement utilisés pour spécifier une architecture multiprocesseur (multicomposant ne comportant pas de circuit intégré spécifique) parallèle ou distribuée, sont les PRAM (Parallel Random Access Machines) et les DRAM (Distributed Random Access Machines) [4]. Le premier modèle correspond à un ensemble de processeurs communicant par mémoire partagée alors que le second correspond à un ensemble de processeurs à mémoire distribuée communicant par passage de messages. Si ces modèles sont suffisants pour décrire, sur une architecture homogène, la distribution et l'ordonnement des opérations de calcul de l'algorithme, ils ne permettent pas de prendre en compte des architectures hétérogènes ni de décrire précisément la distribution et l'ordonnement des opérations de communications inter-processeurs qui sont souvent critiquées pour les performances temps réel.

Notre modèle d'*architecture multicomposant* hétérogène [5] est donc un graphe orienté, dont chaque sommet est une machine à états finie (machine séquentielle) et chaque arc une connexion physique entre deux machines à états finies. Il y a cinq types de sommets : l'*opérateur* pour séquencer des opérations de calcul (séquenceur d'instructions), le *communicateur* pour séquencer des *opérations de communication* (canal DMA), le *bus/mux/démux* avec ou sans *arbitre* pour sélectionner, diffuser et éventuellement arbitrer des données, et la *mémoire* pour stocker des données et des programmes (c'est aussi une machine séquentielle). Il y a deux types de sommets mémoire : la mémoire RAM (à accès aléatoire) pour stocker les données ou programmes locaux à un opérateur, la RAM et la SAM (à accès séquentiel), toutes deux pour les données communiquées entre opérateurs ou/et communicateurs. L'*arbitre*, quand il y en a un dans un bus/mux/démux/arbitre, est aussi une machine à états finie qui décide de l'accès aux ressources partagées que sont les mémoires. Il existe des opérateurs dégénérés qui ne sont capables d'exécuter qu'un seul type d'opération ils seront associés à des circuits intégrés spécifiques non programmables, ne réalisant qu'une seule fonction. Les différents sommets ne peuvent pas être connectés entre eux de n'importe quelle manière, il est nécessaire de respecter un ensemble de règles détaillées dans [6]. Par exemple deux opérateurs ne peuvent pas être connectés directement, de même pour deux communicateurs. Ils peuvent chacun être connecté à une RAM partagée ou à une SAM pour communiquer, en passant, ou non, par l'intermédiaire de communicateurs pour assurer le découplage

entre calcul et communication. L'hétérogénéité ne signifie pas seulement que les sommets peuvent avoir chacun des caractéristiques différentes (par exemple durée d'exécution des opérations et taille mémoire des données communiquées), mais aussi que certaines opérations ne peuvent être exécutées que par certains opérateurs, ce qui permet de décrire aussi bien des composants programmables (processeurs) que des composants non programmables (ASIC ou FPGA). Un processeur est décrit par un sous-graphe contenant un seul opérateur, une ou plusieurs RAM de données et de programme locaux. Un moyen de communication direct (sans routage) entre deux processeurs, est un sous-graphe contenant au moins une RAM (données communiquées) et des bus/mux/démux/arbitre, ou bien un sous-graphe linéaire composé au minimum des sommets (bus/mux/démux/arbitre, RAM, communicateur, RAM ou SAM, communicateur, RAM, bus/mux/démux/arbitre).

2.3 Modèle d'implantation optimisée

L'implantation d'un algorithme sur une architecture multi-composant est une *distribution* et un *ordonnancement*, non seulement des opérations de l'algorithme sur les opérateurs de l'architecture, mais aussi des opérations de communication, qui découlent de la première distribution, sur les communicateurs, les bus/mux/démux/arbitre et les mémoires.

La distribution consiste à affecter chaque opération de l'algorithme à un opérateur capable de l'exécuter. Ceci conduit à une partition de l'ensemble des opérations de l'algorithme en autant de sous-graphes qu'il y a d'opérateurs. Ensuite pour chacune de ces opérations il faut ajouter un sommet *alloc* d'allocation mémoire programme locale (resp. allocation mémoire données locales) et affecter ce sommet à une RAM programme (resp. RAM données locales) connectée à l'opérateur qui exécute l'opération. Enfin, il faut affecter chaque dépendance de donnée inter-opérateur (c'est-à-dire entre opérations affectées à des opérateurs différents), à une *route* reliant les deux opérateurs (chemin dans le graphe de l'architecture), créer et insérer, entre les deux opérations de l'algorithme, autant d'opérations de communication qu'il y a de communicateurs, autant de sommets *identité* qu'il y a de sommets bus/mux/démux/arbitre et autant de sommets *alloc* d'allocation de mémoires données communiquées, qu'il y a de sommets mémoire SAM et RAM sur la route, puis les affecter aux sommets correspondant du graphe de l'architecture. Ceci conduit à une partition de l'ensemble des sommets de communication, des sommets *identité* et des sommets *alloc* respectivement en autant de sous-graphes qu'il y a de communicateurs, de bus/mux/démux et de mémoires. Les sommets *alloc* permettent de déterminer la taille des mémoires de programme et de données nécessaires pour l'application.

L'ordonnancement consiste à linéariser (rendre total par ajout d'arcs) l'ordre partiel associé à chaque sous-graphe de l'algorithme formé d'opérations, d'opérations de communication, de sommets *identité* et *alloc*, affecté

à un sommet respectivement opérateur, communicateur, bus/mux/démux, et mémoires du graphe de l'architecture, car ceux-ci sont des machines séquentielles. Une implantation est donc le résultat d'une transformation du graphe de l'algorithme (ajout de nouveaux sommets et de nouveaux arcs) en fonction du graphe de l'architecture, lui même transformé (détermination de toutes les routes possibles). L'ensemble de toutes les implantations possibles, étant donné un algorithme et une architecture, est formalisé comme une composition de trois relations binaires : le *routage*, la *distribution* et l'*ordonnancement*, chacune d'elles mettant en correspondance deux couples de graphes (algorithme, architecture) [7].

La recherche, parmi toutes les implantations possibles, d'une implantation optimisée tenant compte de contraintes temps-réel et d'embarquabilité, correspond à une adéquation (mise en correspondance efficace) entre cet algorithme et cette architecture. L'optimisation d'implantation se fait « hors-ligne », c'est à dire avant l'exécution en temps réel de l'application. Cette approche est bien adaptée au contexte des applications temps réel qui doivent être déterministes afin d'assurer une bonne sécurité de conception. De plus elle conduit à une génération de code induisant un surcoût inférieur à celui obtenu par des optimisations faites « en-ligne », c'est à dire pendant l'exécution en temps réel de l'application, ajoutant au minimum le coût de l'ordonnancement basé sur des priorités fixes d'un RTOS résident. Le problème d'optimisation que nous avons formalisé [8], et dont nous avons automatisé la résolution approchée, se limite au cas de l'adéquation entre un algorithme et une architecture donnés, y compris dans leur granularité et leur topologie, sous une contrainte temps réel unique de cadence égale à la latence, et sans préemption d'une opération par une autre opération. Même ainsi réduit, ce problème est reconnu NP-difficile, et le nombre d'implantations possibles dans le cas d'une application réaliste rend prohibitive toute tentative de recherche exhaustive de la solution optimale ; c'est pourquoi on utilise des heuristiques pour trouver des solutions approchées. De plus, l'objectif de prototypage rapide nous a fait étudier plus particulièrement des *heuristiques gloutonnes* (sans retour arrière) qui s'exécutent très rapidement tout en donnant des résultats de bonne qualité [9].

Les heuristiques de distribution-ordonnancement que nous développons sont du type *gloutonnes par ordonnancement suivant une liste* (choix fait par les fonctions de coût à partir des opérations ordonnancables). Elles nécessitent au préalable une *caractérisation* des algorithmes relativement aux architectures. Celle-ci est faite en mesurant à l'aide de l'horloge du processeur les durées des opérations et des communications qu'il peut exécuter, ou bien estimée à partir de la documentation. Une fonction de coût simple [8] revient à évaluer, lorsqu'on affecte une opération à un opérateur, de combien on allonge le chemin critique du graphe de l'algorithme étiqueté par les durées de calcul et de transfert de données, tout en exploitant la

marge d'ordonnement de l'opération considérée. Cette dernière correspond à la différence entre sa date de début d'exécution au plus tôt et sa date de début d'exécution au plus tard. Cette fonction de coût est améliorée pour prendre en compte les communications inter-opérateurs qui peuvent avoir lieu par mémoire partagée ou par passage de messages, l'hétérogénéité des opérateurs, des communicateurs, des bus/mux/démux/arbitre et des mémoires, et enfin le conditionnement des opérations. Les communications inter-opérateur sont distribuées et ordonnées sur les routes, en tenant compte avec précision des parties de routes communes, des routes parallèles et des conflits d'accès aux ressources partagées principalement les séquenceurs des opérateurs requis par les communicateurs [10]. L'optimisation de l'utilisation des différents types de mémoire (RAM programme ou données et SAM) est réalisée par ré-allocation statique. Ces heuristiques sont ensuite étendues à des heuristiques itératives de voisinage local [7] qui ne sont plus gloutonnes (avec retour arrière), beaucoup plus lentes mais donnant des résultats de meilleure qualité.

Afin de prendre en compte des contraintes temps réel multiples nous avons repris les travaux classiques sur l'ordonnement monoprocesseur pour les reformuler dans le cadre de notre modèle d'algorithme, en exprimant la notion de périodicité (généralisation de la cadence) à l'aide de la factorisation, vue comme une répétition de graphe temporelle (par opposition à spatiale). Nous avons ainsi pu proposer un algorithme optimal d'ordonnement [11] d'un système temps réel sans préemption sur monoprocesseur avec contraintes multiples de précédences de données, de périodicités (chacune appliquée à une opération), et de latences (chacune appliquée à un couple d'opérations). Nous avons aussi défini la notion de latence pour tout couple d'opérations. Cet algorithme est optimal dans le sens où s'il existe un ordonnancement l'algorithme le trouvera. Nous avons dérivé de cet algorithme exact et de notre heuristique gloutonne, une nouvelle heuristique traitant les contraintes temps réel multiples pour les architectures multicomposants. Dans le contexte multicomposant la conception conjointe logiciel/matériel consiste à choisir la partie de l'algorithme qui sera implantée en logiciel, c'est-à-dire sur un multiprocesseur (composants programmables), et celle qui sera implantée en matériel, c'est-à-dire sur un ou plusieurs circuits intégrés spécifiques (composants non programmables). Ce partitionnement est fait de façon manuelle en utilisant, soit une contrainte de distribution, soit en lui attribuant une durée d'exécution particulièrement rapide, chaque fois que l'on veut imposer qu'une opération s'exécute sur un opérateur dégénéré uniquement capable de l'exécuter.

Jusqu'à présent on a fait l'hypothèse que le nombre de ressources matérielles était donné a priori tout en cherchant à les exploiter au mieux. Le problème peut être généralisé au cas où le nombre de ressources n'est pas donné a priori. Pour cela on se ramène tout d'abord au cas précédent en calculant la borne maximale des ressources. On

peut alors tenter d'améliorer la solution obtenue qui respecte les contraintes temps réel, en diminuant itérativement le nombre de ressources et en effectuant de nouveau une distribution et un ordonnancement, puis en vérifiant si les contraintes sont toujours vérifiées.

2.4 Modèle d'exécution

La génération automatique d'exécutifs distribués temps réel se fait suivant des règles décrivant la transformation d'un graphe d'implantation optimisé en un graphe d'exécution [5]. Pour chaque opérateur (resp. chaque communicateur) on construit un programme séquentiel formé de la séquence des opérations de calcul (resp. des opérations de communication) qu'il doit exécuter. Les opérations de communications sont des SEND et des RECEIVE de données transmises entre communicateurs via une SAM (communication par passage de message), ou des WRITE et des READ quand les données sont transmises via des RAM (communication par mémoire partagée). Pour garantir les précédences d'exécution entre les opérations appartenant à des séquences de calcul et/ou de communication différentes, et pour garantir l'accès en exclusion mutuelle aux données partagées par les opérations de ces séquences, on ajoute des opérations de synchronisation avant et après chaque opération qui lit (resp. écrit) une donnée écrite (resp. lue) par une opération appartenant à une autre séquence. Ces opérations de synchronisation utilisent des sémaphores générés automatiquement. Nous avons montré à l'aide des réseaux de Pétri que ces sémaphores permettent à l'exécutif de respecter l'ordre partiel du graphe d'algorithme initial [6], n'introduisant pas ainsi d'interblocage dans une itération infinie ou finie donnée, ou bien entre deux itérations infinies ou finies consécutives.

Il y a autant d'exécutifs générés, chacun d'eux correspondant à un fichier distinct, qu'il y a d'opérateurs dans l'architecture. Chaque fichier d'exécutif est un code intermédiaire indépendant de l'opérateur, c'est-à-dire du processeur puisqu'il n'y a qu'un opérateur par processeur, composé d'une liste d'appels de macros qui seront traduites par un macro-processeur en autant de programmes dans le langage source préféré (C, ou assembleur par exemple). Chacun de ces programmes source sera compilé puis chargé dans la mémoire programme de l'opérateur correspondant. Les définitions des macros qui sont dépendantes de l'opérateur (du processeur) peuvent être classées en deux ensembles. Le premier ensemble est un jeu extensible de *macros applicatives* réalisant les opérations de l'algorithme. Le second ensemble, que nous appelons *noyau d'exécutif*, est un jeu fixe de *macros système* qui supportent le chargement initial des mémoires programmes, la gestion des mémoires données (allocation statique, copies et fenêtres glissantes de macro-registres), le séquencement (sauts conditionnels et itérations finies et infinies), les transferts de données inter-opérateurs (macro-opérations de communication transférant le contenu de macro-registres), les synchronisations inter-séquences (assurant l'alternance entre

écriture et lectures de chaque macro-registre partagé entre séquence de calcul et séquences de communication), et le chronométrage (pour permettre la mesure des caractéristiques des opérations de l'algorithme et des performances de l'implantation).

3 Logiciel SynDEx

Le logiciel de CAO niveau système SynDEx concrétise la méthodologie AAA. Il est distribué gratuitement sur le web à l'url <http://syndex.org>. C'est un logiciel graphique interactif qui offre les fonctionnalités suivantes :

- spécification et vérification d'un algorithme d'application saisi sous la forme d'un graphe de dépendances de données factorisé conditionné ou produit automatiquement par certains compilateurs de langages orientés métiers ;
- spécification et vérification d'un graphe d'architecture multicomposant (processeurs et/ou composants spécifiques communicant via un réseau) ;
- heuristique pour la distribution et l'ordonnement de l'algorithme d'application sur l'architecture, avec optimisation du temps de réponse (une seule latence = une seule période) ;
- simulation du comportement temps réel, visualisation d'un diagramme temporel ;
- génération des exécutifs distribués temps réel, sans interblocage, avec mesure optionnelle des performances temps réel. Ils sont construits, avec un surcoût minimal, à partir de noyaux d'exécutif dépendant des processeurs cibles. Actuellement des noyaux d'exécutifs sont fournis pour : les stations de travail UNIX, les processeurs i80x86, les processeurs de traitement du signal TMS320C40, TMS320C60 et ADSP21060, les microcontrôleurs MPC555, MC68332 et i80C196. Des noyaux pour d'autres processeurs sont facilement portés à partir des noyaux existants.

SynDEx permet de faire naturellement de la conception conjointe logiciel/matériel en connectant aux processeurs des circuits intégrés spécifiques ASIC ou FPGA comportant une interface de communication compatible avec le protocole de communication de l'exécutif SynDEx.

Puisque les exécutifs distribués sont générés automatiquement le cycle de développement des applications développées avec SynDEx est réduit de manière significative.

4 Application au CyCab

Afin d'illustrer AAA/SynDEx nous présentons une application de conduite manuelle pour le CyCab. Ce dernier est un petit véhicule électrique vendu par la société Robosoft (Fig. 1) qui comporte quatre roues motrices et une direction qui peuvent être commandées à l'aide d'un joystick par le conducteur. L'architecture distribuée et extensible du CyCab est constituée de quatre calculateurs à base du processeur MPC555 de Motorola, et d'un calculateur PC servant principalement d'interface homme-machine. L'ensemble des calculateurs communiquent à l'aide d'un réseau

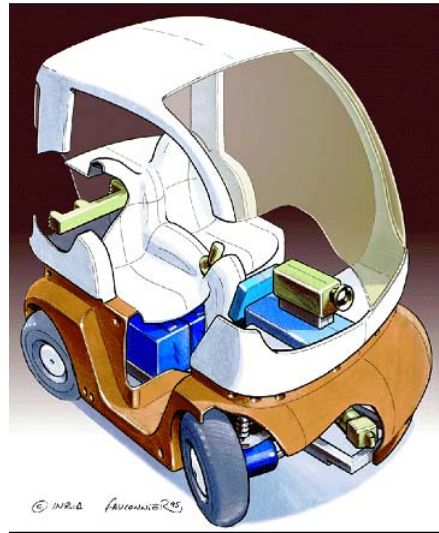


FIG. 1 – Vue du CyCab

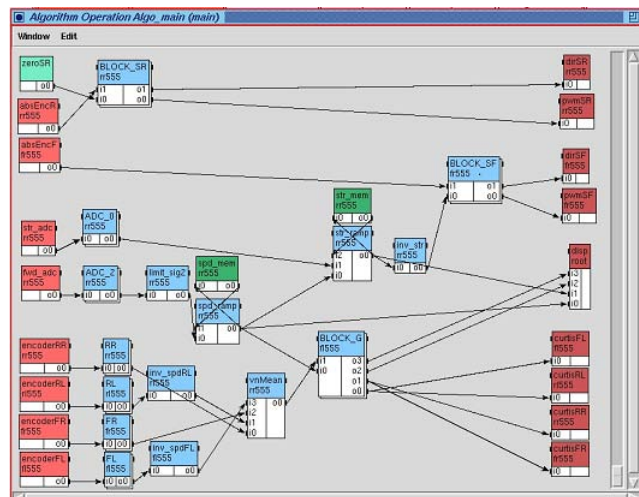


FIG. 2 – Graphe d'algorithme

CAN. Les lois de commandes qui utilisent les informations venant des capteurs fournissant la position du joystick et l'angle des roues, permettent de calculer le couple à appliquer aux moteurs et aux freins ainsi que l'angle de la direction. Ces lois de commande ont été implantées avec SynDEx sur l'architecture distribuée. La Fig. 2 représente le graphe d'algorithme de l'application de conduite manuelle. Les opérations sans prédécesseurs correspondent aux capteurs et celles sans successeurs aux actionneurs. Entre les capteurs et les actionneurs on trouve les opérations réalisant l'application de conduite manuelle avec les différentes lois de commandes pour calculer, en fonction de la position du joystick, le couple des moteurs et des freins, ainsi que pour calculer l'angle de direction. La plupart des opérations sont hiérarchiques, c'est-à-dire qu'elles contiennent à leur tour un graphe d'opérations (visualisable en cliquant dessus). Cela permet de faire de la conception descendante

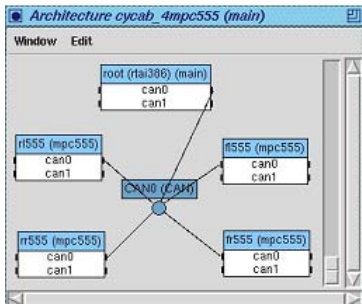


FIG. 3 – Graphe d'architecture

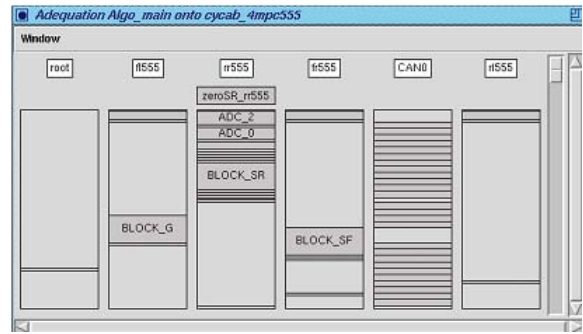


FIG. 4 – Graphe d'implantation : simulation temporelle

lorsque les algorithmes sont complexes. Cette spécification fait apparaître du parallélisme potentiel, lorsque deux opérations ne sont pas reliées par un arc, qui est exploité par SynDEx lorsque l'utilisateur lance l'adéquation, c'est-à-dire l'heuristique d'optimisation de la distribution et de l'ordonnancement. La Fig. 3 représente le graphe d'architecture du CyCab formé de quatre calculateurs à base de MPC555 et d'un PC, reliés ensemble par un bus CAN qui est un média de communication multipoint diffusant de type SAM. La Fig. 4 représente le graphe d'implantation, résultant de l'adéquation, qui décrit la distribution (allocation des opérations sur les processeurs et des transferts de données sur les médias de communications) et l'ordonnancement (mise en séquence des opérations allouées à un processeur et des transferts de données alloués à un média de communication). Dans ce graphe d'implantation les opérations, aussi bien de calcul que de communications, disposées selon une verticale correspondant à chaque opérateur ou à chaque média sur lesquelles elles sont distribuées et ordonnancées, ont des hauteurs proportionnelles à leur durées et des positions correspondant à leur date de début d'exécution. Cela décrit un diagramme temporel représentant une simulation du comportement qu'aura l'algorithme de conduite manuelle lorsqu'il s'exécutera en temps réel sur l'architecture distribuée du CyCab. Afin d'obtenir le code exécutable, il suffit avec SynDEx de générer automatiquement le macro-code des exécutifs puis d'utiliser le macro-processeur *gm4* avec les noyaux d'exécutif pour le MPC555, le PC et le CAN, de compiler les sources produits pour chacun des processeurs, et enfin, après avoir chargé les exécutables sur ces processeurs, de lancer leur exécution. Les résultats temps réel mesurés, sont semblables à dix à quinze pourcents près à ceux prédits. Malgré cet écart AAA assure que l'ordre partiel de l'algorithme sera toujours respecté et qu'il n'y aura pas d'interblocage.

Références

[1] David Harel and Amir Pnueli. On the development of reactive systems. In K. R. Apt, editor, *Logics and Models of Concurrent Systems*. Springer Verlag, New York, 1985.

[2] Christophe Lavarenne and Yves Sorel. Modèle unifié pour la conception conjointe logiciel-matériel. *Trai-*

tement du Signal, 14(6), 1997.

[3] J.B. Dennis. First version of a dataflow procedure language. In *Lecture Notes in Computer Sci.*, volume 19, pages 362–376. Springer-Verlag, 1974.

[4] A.Y. Zomaya. *Parallel and distributed computing handbook*. McGraw-Hill, 1996.

[5] Thierry Grandpierre and Yves Sorel. From algorithm and architecture specification to automatic generation of distributed real-time executives : a seamless flow of graphs transformations. In *First ACM IEEE International Conference on Formal Methods and Models for Codesign, MEMOCODE'03*, Mont Saint-Michel, France, June 2003.

[6] Thierry Grandpierre. *Modélisation d'architectures parallèles hétérogènes pour la génération automatique d'exécutifs distribués temps réel optimisés*. PhD thesis, Université de Paris Sud, Spécialité électronique, 30/11/2000.

[7] Annie Vicard and Yves Sorel. Formalization and static optimization for parallel implementations. In *DAPSYS'98 Workshop on Distributed and Parallel Systems*, Budapest, Hungary, September 1998.

[8] Yves Sorel. Massively parallel systems with real time constraints, the algorithm architecture adequation methodology. In *Conf. on Massively Parallel Computing Systems*, Ischia, Italy, May 1994.

[9] Zhen Liu and Christophe Corroyer. Effectiveness of heuristics and simulated annealing for the scheduling of concurrent task. an empirical comparison. In *PARLE'93, 5th international PARLE conference, June 14-17*, pages 452–463, Munich, Germany, November 1993.

[10] Thierry Grandpierre, Christophe Lavarenne, and Yves Sorel. Optimized rapid prototyping for real-time embedded heterogeneous multiprocessors. In *CODES'99 7th International Workshop on Hardware/Software Co-Design*, Rome, Italy, May 1999.

[11] Liliana Cucu, Remy Kocik, and Yves Sorel. Real-time scheduling for systems with precedence, periodicity and latency constraints. In *10th RTS2000 Real-Time Systems Conference*, Paris, France, March 2002.

Session 2

Réalité Virtuelle et Interfaces

- Dynamic simulation and 3D interaction
C. Mendoza, C. Laugier, O. Galizzi et F. Faure
- Effets de la latence en Réalité Virtuelle et téléopération
J.L. Vercher
- Interfaces haptiques et pseudo-haptiques
A. Lecuyer, C. Andriot, A. Crosnier
- Environnement logiciel et applications
B. Arnaldi

Dynamic Simulation and 3D Interaction

C. Mendoza, C. Laugier & O. Galizzi, F. Faure
SHARP EVASION

INRIA* Rhône-Alpes & GRAVIR†

ZIRST-655, Avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot Saint Martin, FRANCE.

Email: [Cesar.Mendoza-Serrano, Olivier.Galizzi, Francois.Faure, Christian.Laugier]@inrialpes.fr

Abstract

This paper presents some problems and solutions in the domain of dynamic simulation and 3D interaction in virtual reality. First, we handle the trade-off problem between precision and interactivity for the dynamic simulation of a large number of moving solid bodies. Next, in the framework of deformable object interactions we introduce a 3D cutting algorithm including force feedback.

1 Introduction

The dynamic simulation of complex objects and their associated interactions in virtual environments are the origin of many research problematics in robotics and virtual reality. The recent advances in computer science and the use of more powerful machines allows to consider the development of new applications that were unimaginable in the past (e.g. medical simulators). The main problem arises from the need of merging the simulation of physical complex phenomena that combines movements, deformations, interactions (collisions, ruptures, cuts ...) and the resolution of the differential equations representing the behavior of the objects. This problem is constrained further in some applications where interactivity is required (e.g. surgery simulations, videogames).

Developing methods able to trade-off accuracy for interactivity is essential. These methods would allow an application to handle complex scenes and precisely dispatch computation time over the different tasks such as physical simulation, high-level control and graphical rendering. An application interface would include a slider allowing the user to smoothly tune the trade-off between accuracy and frame rate. Currently available methods do not allow the user to limit the computation time, or fail to smoothly degenerate when the computation time decreases, leading to unrealistic results. As the first contribution of this paper, we propose a tunable method for the resolution of the dynamics of rigid bodies and the collision response. This is based on a new efficient Linear Complementary

Problem (LCP) solver, with tunable computation time. Error accumulation is avoided by maintaining acceleration, velocity and position errors within acceptable bounds.

The simulated virtual objects can also be deformable (e.g. human organs). To simulate these objects in real-time is difficult due to the complexity of the differential equations representing their dynamics. In some applications, these objects may be subject to different forms of interactions with a human operator. For example, the object might be cut or touched (using a force feedback device). The second contribution of this paper presents an algorithm that allows to execute cuts in soft tissue in real-time. The cutting algorithm reflects cuts by separating the elements that are in contact with the scalpel. To separate them we take into account the physical interaction between the scalpel and the deformable object. The algorithm includes force feedback to increase the realism of the interaction.

The organization of this paper is as follows. Section 2 discusses previous works. Section 3 presents our tunable method and shows how to use it to build an error-tolerant simulation loop. Section 4 presents the cutting algorithm. Next, in Section 5 we present some results and in Section 6 we give a brief conclusion.

2 Previous works

Generally, physical based simulations involve two main tasks : collision detection and resolution of the dynamic equation of the systems. Tunable collision detection methods have been proposed [1] in the past. We focus in tuning the resolution of the dynamic equations. In particular, our dynamic equations represent a system composed of a large number of solid objects that may be moving and interacting between one another. Impact methods handle collisions one after another [2, 3]. Other approaches handle all contacts simultaneously [4, 5]. Moving solids cannot easily be clustered, and multiresolution methods are not well suited because a set of solids is not a continuous material. Since we cannot simplify the model, we need iterative methods able to terminate as soon as a given number of

*Inst. Nat. de Rech. en Informatique et en Automatique.

†Lab. d'Informatique GRAphique, VIsion et Robotique.

iterations have been performed. Impact methods propagate collisions until impacts fall below a given threshold. This approach is iterative and is the best-suited when propagation effects are desired. It is known to be stable and computationally efficient only when a small number of bodies interact. Pivoting strategies [4] are more efficient but they do not allow us to control the computation time. Milenkovic’s method [5] uses optimization and may thus allow trade-offs, though this point is not discussed. The method relies on sophisticated quadratic programming methods and the computation time does not allow the interactive animation of complex scenes. However good stability is obtained by correcting positions and velocities as well as acceleration at each time step. This motivates our work on a simpler, faster and tunable method.

Concerning real-time interactions of deformable objects, in particular 3D cutting of soft tissue and realistic force feedback, most of the research has been done focusing in medical simulations. Previous works address cutting by *removing* [6] from the simulation the elements that collide with the cutting tool or by *subdividing* [7][8] the colliding elements. Removing elements destroys the material from the virtual organ. In some cases, this is not realistic since the mass of the organ is not preserved. To increase realism, the number of simulated elements is incremented. This might cause a slow down in the simulation. On the other hand, subdivision is more realistic, but the number of simulated elements increases and therefore the simulation is slowed down as well. In our previous works [9], we have started a new approach: *separating the elements* instead of removing or dividing them. The approach does not increment the number of elements during the simulations and preserves the mass of the organ. We implemented it in a 2D mass-spring model. Later, Nienhuys et. al. [10] has used the same idea to approach 3D cutting but without using the physical interaction between the tool and the object and force feedback.

3 The tunable resolution method

3.1 Background and motivation

Mathematically speaking, the dynamics of a rigid object subject to geometrical constraints can be written using the Differential Algebraic Equation [11]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

where $\ddot{\mathbf{x}} = d\dot{\mathbf{x}}/dt = d^2\mathbf{x}/dt^2$, eq. 1 is Newton’s law. Vector $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ models constraint errors, vector \mathbf{f}_e models the external forces and vector \mathbf{f}_i models the internal forces applied to maintain the constraint. Articulated solids can be handled the same way in dimension 6, with eq. 2 representing the joint constraints. Differentiating twice eq. 2

and using Lagrange multipliers [12], we get:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_e + \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}\ddot{\mathbf{x}} = -\frac{\delta(\mathbf{J}\dot{\mathbf{x}})}{\delta q} \dot{\mathbf{x}} \quad (4)$$

where $\boldsymbol{\lambda}$ is the vector of the Lagrange multipliers associated with each independent scalar constraint, matrix $\mathbf{J} = \delta g/\delta q$ is the Jacobian of the constraints, and the second term of eq. 4 depends only on the positions and velocities. This linear equation system can be solved using different techniques[13] with time complexity ranging from $O(n^4)$ to $O(n)$. Linear-time dynamics is restricted to tree-like structures [14, 12], whereas structures with closed loops can be handled using generic cubic-time solutions or quadratic-time iterative solutions based on the conjugate gradient algorithm [15]. Numerical time integration unfortunately results in constraint errors. Moreover, constraint drift necessarily occurs in more complex structures with closed loops. In an articulated solid structure, constraint errors result in broken joints, and penetration at contact points.

A well-known technique to prevent the drift from accumulating over time is to rewrite eq. 4 as $\mathbf{J}\ddot{\mathbf{x}} = -\frac{\delta(\mathbf{J}\dot{\mathbf{x}})}{\delta q} \dot{\mathbf{x}} - \alpha \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \beta \dot{\mathbf{g}}(\dot{\mathbf{x}})$. For example, vector $\dot{\mathbf{g}}(\dot{\mathbf{x}})$ may represent the velocity of a body subject to constraints. In practice it is difficult to choose the proportional-derivative coefficients α and β so that the drift remains invisible, unless very small time steps are applied. Moreover the optimal coefficients strongly depend on the simulated structure. Another way of controlling the drift is to apply poststabilization [11]. In this approach, not only $d^2\mathbf{g}/dt^2 = 0$ is enforced at each time step (eq. 4) but also $d\mathbf{g}/dt = 0$ and $\mathbf{g} = 0$. Projecting the state vector to the constraint manifold allows the use of large time steps while easily maintaining constraint drift within acceptable values. In practice, poststabilization cancels geometrical errors due to approximated accelerations as well as numerical integration. We propose a new iterative LCP solver for contact force computation, and show how poststabilization allows us to perform fast approximate computations with efficient control on geometrical errors.

3.2 Iterative solution

We apply constraints to bind solids or to avoid interpenetrations. Figure 1(a) illustrates a frictionless contact constraint set up to avoid interpenetration. Points \mathbf{p}_1 and \mathbf{p}_2 are computed by a collision detection module. The extraction vector $\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$ gives the direction \mathbf{n} of a scalar constraint $(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$, associated with position error $(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \cdot \mathbf{n}$ and required correction $(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \cdot \mathbf{n}$. Similarly, the velocity constraint is $(\dot{\mathbf{p}}_1 - \dot{\mathbf{p}}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$ and the acceleration constraint is $(\ddot{\mathbf{p}}_1 - \ddot{\mathbf{p}}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$.

Using extraction vectors to compute the contact constraints allows us to handle polyhedral objects as well

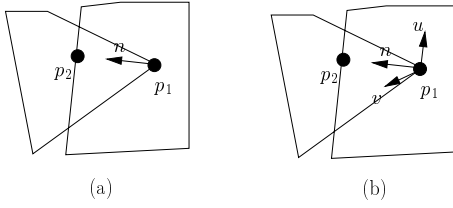


Figure 1: A contact constraint (a) and a point-to-point constraint (b).

as analytical volumes. The object must be convex or decomposed in convex elements. Figure 1(b) illustrates a point-to-point constraint. Points \mathbf{p}_1 and \mathbf{p}_2 are fixed with respect to their associated bodies. The position constraint $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 = \mathbf{0}$ gives three independent scalar constraints along \mathbf{n} , \mathbf{u} and \mathbf{v} . Velocity and acceleration constraints can be straightforwardly deduced. One way of writing the constrained solid dynamics equation is $\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\lambda = -\mathbf{e}$ where the sparse matrix \mathbf{J} encodes constraint geometry, the block-diagonal matrix \mathbf{M} encodes masses, λ is a set of Lagrange multipliers (typically the constraint forces along the independent constraint directions) and \mathbf{e} is the error on constrained values which would occur if no constraint forces were applied. $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\lambda$ is the correction to apply to the accelerations to meet the acceleration constraints. This formulation has several interesting features: constraint solution is seen as the correction of an initial guess, such as null forces or forces computed at the previous time step; matrix sparsity allows the use of a biconjugate gradient algorithm [16], which iteratively refines a global solution even with singular matrices; Lagrange multipliers easily encode a wide variety of constraints [17].

Surface contacts involve inequations since bodies are not allowed to penetrate nor to attract each other. This can be modeled as the following Linear Complementarity Problem [4]:

$$\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\lambda \geq -\mathbf{e} \quad (5)$$

$$\lambda \geq \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\lambda^T(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\lambda + \mathbf{e}) = \mathbf{0} \quad (7)$$

where operator \geq applied to vectors means that the inequality holds for all rows. For each contact i , let λ_i be the i -th entry of vector λ (the local contact force) and g_i the i -th entry of vector $\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T\lambda$ (the local acceleration along the normal due to λ). We use an active set method with two sets of contacts: C which contains *clamped* contacts for which we solve for ($g_i = -e_i$, $\lambda_i \geq 0$), and NC which contains *vanishing* contacts for which we set λ_i to 0 and check that $g_i \geq -e_i$. The algorithm iterates to improve an initial guess. At the end of each iteration, contacts in C with attractive force ($\lambda_i < 0$) move to NC whereas contacts in NC where penetration occurs ($g_i < -e_i$) move to C .

Our algorithm is based on the biconjugate gradient solution (BCG). At each time step, it performs two products of matrix $\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T$ by vectors. This is done in linear time due to the sparsity of matrices \mathbf{M} and \mathbf{J} . Only the subset of \mathbf{J} associated with C is used, since vanishing contacts should not apply forces. When the contact sets are modified, the BCG solution is restarted on the new equation system, with current λ used as initial guess. Since the bodies tend to repel each other, we have never encountered any cyclic behavior so far. Even when the constraints are not feasible (bodies enclosed in a too small space) the penetration converges to a minimum. We approximate Coulomb friction setting additional tangential constraints while clamping the forces inside the friction cones. This is not guaranteed to converge to a correct solution. However, combined with the stabilization presented in section 3.3, this generates visually plausible friction effects.

The important difference between our algorithm and standard LCP solvers [18] is that only one step of the conjugate gradient solution is performed between each inequality checking, whereas most methods perform a full solution using an incremental matrix factoring. Our approach converges faster to the correct sets C and NC . Moreover, the conjugate gradient step is fully applied rather than bounded by the first constraint violation like in pivoting schemes. This prevents the global convergence from being slowed down by a small number of difficult constraints. The number of unknowns (one per independent constraint) is much smaller than using quadratic programming, and force reciprocity is implicitly applied. Consequently, errors can only violate geometric constraints rather than Newton's laws. We compared the efficiency of our algorithm with a standard BCG applied to the same scenes with contacts seen as bilateral constraints. Surprisingly, our algorithm is slightly more efficient in most cases. This is probably due to the vanishing contacts which reduce the number of active constraints.

3.3 Stabilization

High frame rates can be obtained by limiting the computation time spent in the LCP solution. However, we must prevent the consequences of solution error from accumulating at each time step. Fortunately, our LCP solution can straightforwardly be applied to velocities and positions also. When applied to velocities, \mathbf{e} represents the penetration velocities $\mathbf{J}\dot{\mathbf{x}}$ to cancel, and λ represents constraint impulses. Bouncing can be applied using Poisson's model by applying $(1 + \epsilon)\lambda$ with $0 \leq \epsilon \leq 1$. Different ϵ can be used at each contact. Applied to the correction of positions, the solution cancels interpenetrations by small displacements. In this case, vector \mathbf{e} represents interpenetration whereas λ represents integrated impulses. The linear equation holds as long as the displacements are reasonably small. Bouncing and position correction may generate new errors which can be corrected again. Typically, one iteration on velocities and one or two iterations on positions are

enough for a visually correct result. Joints may be modeled as unconditionally active constraints. The algorithm may be summarized as follows

```

repeat
  integrate time
  detect collisions
  model collisions and constraint errors
  repeat
    correct positions
  repeat
    correct velocities and apply bouncing
  correct accelerations
draw

```

4 Soft tissue interactions: 3D cutting with force feedback

In the previous section we have presented some issues concerning simulations with rigid objects. Now, we highlight some contributions in the domain of interactions with soft tissue, such as 3D cutting using force feedback.

4.1 A suitable physical model for deformations and topology changes

We used an explicit formulation of finite element methods [19] to simulate the dynamics of the biological tissue. This model allows topology modifications of the object and it has a strong physical and mathematical foundations. Finite element methods (FEM) partition the object into sub-elements on which the physical equations are expressed. Instead of merging all these equations in a large matrix system, an *explicit* FEM solves each element independently. It uses the balance equation of each element to obtain the force at each node in function of the displacement of neighbor nodes. Then, instead of obtaining the equilibrium position by solving a large matrix system, we only integrate the force at each node to obtain the new position for the node. We use a non-linear Green strain tensor, ϵ , allowing *large displacements*. The Green strain is expressed by a 3 x 3 matrix. Its (i, j) coefficient is:

$$\epsilon_{ij} = \left(\frac{\partial \vec{x}}{\partial u_i} \frac{\partial \vec{x}}{\partial u_j} - \delta_{ij} \right) \quad (8)$$

where the Kronecker delta is $\delta_{ij} = 1$ if $i = j$ or zero otherwise. We assume that our material is isotropic and consider linear elasticity to link stress and strain, as follows:

$$\sigma_{ij}^{(\epsilon)} = \sum_{k=1}^3 \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}. \quad (9)$$

The material's rigidity is determined by the value of μ , and the resistance to changes in volume (dilation) is controlled by λ . The total internal force that a tetrahedron exerts on a node is [19]:

$$\vec{\mathbf{f}}_{[i]}^{el} = -\frac{vol}{2} \sum_{j=1}^4 \vec{\mathbf{p}}_{[j]} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 \beta_{jl} \beta_{lk} \sigma_{kl} \quad (10)$$

where *vol* is the volume of the tetrahedron, \mathbf{p} the position of the nodes of the tetrahedron in the world coordinates and β , the inverse barycentric matrix that links the world positions to the material coordinates. The total internal force acting on the node is obtained by summing the forces exerted by all elements that are attached to the node. Finally, we use a modified-Euler scheme to integrate the dynamics of each node.

4.2 3D volumetric cutting algorithm

Once a collision detection has been detected between the cutting tool and the object, we follow the next steps to carry out cutting phenomena: (1) a geometric criteria, (2) physical criteria, (3) select and separate tetrahedrons, (4) local remeshing and (5) force feedback.

(1) Geometric criteria. We first determine if the user displacements on the surface of the object corresponds to a *cutting attempt* or not. Let $C_p(t)$ be the colliding point at

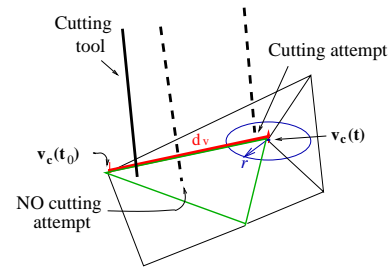


Figure 2: Determining cutting attempts.

time t between the virtual tool and a facet on the surface of the object. Let $v_c(t)$ be the closest vertex to $C_p(t)$ and t_0 the moment of the first contact. Define a neighborhood \mathcal{U} around the vertex $v_c(t)$. We consider a *cut attempt* if:

1. $v_c(t) \neq v_c(t_0)$
2. $C_p(t) \in \mathcal{U}$

The first condition states that the closest vertex to the colliding points at times t and t_0 must be different. The second condition avoids degenerated cuts due to small movements (e.g. a very small displacement of the tool in the middle of the facet may satisfy the first condition). To cut, the user is forced to execute larger displacements by constraining the tool to lie on the neighborhood \mathcal{U} , see figure 2. For simplicity, we have chosen the neighborhood to be a circular region with radius r . The value of r determines the size of \mathcal{U} . Since the facets of a mesh are, in general, of different sizes and forms, the value of r must be computed as a function of the size of the current colliding facet. Thus,

$$r = \alpha d_v \quad (11)$$

where d_v is the distance between $v_c(t)$ and $v_c(t_0)$, see figure 2. This distance changes depending on the colliding

facet. The parameter α determines the size of the neighborhood.

(2) Physical criteria. A cut attempt is not enough to break apart the object. Some physical aspects, that take into account the physical interaction between the object and the cutting tool, have to be considered. To do that, we consider the internal behavior of the object when it is subjected to external loads produced by the tool. According to fracture mechanics, an object may be broken due to two different type of failures: (a) *Tensile failure*: This corresponds to loading *normal* to the failure surface. If the failure is produced by pushing rather than pulling then we can have a *compressive failure*. (b) *Shear failure*: This corresponds to loading *tangential* to the failure surface. We analyze the forces that cause these failures.

First, note that during the contact, the internal forces equilibrate the external load produced by the tool. The internal force distribution can be represented by an equivalent set of resultants, F , and moments, M , see figure 3. From clas-

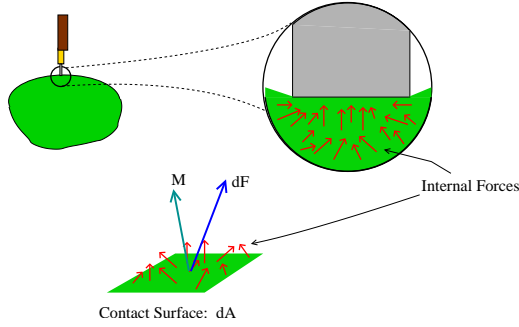


Figure 3: Internal forces during contact between cutting tool and object

sical mechanics, the traction, Tr , provides a measure of the direction and intensity of the loading at a given point and it is defined as:

$$Tr = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF}{dA}. \quad (12)$$

Decomposing the force into normal and tangential components, see figure 3, and introducing a sharpness factor, κ , for the cutting tool, we have a *cutting traction* vector:

$$Tc = \frac{1}{\kappa} \left[\left(\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{|F_n|}{dA} \right) \vec{n}_1 + \left(\lim_{dA \rightarrow 0} \frac{|F_t|}{dA} \right) \vec{n}_2 \right] \quad (13)$$

where n_1 is the normal to the plane and n_2 is the tangent to that same plane, (i.e. a normal in another perpendicular plane). Most of the measurable parameters available in the literature are given using the *fracture toughness*, K_I , of the material which is the critical stress intensity required to produce a failure in a material. Therefore, we put the *cutting traction vector*, T_c , in terms of the stress:

$$T_c = \frac{1}{\kappa} (\sigma \vec{n}_1 + \tau \vec{n}_2). \quad (14)$$

where σ is the *normal stress* and τ the *shear stress*. In the 3D case, T_c takes the following form:

$$\begin{bmatrix} t_{e_x} \\ t_{e_y} \\ t_{e_z} \end{bmatrix} = \frac{1}{\kappa} \begin{bmatrix} \sigma_{e_{xx}} & \tau_{e_{xy}} & \tau_{e_{xz}} \\ \tau_{e_{yx}} & \sigma_{e_{yy}} & \tau_{e_{yz}} \\ \tau_{e_{zx}} & \tau_{e_{zy}} & \sigma_{e_{zz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{e_x} & n_{e_y} & n_{e_z} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

where \vec{n}_i is the normal of each plane of the infinitesimal cube. For simplicity, take Γ as the set of normal and shearing stresses. The object is broken when the maximum stress takes a value greater than the material toughness, K_I . From classical mechanics, the maximum shearing stress is computed using the eigenvalues, σ_1, σ_2 and σ_3 of Γ .

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_2 - \sigma_3|\}. \quad (16)$$

and the maximum normal stress, σ_{max} is the greatest eigenvalue of Γ . Finally, we define our *cutting stress*, σ_c as:

$$\sigma_c = \frac{1}{\zeta} \min(\sigma_{max}, \tau_{max}). \quad (17)$$

where $\zeta \in [0.1 \ 1]$ is a parameter representing the *damage* in the cutting area. Finally, a cut is produced if a *cutting attempt* has occurred and if

$$\sigma_c \geq K_I \quad (18)$$

where K_I is the material toughness of the object.

(3) Select and separate tetrahedrons. To select the tetrahedrons which need to be separated to broken the object we consider a *cutting line* on the surface of the object. This cutting line is given by the set of vertices selected as follows: it starts at $v_0 = v_c(t_0)$, the closest vertex to the previous colliding point at t_0 , it continues to $v_1 = v_c(t)$, the closest vertex to the current colliding point, such that $v_c(t_0) \neq v_c(t)$. The ending vertex, v_2 of the cutting line is the one that best fits the profile of the cut. We consider that the *cut attempt* is executed in the direction, \vec{s}_1 , from $C_p(t_0)$ to $C_p(t)$ and that the cut is as straight as possible. We define \vec{s}_i as the vectors from the possible projected vertices to $C_p(t)$; v_2 will be chosen as the vertex v_i whose vector \vec{s}_i is minimum with respect to \vec{s}_1 :

$$v_2 = v_i \quad \text{such that} \quad \min \{ \angle(\vec{s}_1, \vec{s}_i) \}. \quad (19)$$

Let \vec{s}_1 be the vector from v_0 to v_1 and \vec{n} the normal to the facet as shown in figure 4. Define P as the plane spanned by \vec{n} and \vec{s}_1 . Set T as the set of tetrahedrons, e^T , sharing the vertex v_1 . Then, from e^T , we separate the tetrahedrons, that are in one side of the plane from those that belongs to the other side of the plane, by only splitting v_1 . When a tetrahedron, e^T , is divided by the plane, P , the tetrahedron will lie in the side where its furthest vertex lies.

Separating tetrahedrons may create singularities or zero area joints (e.g. tetrahedrons connected only by one vertex). Our data structure, based in a *abstract simplicial complex* K , let us identify these singularities efficiently.

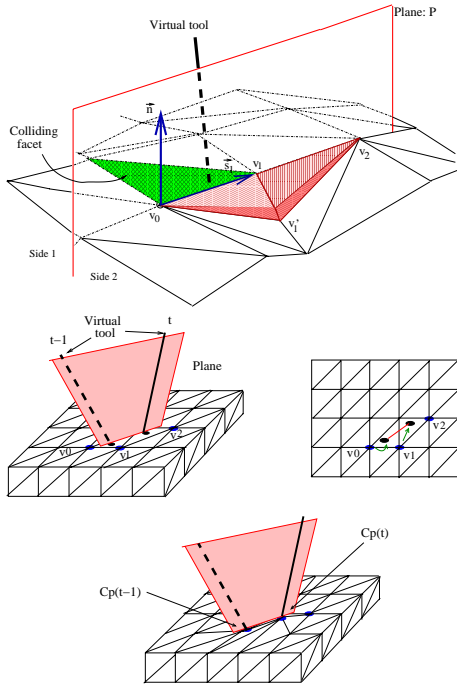


Figure 4: (left) A set of tetrahedra is put in one side of the plane (Side 1) and another set is put in the other (Side 2). The plane is spanned by vectors \vec{s}_1 and \vec{n} . (right) Repositioning the vertices of the tetrahedrons to fit the cut profile

(4) Local remeshing. To reflect the cut, we reposition the vertices of the cutting line by translating v_0 and v_1 to $C_p(t-1)$ and $C_p(t)$ respectively. The vertex v_2 is not moved until the next cutting step, when it will be renamed as v_0 , see figure 4. We update the β matrix and the volume of the involved tetrahedrons to keep the physical validity of the model.

(5) Force Feedback. Haptic interaction was included to increase realism. We solve the different rate frequency problem between the physical (about 20 Hz) and the haptic simulations (about 1 KHz) by separating the haptic and the simulation loop and linking them by a *buffer model*. Thus, instead of interacting with the complete model, we interact with a simplified model that allows to compute forces at the haptic frequencies. This buffer model is constructed using a set of tetrahedrons obtained from the object [20]. The computation of the force is obtained using the explicit finite element model on the buffer model. It is possible to reach the haptic frequency using explicit FEM (computations at about 1 KHz.) since the number of tetrahedrons is very small. Note that, in the haptic loop, we do not execute any integration scheme, since the positions of the tetrahedrons are set up by the update of the deformable buffer model. On the other hand, the haptic position, x_{haptic} , is sent to the physical simulation loop.

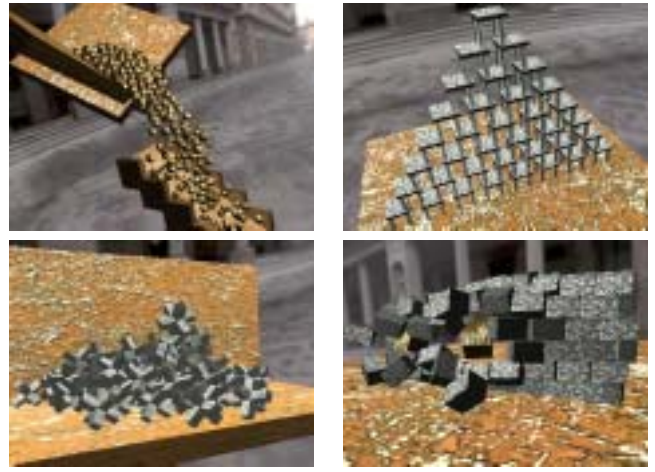


Figure 5: Spheres, stools, jacks, rocks.

	# solids	# contacts/fr	sec/fr
spheres	375	840	0.2
jacks	105	400	0.1
stools	38	141	0.007/0.003
wall	75	190	0.03

Table I: Performances.

5 Results

We have simulated complex scenes with a large number of moving solids, figure 5. Table I summarizes the performance for different scenes. Dynamics computation takes approximately 90 % of the overall computation time. The parameters of our method are the different end loop criteria (precision and number of iterations). The best performance is typically achieved by applying 50% of the computation to position correction, 40% to velocity correction and 10 % to acceleration correction. Crush animations such as *jacks* and *spheres* can be animated using $40ms$ time steps or more, with an overall number of 5 LCP iterations. For *wall* and *stools*, static equilibrium is desired (at the beginning) and a higher number of iterations is required. With 15 iterations at $20ms$, the stools are stable, with 7 iterations they vibrate and with 5 they eventually crush. Compared with recent high quality optimization-based results on similar scenes (*jacks*, *wall*) and taking into account hardware evolution, our method seems to run from 100 to 200 times faster.

In figure 6 we show a physical simulation of an object representing a human knee graft ligament. It is composed of 100 tetrahedrons simulated using explicit finite elements and non-linear Green formalism ($\lambda = 140000$, $\mu = 11000$, $\psi = 10$, $\phi = 80$, sharpness $\kappa = 0.0004$, damage $\zeta = 1$). A PHANToM device is coupled to the simulation to render the sensation of touching and cutting the object. The haptic rendering reaches the 1000 Hz and presents a stable

behavior. The haptic sensation of the cut has been largely

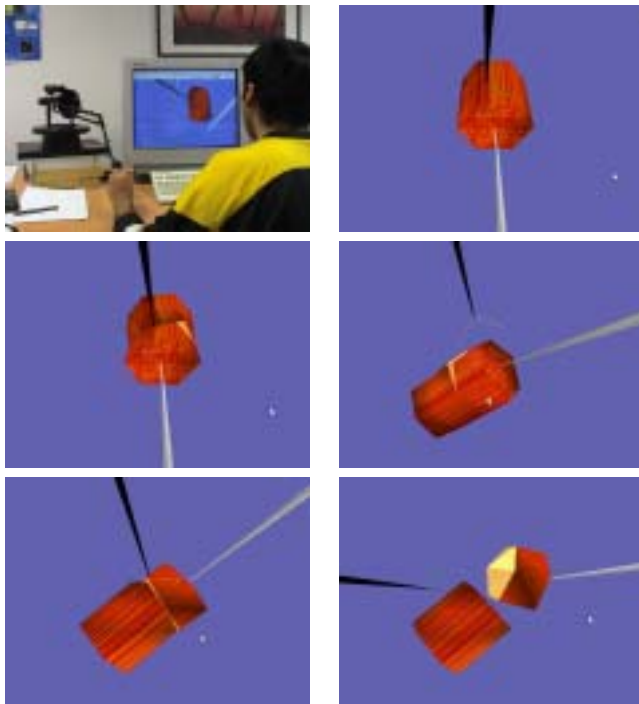


Figure 6: Cutting a human ligament using a force feedback device

influenced by the visual rendering.

6 Conclusion

In this paper we have handled two important issues in the domain of the dynamic simulation and 3D interaction : the trade-off problem between precision and interactivity and 3D cutting of soft tissue including force feedback. For the first, we have proposed a tunable method (Linear Complementary Problem solver) for the resolution of the dynamics and collision response of moving rigid bodies. The method animates several hundreds of bodies in contact at interactive rates. It is especially well-suited for scenes where motion hides small imperfections, such as big crushes. We have also presented a 3D cutting algorithm for soft tissue including force feedback. The algorithm maintains interactivity and preserves the physical realism of the deformable model. The use of a buffer model, constructed from a subset of tetrahedrons of the original model, has allowed force computations at the haptic frequencies.

References

- [1] John Dingliana and Carol O’Sullivan, “Graceful degradation of collision handling in physically based animation,” in *Computer graphics forum (Eurographics’00)*, 2000, vol. 19, pp. 239–247.
- [2] James K. Hahn, “Realistic animation of rigid bodies,” in *Computer Graphics (SIGGRAPH ’88 Proceedings)*, John Dill, Ed., Aug. 1988, vol. 22, pp. 299–308.
- [3] Brian Mirtich and John Canny, “Impulse-based dynamic simulation,” in *Proceedings of 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1994.
- [4] David Baraff, “Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies,” in *Proceedings of SIGGRAPH ’94*, Andrew Glassner, Ed. ACM SIGGRAPH, 1994, pp. 23–34, ACM Press.
- [5] Victor J. Milenkovic and Harald Schmidl, “Optimization-based animation,” in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2001, pp. 37–46, ACM Press.
- [6] S. Cotin, *Modèles anatomiques déformables en temps-réel.*, Thèse de doctorat, INRIA Sophia Antipolis – Université de Nice, Sophia Antipolis, 1997.
- [7] D. Bielser, V. A. Maiwald, and M. H. Gross, “Interactive cuts through 3-dimentional soft tissue,” in *EUROGRAPHICS’99*, 1999, vol. 18, pp. C–31–C38.
- [8] A. B. Mor and T. Kanade, “Modifying soft tissue models : Progressive cutting with minimal new element creation,” in *MICCAI, Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, Pittsburg, U.S.A., Oct. 2000, vol. 1.
- [9] C. Mendoza, C. Laugier, and F. Boux-de Casson, “Virtual reality cutting phenomena using force feedback for surgery simulations,” in *Interactive Medical Image Visualization and Analisis, MICCAI, Holland*, 2001.
- [10] H. Nienhuys and F. Vanderstappen, “Combining finite element deformation with cutting for surgery simulations,” in *EUROGRAPHICS 2000*, 2000.
- [11] Uri Ascher and Linda Petzold, *Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*, SIAM, 1988.
- [12] David Baraff, “Linear-time dynamics using lagrange multipliers,” in *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH ’96)*. ACM SIGGRAPH, 1996, pp. 137–146, Addison Wesley.
- [13] U. M. Ascher, D. K. Pai, and B. Cloutier, “Forward dynamics, elimination methods, and formulation stiffness in robot simulation,” *to appear in International Journal of Robotics Research*, vol. 16, no. 6, Dec. 1997.
- [14] R. Featherstone, *Robot Dynamics Algorithms*, Kluwer, 1987.
- [15] M. Gleicher, *A Differential Approach to Graphical Manipulation*, Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University, 1994.
- [16] Press, Teukolski, Vetterling, and Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1992.
- [17] Paul M. Isaacs and Michael F. Cohen, “Mixed methods for complex kinematic constraints in dynamic figure animation,” *The Visual Computer*, vol. 4, no. 6, pp. 296–305, Dec. 1988.
- [18] R. Fletcher, *Practical methods of optimization; (2nd ed.)*, Wiley-Interscience, 1987.
- [19] James O’Brien and Jessica Hodgins, “Graphical models and animation of brittle fracture,” in *SIGGRAPH Conference Proc.*, 1999.
- [20] C. Mendoza, “Soft tissue interactive simulations for medical application including 3d cutting and force feedback,” *PhD thesis, Institut Politechnique National de Grenoble, INRIA Rhone-Alpes*, May 2003.

Effets de la latence en réalité virtuelle et en téléopération

Jean-Louis VERCHER

UMR CNRS 6152 « Mouvement et Perception », Université de la Méditerranée,
Campus Scientifique de Luminy, 13288 Marseille, cedex 09

vercher@laps.univ-mrs.fr

Résumé

Réalité virtuelle et télé-opération partagent un certain nombre de techniques (mesure du mouvement, transmission et traitement de données, visualisation) et ont en commun d'être confrontés à un problème lié au temps : le délai (ou latence). Ce délai peut occasionner, au mieux, un inconfort chez l'opérateur ou le sujet immergé. Souvent, la performance de celui-ci peut être affectée. Dans le pire de cas, des cinétoses (mal des simulateurs) peuvent apparaître lorsque l'exposition se prolonge. Dans cet article, nous définirons le problème, nous verrons comment en identifier la dimension, avant d'aborder les mesures prises ou à prendre afin d'en limiter l'impact sur l'expérience virtuelle.

1. Introduction et posée du problème

L'objectif principal des applications de réalité virtuelle (RV) est de créer un environnement immersif, réaliste tant d'un point de vue de l'aspect que du comportement et de l'interaction [4]. Les actions de l'opérateur doivent avoir un effet sur l'environnement virtuel, et vice versa, cet environnement peut influencer sur le comportement du sujet. Cependant, ces impératifs sont parfois difficiles à atteindre, en particulier à cause du délai entre l'action du sujet et sa perception des conséquences induites. Le cas extrême est celui du contrôle d'un robot d'exploration planétaire, le décalage temporel pouvant atteindre plusieurs dizaines de minutes ; le contrôle continu n'est alors plus possible. On est dans un autre monde en RV : ce décalage étant infiniment plus court (une fraction de seconde), les conséquences n'en sont pas pour autant négligeables, et en sont plus difficiles à cerner. En effet, l'interactivité continue est la caractéristique essentielle des systèmes de RV. La latence globale est sans doute le facteur limitant le plus la qualité du système de RV. D'autres problèmes d'origine technologique, comme l'imprécision des capteurs de mouvement, ou la définition graphique, ne semblent pas avoir autant d'impact sur la qualité de l'expérience virtuelle. L'effet du décalage temporel entre action et visualisation est encore plus important en réalité augmentée (RA), lorsqu'une scène réelle fournit une référence temporelle et spatiale pour la scène synthétique. Les objets virtuels paraissent alors danser autour, ou traîner derrière, les objets réels.

2. Définitions : délai, retard ou latence ?

Il est clair que le problème traité ici résulte d'un décalage temporel entre les événements du monde réel et ceux du monde virtuel ; Le nom donné au phénomène est, selon les études, délai, latence ou retard. Le terme consacré en Anglais est *lag* (« à la traîne »), qui n'a pas réellement d'équivalent en Français. Le terme de « latence » (temps pendant lequel des processus

s'exécutent, sans manifestation perceptible) sera préféré à celui de « délai », qui a une connotation d'attente, de retard. La vraie latence est celle qui recouvre l'ensemble de la boucle perceptivo-motrice. On définit donc bien la latence globale du système comme le temps s'écoulant entre l'action du sujet dans le monde réel, physique, et la réponse du système à cette entrée dans le monde virtuel. Ceci inclut tous les temps, de celui dû à la vitesse de transmission du signal au temps de réaction du sujet humain. Ce décalage temporel concerne bien entendu toutes les modalités motrices est sensorielles (visuelle, haptique, auditive...).

Dans le cas idéal d'une interaction immersive en temps réel, le sujet ne devrait pas percevoir de décalage temporel entre son action sur le monde virtuel et la réponse sensorielle de celui-ci. En pratique, on constate (nous verrons pourquoi dans le paragraphe suivant) que dans un contexte technologique, réduire la latence à néant n'est pas envisageable, sur la base des options en cours. On veillera cependant à ce que ce délai soit au moins constant, ce qui reste compatible avec l'hypothèse du temps-réel, et si possible à ce qu'il ne dégrade pas trop la performance. Il faut entendre qu'il s'agit de la performance globale de l'application de RV, et en particulier celle du sujet humain immergé et agissant. Il ne s'agit nullement de la performance du système technologique, qui est la cause de la latence, non sa conséquence. Il apparaîtra alors clairement que la dégradation de la performance est dépendante de la tâche, toujours du point de vue humain.

3. Comment mesurer la latence ?

Si les acteurs de la RV connaissent bien l'existence et l'importance du problème de décalage temporel, son origine, sa véritable dimension et ses conséquences sur la performance humaine sont souvent ignorées. On croit encore trop souvent que le problème se réduit à une limitation de la puissance de calcul et de transmission des données. Or, la latence totale définie plus haut est tributaire de processus multiples, tels que la détection et la quantification du mouvement du sujet, la transmission de ces données au calculateur, le calcul associé au modèle d'environnement, et la génération et l'affichage de la scène visuelle, auxquels il ne faut pas oublier d'ajouter le temps de réaction de l'utilisateur lui-même. La concaténation d'une série de processus va créer une latence au moins égale à la somme des retards introduits par chacun des processus. C'est cette latence globale qui aura un impact sur la performance, est c'est elle qu'il faut dans un premier temps mesurer. La méthode la plus simple consiste à filmer en vidéo le mouvement de main du sujet ainsi que la scène graphique créée par le système de RV (Fig. 1). La précision de la méthode est liée à la fréquence de trame vidéo (~50 /s soit 20 ms).

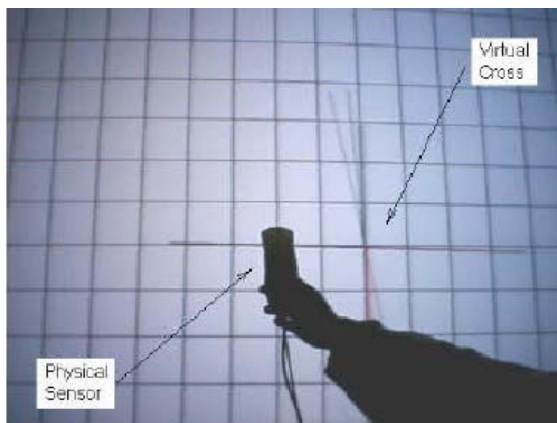


FIG. 1 : mesure de la latence entre le mouvement physique de la main et le déplacement du curseur virtuel. La latence est égale au nombre de trames vidéo entre le début du mouvement de la main et le début du déplacement du curseur [5].

4. La latence est inhérente à la technologie

Pour les raisons évoquées plus haut, on voit bien qu'il est illusoire de tenter de faire complètement disparaître la latence du système. Cependant, la contribution de chacun des processus à la latence globale est variable, ainsi que sa limite basse.

4.1. Latence des capteurs

Acquérir des données sur la position d'un segment corporel du sujet (tête, main, yeux...) requiert un temps variable selon la technologie et le mode de transmission entre le *tracker* et l'ordinateur (ports série, USB, ethernet, signal analogique...). En pratique, selon les appareils, ces fréquences s'échelonnent entre 50 Hz et 500 Hz. 250 Hz (4 ms) correspond à un optimum (sur la base des caractéristiques cinématiques du mouvement naturel), mais 120 Hz est la fréquence la plus couramment observée. Peu de progrès sont attendus dans ce domaine, à moins d'une rupture technologique importante (utilisation de systèmes de vidéo à haute fréquence plutôt que magnétiques ou inertiels), et d'une généralisation des liens à haut débit, permettant de franchir la barrière des 115 Kb du lien série. Une attention particulière doit être apportée au problème posé par l'utilisation d'un certain nombre des capteurs (magnétiques, inertiels, optiques) et de systèmes de retour hétérogènes (visuel, haptique voire somesthésique et vestibulaire, sonore) sur une même plateforme. Chacun de ces dispositifs pouvant générer des délais particuliers (et différent des autres), va se poser le problème de la re-synchronisation des informations, nécessaire afin de maintenir la cohérence et l'unicité de la perception.

4.2. Temps de transmission de l'information

Ce compartiment a subi de grand progrès récemment, essentiellement du fait de l'augmentation de performance des réseaux informatiques, et de la conscience et de la maîtrise qu'ont les acteurs de la RV de ces paramètres. Il existe plusieurs sources de latence dans les systèmes de communication :

- transmission : temps requis pour transmettre un paquet d'information d'un node à l'autre ;
- transfert et bande passante : temps nécessaire pour transmettre une information ;
- routage : liées au fait que le réseau n'est pas seulement composé de liens point-à-point ;
- Contention : latence liée au nombre limité de ressources et à la compétition entre processus ;
- Protocole : latence liée à la segmentation et au ré-assemblage des paquets.

Le temps de lecture des ports et de transmission des données est de plus un paramètre dépendant non seulement de la technologie « hardware », mais également du système d'exploitation en particulier pour la gestion du port série. Celui-ci est cependant une technologie en fin de vie. On commence à voir apparaître des dispositifs utilisant la transmission par ethernet et USB. Ces canaux de transmission devraient se généraliser dans l'avenir, réduisant considérablement le goulet d'étranglement dû aux capteurs de mouvement.

4.3. Latence et temps de traitement

Les latences générées à cette étape sont directement dépendantes de la complexité de la scène et des comportements associés. La simulation constitue la base d'une application immersive. A petite échelle, la simulation est exécutée par la même machine qui génère la scène. La latence est alors uniquement liée à la puissance de calcul de la machine. Pour des environnements plus complexes, on fait appel à un réseau : les actions de l'utilisateur sont mesurées à l'aide d'une machine, les données transmises à une ou plusieurs autres qui exécutent la simulation, les images étant générées par un nouvel ensemble de machines. Le facteur critique n'est plus la puissance des machines, mais les capacités du réseau et l'architecture globale du système. L'avènement de la technologie des grappes de PC devrait significativement accélérer le traitement de la simulation, à condition de maîtriser les problèmes de transmission et de synchronisation entre les machines. Si on y met le prix, les délais introduits par cette étape restent cependant raisonnables par rapports à ceux dus aux capteurs d'entrée et à aux interfaces sensorielles.

4.4. Latence et interfaces de sortie

C'est dans le secteur de l'affichage vidéo que les progrès récents ont été les plus spectaculaires, dopés par l'essor de l'industrie des jeux. Les cartes vidéo les plus courantes aujourd'hui dépassent en rapidité et puissance les stations de travail d'il y a quelques années de plusieurs facteurs d'ordre. Les cartes haut de gamme ont quant à elles des performances exceptionnelles (en termes de nombre de polygones 3D par seconde, de rendu de texture et de fréquence d'image). Ces performances sont cependant encore tributaires des volumes de données à traiter, en constante augmentation. La complexité de la scène, la qualité de l'image (textures 3D, rendu des éclairages nocturnes) restent cependant autant de facteurs limitants. Dans le cas d'un système multi-images, il est nécessaire de synchroniser toutes les images afin d'éviter la perception de décalages spatiaux.

Enfin, l'écran reste un facteur limitant, la fréquence verticale étant couramment de 85 Hz, voire 100 à 120 Hz dans le meilleurs des cas, quand on y met le prix. Cette fréquence d'image est réduite de moitié si on utilise un affichage stéréographique actif (par demi-images entrelacées). De ce fait, si on n'y prend garde, on peut aisément voir ruinés des efforts coûteux visant à réduire la latence par augmentation de la puissance de calcul. Il est raisonnable de privilégier une stéréographie passive (par double projection), qui bien que plus onéreuse (il faut deux fois plus de vidéo-projecteurs), permet de maintenir la fréquence d'image.

On soulignera que la modalité visuelle, bien que dominante, n'est pas la seule utilisée en RV. Le toucher et la proprioception (modalité haptique), l'audition (modalité auditive, verbale, son spatialisé) sont aussi affectés par la latence, qui est parfois très importante pour ces modalités, et est en tout cas moins bien maîtrisée que pour l'affichage vidéo. Il est également important de tenir compte du fait que les informations multimodales doivent parvenir en même temps à l'utilisateur : tout décalage entre les modalités peut détruire la cohérence de la perception. La fig. 2 synthétise les points évoqués dans ce paragraphe. On peut clairement identifier trois étapes principales dans la boucle « virtuelle » :

1. De la tête du sujet vers le ordinateur : détection, mesure et transmission de la position et de l'orientation du regard dans l'espace ;
2. Dans le ordinateur : simulation du monde virtuel ;
3. Du ordinateur vers l'œil de l'utilisateur : génération et affichage des images.

Chacune des ces étapes crée de la latence, et devra donc être optimisée en conséquence. On voit clairement que le facteur limitant la réduction du retard est lié au processus le plus lent (ou le moins fréquent) de la boucle totale. La parallélisation du traitement de l'information et de la simulation améliore considérablement la performance temporelle des système, mais fait buter sur le goulet d'étranglement que constituent les capteurs de mouvement et l'affichage vidéo.

Effet de la latence sur la boucle sensorimotrice

La plupart de nos actions sont exécutées sur la base de rétroactions (feedback), et ce, tant d'un point de vue sensorimoteur que cognitif. Seules les saccades oculaires, du fait de leur rapidité et de leur précision, échappent à cette logique. Du point de vue de l'Automatique et de la théorie de systèmes, tout retard introduit dans une boucle de rétroaction a des conséquences sur la performance du système rétro-contrôlé, conséquences pouvant aller jusqu'à une oscillation à la fréquence propre du système. Les systèmes biologiques n'échappent pas à cette règle (et ce même au niveau biochimique, a fortiori au niveau du comportement intégré). La solution classique consiste en un sur-amortissement du système, et donc un abaissement de ses dynamiques. Au niveau cinématique, cela se traduit par un ralentissement de la réponse [3]. Le système nerveux étant doté de capacités adaptatives, c'est cette même solution qu'il adopte généralement : l'entraînement à l'exposition à un système de RV doté d'une latence importante conduit à un ralentissement de nos mouvements (de tête, de la main...) et donc à une modification importante de notre comportement naturel [10]. Le pré-requis selon lequel, pour être immergé, un utilisateur doit avoir un comportement proche de celui qu'il aurait dans le monde réel pour une tâche similaire, est affecté. Classiquement, dans une application de RV, deux types de mouvements jouent un rôle primordial : l'utilisateur doit pouvoir saisir et manipuler des objets virtuels avec sa main, et bénéficier d'un retour visuel et/ou haptique de qualité, et synchrone de son activité. Par ailleurs, afin de maintenir la cohérence de l'environnement, celui-ci doit rester stable lorsque le sujet bouge la tête, qu'il le fasse afin de changer de point de vue, ou pour générer des indices de profondeur par parallaxe de mouvement. La scène synthétique doit alors être mise à jour le plus rapidement possible. Considérons les conséquences d'un délai introduit dans les boucles de rétro-action de la main et de la tête

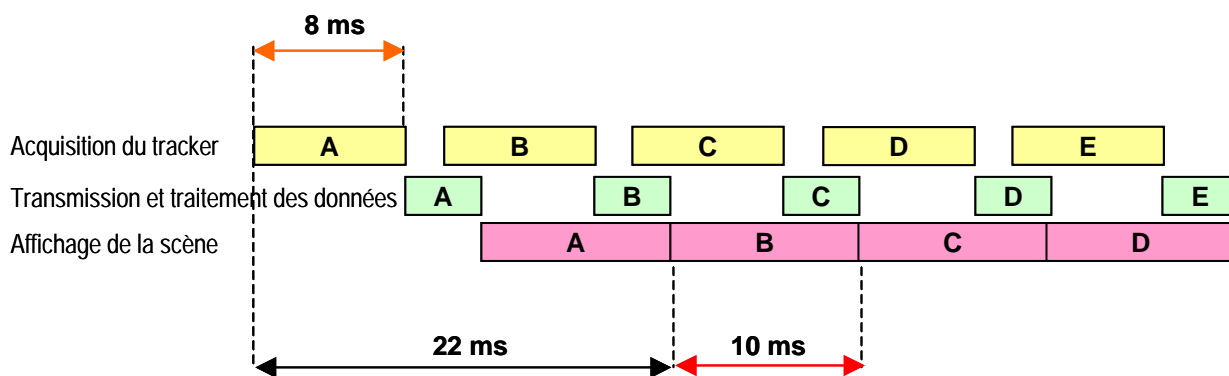


FIG 2 : exemple de charte temporelle de boucle de visualisation, mise à jour à l'aide d'un tracker de mouvement. On fait l'hypothèse d'une durée d'acquisition de 8 ms (~120 Hz), d'un temps de transmission et de traitement de 4 ms (250 Hz) et d'un temps de calcul et d'affichage de la scène de 10 ms (100 Hz). La cadence est déterminée par le processus le plus lent (dans l'exemple donné, l'affichage), si on ne veut ni perdre des données, ni accumuler du retard. Le temps total de cycle (la latence) est la somme des durées de tous les processus en série. Le calcul est plus complexe dans le cas d'une parallélisation partielle du traitement et de la simulation.

Les conséquences de délais dans le feedback visuel de la main sur la performance motrice ont été largement étudiées, d'abord dans le champ de l'ergonomie et des facteurs humains (dans un contexte de télé-opération) puis dans le champ d'étude du mouvement humain. De nombreuses études empiriques et théoriques ont utilisé un délai ajouté dans la boucle comme un moyen de déterminer la signature dynamique du contrôleur nerveux et de l'effecteur neuro-musculaire. Il a été ainsi montré que la fréquence propre du bras est de 3 Hz [8]. La manipulation du délai de rétroaction, dans une tâche de poursuite oculaire de la main, révèle l'existence d'un mécanisme prédictif. Le système nerveux étant lui-même soumis à des délais, importants dans le cas de la boucle visuo-motrice [11], la nature a développé des processus permettant de prédire les conséquences de nos actions [1] et donc d'anticiper le retour sensoriel. Dans le cas de la poursuite oculaire de la main, ces mécanismes prédictifs permettent de compenser la latence, avec une limite de 200-250 ms : tout délai supérieur à cette valeur dégrade la performance [14].

En ce qui concerne la tête, la situation est plus critique. En effet, tout mouvement de tête produit une réponse oculomotrice compensatoire : l'œil tourne dans l'orbite d'une quantité équivalente au mouvement de tête, et en direction opposée, afin de maintenir l'orientation du regard. Ce mécanisme, appelé réflexe vestibulo-oculaire, prend sa source dans la stimulation des canaux semi-circulaires de l'appareil vestibulaire (notre propre centrale inertielle embarquée) et par l'activité de seulement trois séries de neurones, active directement les muscles oculaires, et ce en moins de 15 ms [13]. Ce décalage temporel entre mouvement de tête et glissement concomitant de la scène visuelle est une source potentielle, sinon avérée, d'instabilité visuelle lors du mouvement de tête, et de vection (sensation illusoire de mouvement propre), dès lors que la latence de mise à jour dépasse la latence vestibulaire (15 ms). Le mouvement de tête semble donc plus sensible à la latence que le mouvement de la main. Il est par ailleurs évoqué dans la littérature que la latence de mise à jour de la scène visuelle pourrait être, au moins en partie, responsable de la *simulator sickness*, ou mal des simulateurs [12]. Une des adaptations aux simulateurs consiste soit à ralentir les mouvements de tête, soit à tenter de les prévenir le plus possible.

6. Latence et immersion : une cause de désorientation spatiale et de *simulator sickness* ?

Il est plus que probable que l'état d'immersion supposé atteint par le sujet dans un système de RV est en partie basé sur la perception d'un environnement stable. Lorsque nous nous déplaçons dans le monde, l'image de celui-ci se déplace sur la rétine, parfois d'une façon extrêmement complexe. Sauf cas pathologique, (oscillopsie), le monde nous paraît stable, sans doute parce que nous intégrons nos propres mouvements dans la perception du monde. Or, la latence entre le mouvement de la tête du sujet et la mise à jour consécutive de l'image va créer des instabilités de la position spatiale des objets de la scène, en particulier

avec un afficheur HMD. L'instabilité est due au fait que, dans le monde réel, lors d'un mouvement de tête, la position et l'orientation des objets par rapport à la rétine change instantanément et de façon corrélée au mouvement du regard, ce qui n'est pas le cas s'il existe un délai entre mouvement de tête et mise à jour graphique. Cette instabilité est liée à la parallaxe de mouvement, un des indices visuels utilisés pour détecter la distance entre les objets et l'observateur. L'efficacité de cet indice s'appuie sur la connaissance implicite des lois de la perspective (Fig. 3).

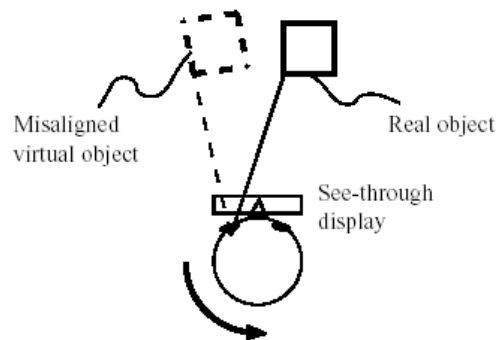


FIG. 3 : un objet virtuel est superposé à un objet réel. Quand l'utilisateur tourne la tête à gauche, la position de l'objet réel apparaît stationnaire alors que l'objet virtuel est encore affiché pendant un certain temps à la même position par rapport à la tête, et semble donc tourner avec celle-ci. Ensuite, il semble se déplacer vers la droite, selon une cinématique comparable à celle du mouvement de tête [9].

L'hypothèse de cohérence et de stabilité du monde peut être aisément testée. La capacité à détecter et discriminer des indices de profondeur sur la base de la parallaxe de mouvement n'est pas affectée par un délai entre le mouvement de la tête et la mise à jour de l'affichage, si ce délai reste inférieur à 265 ms, pour une scène visuelle constituée de points aléatoirement répartis [16]. Par contre, si la tâche est de déterminer la distance d'un objet virtuel mais réaliste (en l'occurrence une pyramide), la performance se dégrade en fonction linéaire du délai [7], et ce même pour le délai minimum (celui directement inhérent à la technologie, soit 31 ms dans l'étude en question). Cette instabilité perceptive liée à la latence est-elle responsable de ces sensations nauséuses, proches du mal des transports (« *motion sickness* »), rencontrées dans les simulateurs de vols (60-70 % des pilotes en souffrent) mais surtout dans les systèmes immersifs (90-95% des utilisateurs.[12]), et également appelées « mal des simulateurs » (« *simulator sickness* » ou « *cybersickness* ») ? Ces effets nauséogènes sont d'autant plus inconfortables qu'ils semblent persister un certain temps, parfois des heures, après la fin de l'exposition. Le lien causal entre latence et *cybersickness* n'a jamais été clairement établi. Cependant, il a été proposé que la cause du malaise serait l'écart entre la prédiction faite par le cerveau sur l'état du monde (en particulier l'orientation et la position du corps et des objets) et l'observation de cet état via le système virtuel.

7. Comment réduire les conséquences de la latence ?

Minimiser toujours plus les temps de calcul, réduire le nombre d'étapes, paralléliser le traitement. Ces pistes technologiques sont identifiées, explorées et maîtrisées par les acteurs de la RV. Les goulets d'étranglement sont identifiés, et restent les extrémités de la boucle autour de l'homme : la capture du mouvement (en moyenne 120 Hz soit 8 ms avec des capteurs magnétiques et/ou inertiels), et l'affichage (au mieux 100 Hz soit 10 ms). Assez curieusement, c'est bien sur ces goulets que le moins d'effort est mis, les acteurs misant sur le gain procuré par l'augmentation de puissance des machines. Il est plus que probable que la technologie permettra de réduire encore les temps de calculs. Cependant, on constate généralement que l'augmentation de puissance de l'ordinateur est toujours accompagnée d'une complexification des tâches qui lui sont demandées, ce qui annule partiellement le gain temporel. Une piste qui reste à explorer consiste à s'intéresser à l'utilisateur lui-même, comme élément constitutif de la boucle, et donc à déterminer ce que sont les conséquences de la latence sur sa performance. Au moins trois pistes sont envisageables :

7.1. Déterminer les valeurs critiques de la latence

Si les valeurs limites (seuil de perception, seuil de tolérance, etc) sont encore à déterminer de façon précise (la fig. 4 ne fait que représenter les ordres de grandeur), il est clair que ces paramètres doivent être considérés comme dépendants de la tâche et donc des actions nécessaires à l'exécution de celle-ci. Il est plus que probable que, pour une application et une tâche données, ces seuils dépendent également du sujet, de son niveau d'expertise dans la tâche et dans l'exposition à des systèmes de RV, et de façon plus générale de son état psychologique. Des méthodes extrêmement rigoureuses de Psychophysique doivent être appliquées à ces déterminations.

7.2. Habituer l'Homme aux délais

Toute latence dans le retour visuel du mouvement de la main affecte la précision de celui-ci [14], et le comportement courant d'un individu placé dans de

telles conditions, constamment à la recherche d'une stratégie pour optimiser et maintenir sa performance, est de ralentir son mouvement afin de minimiser l'effet relatif de la latence. Il existe d'ailleurs un indicateur, la loi de Fitts [2], validé et couramment utilisé en Sciences du mouvement humain, pour quantifier la fonction d'échange entre vitesse et précision du mouvement. Celle loi lie de façon logarithmique le temps de mouvement à un indice de difficulté, et est affectée par la latence.

S'il n'est pas possible de réduire la latence à zéro, peut-on en limiter les conséquences, par exemple en entraînant des sujets à l'exposition au système de RV ? Une certaine forme d'adaptation semble possible, au niveau sensorimoteur : alors que la plupart des utilisateurs novices ont des mouvements saccadés, cycliques, non-coordonnés, l'exposition répétée et l'entraînement conduisent à une « fluidification » des mouvements. Cette adaptation, ou habitude, a clairement été montrée [6]. Bien que Stanney et coll. [12] attribuent, au moins pour partie, cette incoordination initiale à une décalibration perceptivo-motrice comparable à celle rencontrée classiquement avec des prismes déviant latéralement la vision de la main, il est plus que probable qu'elle est également fortement liée à la décorrélation temporelle. L'exposition conduit également à une réduction des nausées, évaluées par questionnaire [10]. Il ne faut donc pas exclure un changement de comportement de l'utilisateur face au questionnaire utilisé pour jauger l'état de *cybersickness*. Il est alors nécessaire d'inclure des critères objectifs, physiologiques. Il existe donc au moins trois niveaux d'habitude sont possibles :

- Adaptation comportementale (les utilisateurs réduisent la fréquence et l'amplitude de leurs mouvements de tête)
- Pratique (les sujets améliorent leur performance dans la tâche, et deviennent moins dépendant de l'information visuelle)
- Adaptation sensorimotrice ou physiologique (la pratique tend à réduire la sensibilité au conflit sensoriel, et/ou à re-cartographier les relations perceptivo-motrices)

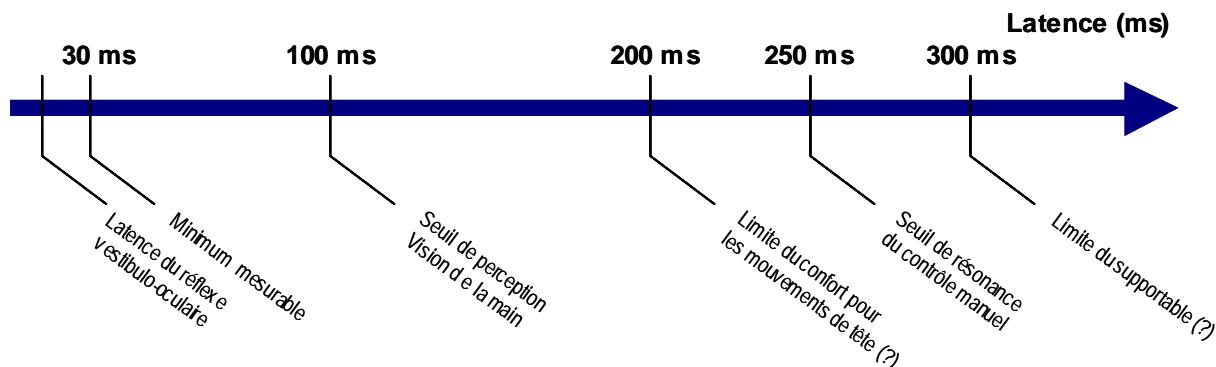


FIG. 4 : Récapitulation des principales valeurs de latence proposées dans la littérature comme seuils perceptifs ou limites de performance. Aucune valeur n'est proposée pour le seuil perceptif lié aux mouvements de la tête. Il n'est pas impossible que cette limite soit inférieure au délai minimum possible (actuellement 30 ms dans la plupart des études).

7.3. Prédire le mouvement pour anticiper

Même dans le monde réel, le système nerveux doit s'affranchir des délais de transmission et de traitement nerveux (liés pour partie à la faible vitesse de transmission de l'influx nerveux). Il a été proposé que le système nerveux avait développé des modèles internes permettant de prédire les conséquences de nos actions [1] ou de l'action de l'environnement sur notre corps. Ce mécanisme est aussi capable d'apprendre et de s'adapter. L'habitation au délai peut donc être le résultat de mécanismes prédictifs, existant au niveau du contrôle moteur en condition normale (afin de limiter les effets de la « lenteur » du feedback visuel). Par exemple, Vercher & Gauthier [14] ont montré l'existence de ces mécanismes de compensation du délai dans des tâches de poursuite oculo-manuelle, et Foulkes & Miall [3] ont démontré que ces mécanismes permettent d'apprendre à compenser un délai particulier. Une piste actuellement explorée pour réduire les délais dans les systèmes de RV consiste à tenter de prédire la cinématique du mouvement de l'opérateur, et ainsi gagner au moins un temps de cycle au niveau de la capture de ce mouvement. L'utilisation de filtres de Kalman ou d'une simple extrapolation linéaire de la cinématique passée permettent par exemple d'améliorer la performance et de diminuer la gêne occasionnée par la latence [15]. La méthode de Kalman est plus efficace que l'extrapolation, mais peut introduire des oscillations (jitter) dans le signal de position prédit. Des méthodes plus sophistiquées font appel à des algorithmes adaptatifs (capables d'apprendre à compenser un délai particulier) et sont implémentés sur des structures à base de réseaux de neurones. Cependant, ces prédictions ne sont efficaces que lors d'un mouvement en cours, elle ne peuvent en aucun cas prédire le temps du début du mouvement. Un gain temporel appréciable pourrait alors être apporté en détectant non pas la position de la tête, mais son accélération [17].

8. Conclusions

La réalité virtuelle touche à un secteur relativement nouveau et particulièrement excitant de l'interaction entre l'Homme et l'ordinateur. Son utilisation pleine et entière dépend de façon critique du temps de latence du système, temps qui doit être le plus court possible. Bien que la plupart des acteurs de la RV soient conscients de ce fait (on retrouve souvent dans la littérature des affirmations du style « réduire la latence est un des défis les plus importants rencontrés en RV... »), il ne semble pas que les valeurs de cette latence soient correctement perçues : il n'est pas rare de voir des études trouver « acceptables » voire « satisfaisantes » des latences de l'ordre de 100 ms, alors que d'autres études estiment qu'une latence de 50 à 100 ms est « inacceptable », sans qu'il soit précisé sur quels critères se basent ces affirmations. Les conclusions que nous pouvons tirer de cette analyse sont les suivantes :

1. La latence doit être comprise comme le temps entre l'occurrence d'un événement dans le monde réel, typiquement lié à l'activité d'un utilisateur, et la réponse du système à cet événement, perçue par

l'utilisateur, qui ferme la boucle. La plupart des utilisateurs ont des difficultés à manipuler des objets en RV, dès que la latence dépasse 200 à 300 ms. Ces valeurs sont comparables à celles déterminées par des études en contrôle moteur et considérées comme les limites acceptables pour le contrôle continu visuel du mouvement manuel.

2. La latence liée à la communication entre les processus n'est qu'une des composantes de la latence globale, et elle est loin d'être la plus irréductible, sauf en télé-présence. Toute solution effective de traitement de la latence doit attaquer simultanément toutes les composantes, à tous les niveaux du système.
3. On peut d'ores et déjà dire qu'il est illusoire de réduire à néant le délai. On se contentera d'une latence constante, identique pour tous les retours sensoriels, et inférieure à un seuil critique. On est alors en droit de se demander quelle est cette limite: existe-il un seuil perceptif en deçà duquel le sujet n'est plus conscient, ou n'est plus affecté par le délai ? peut-on se limiter à un seuil de « confort » en deçà duquel la performance sensorimotrice reste stable ? Il est difficile de trancher, mais il est plus que probable que le seuil perceptif est le paramètre pertinent pour maîtriser la sensation d'immersion et de cohérence du monde virtuel.
4. Le problème posé par la réduction de la latence entre le mouvement de tête et le changement d'orientation de la scène virtuelle affichée est crucial. Une approche radicalement nouvelle du problème, orientée au moins autant vers l'opérateur humain, ses caractéristiques cognitives et sensorimotrices, son comportement, que vers le progrès technologique, est nécessaire pour trouver une solution au problème. Il faudra à la fois mieux comprendre l'effet du retard sur le comportement humain, et être capable de prédire ce comportement afin d'anticiper l'action du sujet sur le système. Une telle approche est actuellement développée dans la conception de l'IHM en aéronautique militaire, où le pilote reste le facteur limitant temporel le plus important.

9. Références bibliographiques

- [1] Berthoz, A. (1997) *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [2] Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- [3] Foulkes, A.J.M. & Miall, R.C. (2000) Adaptation to visual feedback delays in a human manual tracking task. *Exp. Brain Res.*, 131: 101-110.
- [4] Fuchs, P., Moreau, G. & Papin, J.P. (2001) *Le traité de la Réalité Virtuelle* ; Presses de l'Ecole des Mines de Paris, Paris.

- [5] He, D., Liu, F., Pape, D., Dawe, G. & Sandin, D. (2000) Video-based measurement of system latency. IPT2000, Ames IA, june 19-20.
- [6] Hill, K.J. & Howarth, P.A. (2000) Habituation to the side effects of immersion in a virtual environment. *Displays*, 21: 25-30.
- [7] McCandless, J.W., Ellis, S.R. & Adelstein, B.D. (2000) Localization of a time-delayed, monocular virtual object, superimposed on a real environment. *Presence*, 9, 1: 15-24.
- [8] Miall, R.C. (1996) Task-dependent changes in visual feedback control: a frequency analysis of human manual tracking. *J. Motor Behav.*, 28, 2: 125-135.
- [9] Pasmán, W., van der Shaff, A., Lagendijk, R.L. & Jansen, F.W. (1999) Low latency rendering for mobile augmented reality. *Computers & Graphics*, 23, 6: 875-881.
- [10] Regan, E.C. (1995) Some evidence of adaptation to immersion in virtual reality. *Displays*, 16: 135-139.
- [11] Stanney, K.M., Kennedy, R.S., Drexler, J.M. & Harm, D.L. (1999) Motion Sickness and proprioceptive aftereffects following virtual environment exposure. *Applied Ergonomics*, 30: 27-38.
- [12] Vercher, J.L. & Gauthier, G.M. (1990) Eye-head movement coordination: vestibule-ocular reflex suppression with head-fixed target fixation. *J. Vest. Res.*, 1, 2: 161-170.
- [13] Vercher, J.L. & Gauthier, G.M. (1992) Oculo-manual coordination control: ocular and manual tracking of visual targets with delayed visual feedback of the hand motion. *Exp. Brain Res.*, 90, 3: 599-609.
- [14] Wu, J.R. & Ouhyoung, M. On latency compensation and its effects on head-motion trajectories in virtual environments. *The Visual Computer*, 16: 79-90.
- [15] Yuan, H., Sachtler, W.L., Durlach, N. & Shinn-Cunningham, B. (2002) Effects of time delay on depth perception via head-motion parallax in virtual environment systems. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9, 6: 638-647.
- [16] Zaoui, M., Wormell, D., Altshuler, Y., Foxlin, E. & McIntyre, J. (2001) A 6 D.O.F. opto-inertial tracker for virtual reality experiments in microgravity. *Acta Astronautica*, 49, 3-10: 451-462.

Interfaces Haptiques et Pseudo-Haptiques

A. Lécuyer

IRISA

anatole.lecuyer@irisa.fr

C. Andriot

CEA LIST

claudc.andriot@cea.fr

A. Crosnier

LIRMM

crosnier@lirimm.fr

Résumé

Cet article présente les possibilités technologiques et les applications du retour haptique (i.e. retour tactile ou retour d'effort) en réalité virtuelle.

Il commence par décrire des interfaces dites « actives » pour lesquelles les stimulations physiques envoyées à l'utilisateur sont modifiables en temps réels. Puis il décrit des interfaces qualifiées d'« alternatives » utilisant des artifices technologiques ou psychologiques. Par exemple, le retour pseudo-haptique combine l'action de l'utilisateur sur des interfaces d'entrée passives et des effets visuels pour simuler des sensations haptiques, à la limite de l'illusion sensorielle.

Dans un deuxième temps, cet article dessine les applications actuelles et futures de ces techniques. Il insiste d'abord sur le prototypage virtuel industriel – qui utilise aujourd'hui des solutions haptiques actives. Il décrit ensuite une application d'assistance au geste basée sur une solution alternative.

Mots-Clés

Haptique, Pseudo-Haptique, Réalité Virtuelle, IHM, Prototypage Virtuel, Assistance au Geste, Sculpture.

1 Introduction

Aujourd'hui, dans le domaine de la réalité virtuelle, l'appellation haptique distingue classiquement deux catégories de retour d'information sensorielle : le retour « tactile » qui stimule des excitations de la peau et englobe des modalités très variées comme la température, la texture ou le contact et le retour « d'effort » qui désigne l'exercice de forces sur les membres du corps et qui contraint les mouvements.

De nombreuses « interfaces haptiques » sont ou ont été développées pour explorer les manières de restituer ces informations à l'utilisateur d'un système de réalité virtuelle [5]. Ces interfaces commencent à pénétrer le marché du grand public puisque nous trouvons maintenant des volants, des manettes ou des manches à retour d'effort qui accompagnent les jeux vidéos, ou encore des souris vibrantes pour le commerce électronique et la navigation sur internet.

Une autre manière de restituer des sensations haptiques à l'utilisateur d'un système de réalité virtuelle consiste à jouer sur les illusions sensorielles. En effet, de la même manière qu'il existe des illusions visuelles ou illusions

d'optique, on a pu mettre en évidence des illusions « haptiques ». Des pistes récentes de recherche - comme le retour pseudo-haptique [13] - explorent cette voie pour proposer des solutions alternatives aux interfaces haptiques « classiques » que nous qualifierons d'« actives ».

Dans cet article nous proposons de faire un tour d'horizon des différents pistes actuellement proposées pour simuler des sensation haptiques : les approches actives et les approches alternatives telles que le retour pseudo-haptique.

Ensuite, nous souhaitons montrer à travers deux exemples d'utilisation de ces technologies que des applications concrètes sont aujourd'hui envisageables pour ces deux voies. Nous présentons deux applications : le prototypage virtuel industriel et l'assistance au geste.

2 Retour haptique

Dans cette partie nous décrivons de manière très générale les différentes pistes de restitution des sensations haptiques.

Nous détaillons d'abord les grandes familles d'interfaces haptiques dites actives – c'est-à-dire qui renvoient des stimuli modifiés en temps réel par un système instrumenté et/ou informatisé. Ce sont à ce jour les solutions les plus répandues et les plus étudiées. Puis nous décrivons différents types de solution alternative à ces technologies (qui peuvent dans certains cas s'avérer complexes ou coûteuses). Nous insistons en particulier sur : la substitution sensorielle, les « props » et le retour pseudo-haptique.

2.1 Interfaces à retour d'effort « actif »

2.1.1 Schéma de principe

Un système à retour d'effort est généralement composé des éléments suivants :

- Un bras manipulateur commandé en effort et son contrôleur temps réel.
- Un logiciel de simulation physique temps réel qui intègre des algorithmes de détection de collision et de simulation des équations de la dynamique.
- Un logiciel qui assure la communication entre le contrôleur de l'interface haptique et le simulateur physique temps réel. Du point de vue de l'automatique ce logiciel gère aussi le couplage entre ces deux systèmes dynamiques.
- Un système de visualisation qui affiche la position des objets calculés par le simulateur physique temps réel.

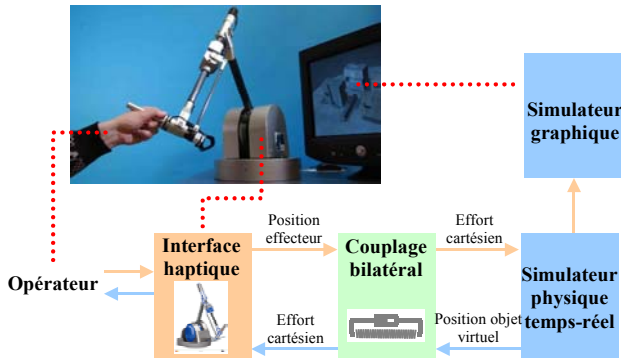


FIG. 1 - Schéma de principe d'un système à retour d'effort

2.1.2 Classification des interfaces haptiques

Les interfaces haptiques permettent de transmettre des efforts à un opérateur. La loi d'action et de réaction impose que toute partie de l'interface en contact avec l'opérateur soit aussi en contact ailleurs (fermeture de la chaîne des efforts). Il y a deux solutions théoriquement possibles : soit la chaîne d'efforts se referme sur l'opérateur et l'interface est portable, on parle alors de retour d'efforts à réaction interne ; soit la chaîne d'efforts se referme sur un socle fixe, on parle alors de retour d'efforts à réaction externe et l'interface est fixe.

On peut ensuite les classer suivant leur structure mécanique : [1] [5] [7]. Mais il existe dans la littérature d'autres types de classement :

- [9] proposent une classification où la répartition des interfaces se fait suivant le nombre de degrés de liberté qu'elles possèdent. Trois groupes sont proposés : 2 à 3 ddl contrôlés ; 3 à 6 ddl contrôlés ; > 6 ddl contrôlés.
- [3] rappellent la classification de [9] et proposent une nouvelle classification des interfaces haptiques en fonction de la nature du contact entre l'opérateur et l'interface. Ils considèrent 5 grandes catégories :
 - 1) Interfaces de type "Joystick" (manche à retour d'effort).
 - 2) Interfaces à un seul point de contact.
 - 3) Interfaces pour la réplique de tâches.
 - 4) Interfaces à plusieurs points de contact.
 - 5) Interfaces portables.

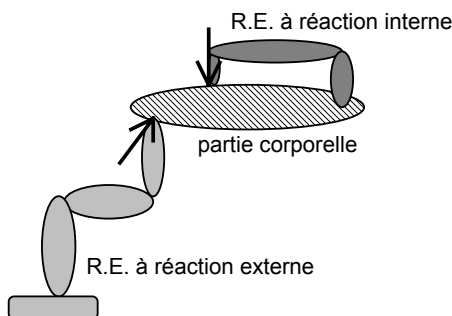


FIG. 2 - Les deux architectures d'une interface à retour d'effort [1]

2.2 Solutions alternatives

2.2.1 Substitution sensorielle

La substitution sensorielle est définie par Bach-y-rita et al. [2] comme : « l'acheminement au cerveau d'une information appartenant habituellement à un certain domaine sensoriel par le biais de récepteurs, canaux et projections cérébrales, zones d'interprétation ou d'intégration appartenant à un autre système sensoriel ». Le langage des signes des sourds et le braille des aveugles représentent ainsi deux exemples classiques de substitution sensorielle.

Un premier exemple célèbre de substitution sensorielle de retour haptique a été proposé par Bach-y-rita et al. [2]. Ils ont substitué les informations de forces de saisie d'un outil en utilisant des retours électro-tactiles stimulant la peau des doigts. Ce dispositif équipe les gants des astronautes américains. Il facilite la manipulation d'outils en reproduisant les forces que les gants absorbaient en raison de leur rigidité et de leur épaisseur.

Dans le domaine de la réalité virtuelle, des substitutions sensorielles ont souvent été développées et utilisées pour représenter des informations haptiques. C'est notamment le cas de la représentation de la force de réaction aux collisions dans le monde virtuel par un vecteur graphique [4] ou par un retour sonore [19].

2.2.2 Les « props »

Une deuxième approche de restitution alternative d'un retour haptique en réalité virtuelle est celle du retour haptique passif. Le retour haptique passif fait appel aux « props » (terme anglais signifiant *accessoire* en français). Ces props ne renvoient pas de forces « calculées » vers l'utilisateur. Ils sont utilisés comme support informationnel et prennent la forme de l'outil ou de l'objet manipulé.

Cette approche a été adoptée par Hinckley et al. [10] dans un célèbre outil de visualisation de données médicales 3D obtenues avec un scanner. Dans le paradigme proposé, un premier prop en forme de tête de poupée est manipulé avec la main non dominante. Ce prop symbolise le cerveau virtuel du patient dont on souhaite visualiser certaines coupes 2D. Le positionnement du plan de coupe se fait en manipulant un second prop avec la main dominante. Ce deuxième prop est une plaque en plastique rectangulaire qui symbolise directement le plan de coupe.

2.2.3 Le retour pseudo-haptique

Le retour pseudo-haptique peut être compris comme la génération de sensations haptiques par l'utilisation et la combinaison de retours sensoriels provenant d'autres canaux que celui du toucher.

Le retour pseudo-haptique tel que nous l'avons étudié [13] repose sur un couplage visuo-haptique. Il se présente comme une possibilité de retourner des informations haptiques en combinant l'action de l'utilisateur dans la simulation avec le retour visuel de la scène. Le retour visuel est utilisé comme un retour «perturbateur» qui va induire des sensations haptiques, à la limite de l'illusion sensorielle.

Nous allons illustrer cette approche en prenant l'exemple de l'utilisation d'une interface isométrique telle que la Spaceball¹ (voir Figure 3). La Spaceball possède des caractéristiques haptiques évidentes : une raideur très élevée et une butée mécanique, qui contraignent fortement les mouvements de l'opérateur. Il s'agit alors d'utiliser ces propriétés haptiques et de les combiner avec des « effets » visuels appropriés. La difficulté de cette combinaison réside dans le choix du retour visuel à mettre en relation avec les caractéristiques de l'interface.

Prenons l'exemple de la simulation du frottement dans un environnement virtuel. Pour cela, considérons la manipulation d'un objet (un cube) dans un environnement virtuel. Supposons que l'utilisateur déplace ce cube avec la Spaceball. Les déplacements du cube dans l'environnement graphique sont commandés par la force de pression de l'utilisateur sur la Spaceball. Lorsque le cube pénètre à l'intérieur d'un conduit, nous faisons diminuer fortement la vitesse de déplacement visuelle du cube. Ceci va obliger l'opérateur à appuyer plus fortement sur l'interface pour faire avancer le cube. Nous supposons alors qu'au moment de l'entrée du cube dans le conduit, le couplage entre le ralentissement visuel du cube et l'augmentation de la force à appliquer sur l'interface pour le faire avancer va signifier à l'utilisateur une forme de résistance à l'insertion et ainsi évoquer la sensation haptique de frottement. C'est cette forme de retour haptique, proche de l'illusion sensorielle, que nous avons appelé « retour pseudo-haptique ».

Par ce même procédé nous avons également réussi à simuler la notion de raideur d'un objet virtuel (voir Figure 3). Pour cela nous avons mis en relation la déformation visuelle de l'objet sur lequel on effectue la pression, et la force exercée sur la Spaceball. Pour une même pression sur la Spaceball, nous avons donc déformé plus ou moins fortement l'objet représenté à l'écran d'ordinateur (ici un piston). On observe alors que

plus la déformation visuelle de l'objet est importante plus cet objet sera perçu comme mou – alors même que la raideur de la Spaceball reste bien sur toujours constante. Inversement, si la déformation visuelle est faible, l'objet est alors perçu comme dur. La déformation visuelle abuse l'utilisateur au point même que le déplacement visuel à l'écran se substitue pour partie à la perception du déplacement du doigt qui appuie sur l'interface. Il s'agit là d'une illusion du sens proprioceptif qui est abusé par la vision.

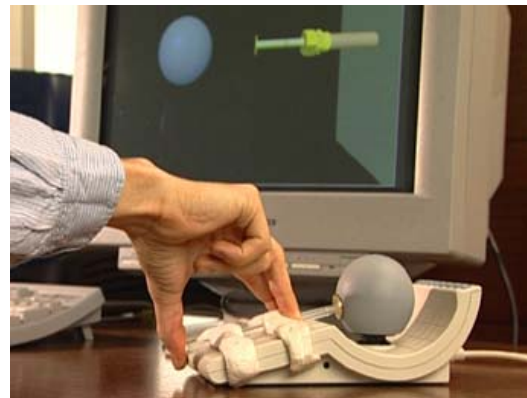


FIG. 3 - Simulation Pseudo-Haptique de la raideur d'un piston avec une Spaceball

Toutefois, une analyse plus détaillée des résultats montre que les sujets testés ont été différemment sensibles à cette illusion visuo-haptique. Confrontés à cette situation de conflit sensoriel, certains sujets se sont comportés de manière « plutôt visuelle » et d'autres ont réagi de manière « plutôt haptique ». Il reste maintenant à comprendre les raisons de cette variabilité.

3 Utilisation du retour haptique

Dans cette partie nous décrivons deux exemples d'application du retour haptique. Le premier exemple correspond à un domaine qui exploite les interfaces haptiques actives : celui du prototypage virtuel industriel. Le deuxième exemple d'application est celui de l'assistance au geste que nous abordons à travers la description d'un système unique basé sur un retour haptique « alternatif ».

3.1 Le prototypage virtuel

3.1.1 Introduction

Le prototypage virtuel et interactif utilisé en milieu industriel a pour objectif de réduire le temps de développement, le coût de l'industrialisation des produits, ainsi que les coûts de formation et de maintenance associés [1]. Cette demande de prototypage virtuel et interactif s'exprime dans tous les secteurs industriels porteurs tels que l'automobile, l'aéronautique, le transport, l'énergie mais aussi dans l'architecture, la culture et le médical par exemple. Ces industries essayent de plus en plus d'utiliser la maquette numérique et les

¹ Une Spaceball est une interface d'entrée dite isométrique. Ce qui signifie qu'elle est statique, solidaire de son socle et qu'elle offre une résistance à l'utilisateur. Elle possède des capteurs de force qui mesurent les efforts de compression ou de torsion exercés sur elle. Les efforts exercés sur le périphérique peuvent être utilisés pour déplacer des objets en 3 dimensions dans des simulations de réalité virtuelle ou pour des tâches de télé-opération. La Spaceball a ainsi servi à télé-opérer le robot Sojourner de l'opération Mars Pathfinder de la NASA. Elle servait de périphérique d'entrée au système de réalité virtuelle de cette opération. Aujourd'hui ces interfaces sont également très répandues dans le domaine de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur).

technologies de la réalité virtuelle en remplacement des maquettes physiques.

Prenons comme premier exemple la conception d'intérieur de véhicule dans l'industrie automobile. Les concepteurs de véhicule souhaitent déterminer si le conducteur peut accéder facilement aux différents équipements : autoradio, boîte à gants, etc. La pratique actuelle va consister à utiliser des maquettes physiques ou la visualisation stéréoscopique d'un modèle numérique pour prototyper l'intérieur de véhicule. Il semble judicieux de développer des interfaces haptiques, qui permettront de toucher cet intérieur virtuel. En exploitant ces interfaces haptiques les études ergonomiques recouvreront un domaine plus vaste d'expertise lors de la conception du véhicule. Cette méthode est beaucoup plus rapide, moins onéreuse et plus exhaustive que la réalisation d'un prototype physique.

On peut prendre comme deuxième exemple le montage dans l'industrie automobile. Actuellement les concepteurs des chaînes de montage utilisent des pièces réalisées en stéréo lithographie pour tester le montage des pièces et les outillages associés. Dans un futur proche ces concepteurs pourront utiliser d'une part des systèmes de visualisation stéréoscopiques pour prototyper leurs chaînes de montage et d'autre part des interfaces haptiques couplées à des logiciels de simulation physique temps réel (calcul des collisions et des forces de contact) afin de prototyper les tâches de montage. L'objectif est d'arriver à faire utiliser les outils de prototypage virtuel par les gens de métier et non par des spécialistes.

3.1.2 Description d'un système de prototypage virtuel avec retour haptique

Dans les applications existantes de prototypage virtuel avec retour d'effort on retrouve des algorithmes de détection de collision dédiés aux pièces, de calcul des forces de contact, des interfaces haptiques et des assistances associées. Nous allons maintenant détailler ces différents éléments. On ne considérera que les interfaces à 6 ddl motorisés et utilisés dans des applications de montage virtuel.

On peut distinguer les approches pour gérer la détection de collision en temps réel suivant la nature des informations géométriques prises en compte. L'approche par *voxelisation* des scènes 3D est la plus utilisée actuellement dans les applications industrielles [20] [15]. Elle permet de gérer la manipulation d'un objet dans une scène statique complexe en garantissant un temps de calcul constant, ce qui est important pour des applications haptiques. Il existe également de nombreuses bibliothèques de détection de collision pour des scènes à base de *polygones* qui sont adaptées au temps réel [14]. Grâce notamment à l'essor des jeux vidéos. Par contre très peu de ces bibliothèques sont capables de gérer correctement le cas des collisions entre pièces concaves.

Dans le domaine universitaire on peut citer les bibliothèques Swift++, H-collide développées à l'UNC ou « Contact toolkit » à l'INRIA [18], ODE+Opcode dans le domaine de l'open source, ainsi que Vortex™ de Cm-labs™ et Havok™ de Telekinesys dans le domaine industriel.

Pour calculer les forces de contact dues aux collisions [8] et [12] utilisent des méthodes de type pénalité, [18] utilisent des méthodes analytiques [16] couplées à une détection de collision continue qui évite les problèmes d'interpénétration. ODE, Vortex, Havok utilisent aussi des méthodes analytiques pour calculer les forces de contact. On notera aussi l'approche de [11] qui utilise des forces de potentiel répulsives couplées à un calcul de distances entre polyèdres, ainsi que [17] qui introduit le concept de niveau de détail haptique.

Au niveau des architectures mécaniques on peut distinguer deux classes d'interfaces haptiques : celles qui sont conçues pour être utilisées avec un poste de travail CAO standard où l'on travaille avec le coude et/ou le poignet posé, et les interfaces pour travailler à l'échelle 1.

Parmi les interfaces haptiques à 6 ddl disponibles pour des tâches de montage virtuel à échelle 1 citons :

- Le phantom 6D™ grande taille de Sensable (Figure 4) : c'est un bras série avec réducteurs à câbles.
- Le virtuose 6D RV™ d'Haption (Figure 4) : c'est un bras série avec réducteurs à câbles pour les trois premiers et Harmonic Drive pour les 3 derniers. Il a aussi un capteur d'effort 6D en extrémité et un changeur d'outils.

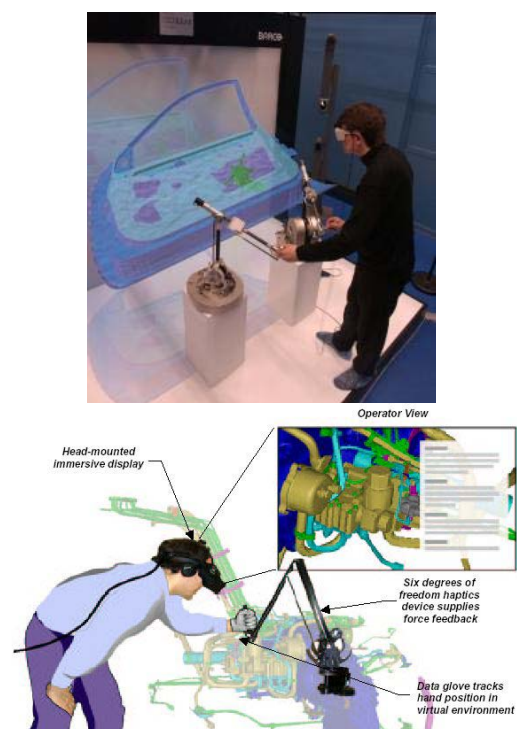


FIG. 4 - (Haut) Virtuoso 6D RV™ (35-40) d'Haption – (Bas) Approche Voxel couplée à un Phantom™ 6D de Sensable™ (General Electric).

Pour les configurations de type poste de travail, nous trouvons des interfaces haptiques à 6 ddl disponibles pour ces tâches de montage virtuel telles que :

- Le virtuose 6D RV™ d'Haption (Figure 5) : c'est un bras parallèle, 3 branches avec 2 ddl motorisés par branche, avec des réducteurs à câbles. Il a aussi un changeur d'outils.
- L'interface à lévitation magnétique (Figure 5) de CMU basée sur la force de Lorentz.



FIG. 5 - (Gauche) Virtuose 6D Mini-Desktop d'Haption - (Droite) Interface haptique CMU couplé à Newton.

3.2 Système d'assistance au geste pour les métiers du volume complexe

3.2.1 Introduction

Le système d'assistance au geste a pour fonction principale de guider le geste du sculpteur pendant la phase de reproduction, en lui restituant de manière sûre et plus facile à exploiter les données qu'il a planifiées sur un modèle numérique. On peut envisager plusieurs techniques de guidage, ce dernier pouvant être réel ou virtuel :

- guidage réel : à l'instar de ce qui se fait en commande numérique de machines-outils ou en production manufacturière robotisée, le modèle numérique est exploité grâce à un post-processeur approprié et permet de générer les commandes d'un robot porte-outils. Ce robot peut fonctionner en mode autonome ou en coopération avec l'homme. Dans ce cas, l'outil porté par le robot est guidé par le sculpteur.
- guidage virtuel : l'outil n'est plus porté par un robot mais directement par le sculpteur. Il est instrumenté d'un localisateur qui permet à chaque instant de connaître sa situation par rapport à l'environnement réel (et donc virtuel).

Dans le système [6] présenté ci-dessous, c'est la deuxième solution qui a été adoptée car elle permet d'aboutir à la conception d'un système relativement simple à manipuler pour un opérateur non spécialiste des techniques robotiques. Par ailleurs, elle conduit à une solution dont le coût est plus faible. Enfin, cette solution débouche sur un système « léger » qui peut être facilement transporté et installé sur les sites (ateliers, carrières, etc.) sur lesquels les matériaux utilisés pour la reproduction de sculptures doivent être travaillés.

3.2.2 Description du système

La structure matérielle du système d'assistance au geste se compose des éléments suivants :

- Une *cellule* qui représente le noyau central du système dans laquelle sont positionnés les autres éléments. Dans cette cellule, est disposé (sur le poste de travail, ou au sol en fonction de la configuration de l'atelier) un ensemble de sphères étalonnées utilisées pour la re-localisation du système métrologique.
- Un *bloc matière* auquel est associé un modèle géométrique obtenu après digitalisation du bloc de matière réel. Le positionnement de la matière dans la cellule est réalisé manuellement après palpation d'un ensemble de points caractéristiques sur la matière réelle. Cette opération permet de recalibrer le modèle matière dans la maquette numérique.
- Un *modèle source* représentant la forme de l'original à reproduire.
- Un *étalon outil* constitué d'un système de plans de référence utilisé pour la métrologie des outils.
- Un *système de métrologie* constitué d'un bras articulé passif servant à la localisation de l'outil dans l'espace. Ce bras peut être déplacé afin d'augmenter le volume de travail de l'opérateur.
- A l'extrémité du bras est monté un *outil* auquel est associé un modèle permettant de localiser l'outil en temps réel dans la maquette numérique et de simuler l'enlèvement de matière pendant le travail de l'opérateur.

La position et l'orientation de chaque élément du système sont ainsi connues et représentées par une matrice de transformation homogène qui peut être soit constante soit variable en fonction du temps si cela est nécessaire.

Sur la Figure 6 (droite), on peut voir le bras de métrologie avec à l'extrémité l'outil utilisé en phase de semi-finition, le poste de travail et le bloc de matière en cours de travail. On constate sur cette figure que l'opérateur est concentré sur l'outil seul. Sur la Figure 6 (gauche), on a une illustration du retour visuel et auditif (utilisation d'un casque sans fil) dont l'opérateur dispose.



FIG. 6 - Système d'assistance au geste

La solution adoptée est basée sur un guidage virtuel dans le sens où elle s'appuie complètement sur la maquette numérique de la forme à reproduire. Cependant elle n'utilise pas d'interface haptique active. En effet,

L'information de positionnement de l'outil dans l'espace est donnée :

- Par un retour visuel projeté sur grand écran : la visualisation utilise plusieurs vues réglées par l'opérateur avant de commencer le travail de la matière. Pendant le travail de la matière, sur chacune des vues sont représentées d'une part la forme à reproduire avec une résolution géométrique faible et d'autre part la position réelle de l'outil. Au fur et à mesure des déplacements de l'outil, la forme à reproduire est visualisée avec une résolution géométrique augmentée dans la zone d'influence de l'outil. Cette zone est calculée en fonction de la cote de garde (« gras ») associée à l'outil. Cette technique permet de mettre en valeur la zone de travail de l'outil et permet à l'opérateur de se concentrer uniquement sur celle-ci. D'autre part les différentes vues sont enrichies en temps réel par des informations donnant la distance minimale de l'outil à la forme, et/ou la zone d'influence de l'outil sur la forme (voir Figure 7).
- Par un retour auditif dont la fréquence est calée sur la distance entre l'outil et la forme. L'allure du profil de sortie du retour auditif ainsi que la valeur du « gras » outil sont programmables par l'opérateur. Par ailleurs, il existe un mode de travail au contact pour lequel seul un signal sonore est émis lorsque la cote est atteinte.

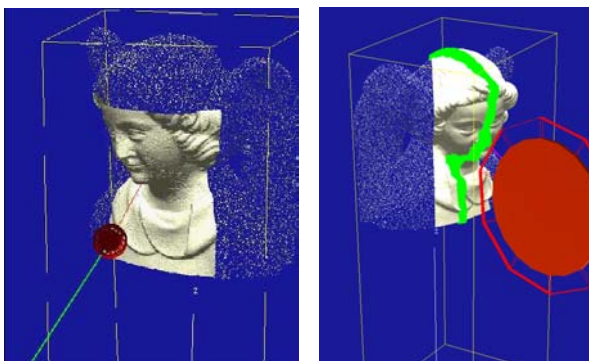


FIG. 7 - Système d'assistance au geste
(Gauche) Meuleuse - (Droite) Disqueuse.

L'exploitation du retour sensoriel par l'opérateur est fonction de la nature du travail réalisé. Pendant les phases d'ébauche correspondant à un enlèvement de matière important, seul le retour visuel est utilisé. Pendant les phases de semi-finition ou de finition, c'est le retour auditif qui est exploité pour un positionnement précis de l'outil par rapport à la forme à atteindre.

4 Conclusion

Les interfaces haptiques actives sont aujourd'hui parvenues à un stade de maturité suffisant pour pouvoir être appliquées efficacement dans le domaine industriel, notamment dans le prototypage virtuel.

Des solutions alternatives telles que le retour pseudo-haptique sont développées en parallèle. Elles jouent sur les connaissances que nous avons de la perception humaine et sur ses limites, afin d'abuser le système sensoriel humain en simulant des sensations haptiques. Ces solutions peuvent être aujourd'hui envisagées dans

des domaines tels que l'assistance et l'apprentissage du geste.

Références

- [1] Arnaldi B. et al., « rapport RNTL sur l'état de l'art et les besoins industriels en réalité virtuelle », <http://www.perfrv.org>.
- [2] Bach-y-Rita, P., J.G. Webster, W.J. Thompkins and T. Crabb, "Sensory Substitution for Space Gloves and for Space Robots", Proc. of the Workshop on Space Telerobotics, Vol. 2, pp. 51-57, 1987.
- [3] Bergamasco, M. and Avizzanno. "Issues in Full-body Haptic Interface", IEEE VR Workshop on Haptics in virtual Environments, 2000.
- [4] Bergamasco, M., "The GLAD-IN-ART Project", Proc. of IMAGINA, 1992.
- [5] Burdea, G. "Force and Touch Feedback for Virtual Reality", John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [6] Crosnier A., and Druon S. "Human centered system for computer aided replication of sculptures", Proc. of IROS, (à paraître en octobre 2003).
- [7] Fuchs, P., G..Moreau, and J.P. Papin "Le Traité de la réalité virtuelle" Les presses de l' école des mines, 2001.
- [8] Gregory, A., A. Mascarenhas, S. Ehmann, M. Lin, and D. Manocha, "Six degrees of freedom haptic display of polygonal models", Proc. of IEEE Visualization, 2000.
- [9] Hayward V., and Astley. "Performance Mesure for Haptic interfaces", Robotics Research : the 7th International Symposium. Giralt, G., Hirzinger, G., (Eds). Springer Verlag, pp. 195-207, 1996.
- [10] Hinckley, K., R. Pausch, J. Goble, and N. Kassell, "Passive Real-World Interface Props for Neurosurgical Visualization", Proc. of ACM CHI, pp. 452-458, 1994.
- [11] Johnson, D. and Willemsen, P. "Six Degree-of-Freedom Haptic Rendering of Complex Polygonal Models", Proc. of Haptics Symposium, 2003.
- [12] Kim, Y.J., M.A. Otaduy, M.C. Lin and D. Manocha. "Six-degree-of-freedom Haptic Display using Incremental and Localized Computations", Presence, Vol. 12, Issue 3, 2003.
- [13] Lécuyer, A., « Contribution à l'étude des retours haptique et pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opérations de montage/démontage en aéronautique », Thèse de doctorat de l'Université Paris XI, 5 Décembre 2001.
- [14] Lin, M. and S. Gottschalk. "Collision Detection between Geometric Models: A Survey". Proc. of IMA Conference on Mathematics of Surfaces, 1998.
- [15] McNeely, W.A., K.D. Puterbaugh, and J.J. Troy. "Six degree of freedom haptic rendering using voxel sampling", Proc. of ACM SIGGRAPH, pp. 401-408, 1999.
- [16] Moreau, J.J. "some basics of unilateral dynamics" Unilateral multibody contacts, Kluwer academic publishers, Dordrecht, pp 1-14, 1999.
- [17] Otaduy, M.A. and M. Lin. "Sensation preserving for haptic rendering", Proc. of ACM SIGGRAPH, 2003.
- [18] Redon, S., A. Kheddar and S. Coquillart. "Fast Continuous Collision Detection between Rigid Bodies", In Proc. of Eurographics, 2002.
- [19] Richard, P., « Analyse de l'interaction homme-monde virtuel lors de tâches de manipulation d'objets déformables », Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 14 Octobre 1996.
- [20] Volpe, C., and R. Blue. "Virtual haptic validation for service", Proc. of Phantom User's Group, 2003.

Environnement logiciel et applications en Réalité Virtuelle

B. Arnaldi
 IRISA
 Campus de Beaulieu
 35042 Rennes Cedex
 arnaldi@irisa.fr

Résumé

Cet article présente, dans un premier temps, les problèmes et solutions concernant le développement logiciel d'applications en réalité virtuelle. A titre d'exemple, la plate-forme logicielle OpenMASK sera détaillée dans ses grandes lignes en établissant les principes fondamentaux concernant, d'une part, le traitement de l'interaction et, d'autre part, celui du travail coopératif. Dans un deuxième temps, nous aborderons les principaux résultats de la plate-forme RNTL PERF-RV dont les objectifs essentiels concernent, d'une part, la mutualisation d'un ensemble de configurations matérielles pour la réalité virtuelle (Reality Center, Workbench, systèmes d'interaction haptiques, ...), et d'autre part la factorisation multidisciplinaire de l'étude de problèmes génériques en réalité virtuelle dans des secteurs applicatifs différents et complémentaires (automobile, défense, recherche pétrolière).

Mots Clef

Réalité Virtuelle, Interaction, plate-forme RNTL.

1 Introduction

Les applications des technologies de la réalité virtuelle sont nombreuses et prometteuses. Néanmoins, leur usage reste à ce jour encore relativement limité. Plusieurs raisons expliquent cet état de fait :

- la complexité d'intégration dans un même logiciel de tous les composants logiciels et matériels nécessaires ;
- une application de réalité virtuelle doit nécessairement intégrer un ensemble de dispositifs d'interaction servis sur le plan logiciel par la mise en œuvre de métaphores d'interaction. Une difficulté essentielle dans la conception de ces applications réside dans le fait qu'il est notoirement difficile de spécifier a priori la nature des dispositifs et des métaphores pour une application donnée. Cette difficulté provient du fait que l'homme est dans la boucle et qu'il peut, en tant qu'utilisateur de l'application, accepter ou non le type d'interaction qui lui est proposé. Il en résulte un procédé coûteux de réalisation fondé sur l'essai/erreur ;

- enfin, le ticket d'entrée, concernant le coût d'équipement, même si une démocratisation est actuellement engagée, reste très élevé, provoquant une limitation naturelle au déploiement de ces technologies.

La première section de cet article présentera la plate-forme OpenMASK. OpenMASK, issue d'un développement interne sous le nom GASP, se propose d'être un pas dans cette direction. Littéralement, l'acronyme OpenMASK signifie *Open {Multi-threaded | Modular} Animation and Simulation {Kernel | Kit}*, ce qui présente la dualité de cette plate-forme concernant sa capacité à permettre un développement modulaire dans un contexte multi-activités. Ce chapitre va donc décrire dans un premier temps les concepts et grandes fonctionnalités de l'environnement OpenMASK. Ensuite, nous présentons les composants fondamentaux et les développements thématiques réalisés grâce à OpenMASK dans le projet Siames¹.

La deuxième section présentera la plate-forme RNTL PERF-RV. PERF-RV est un projet de plate-forme RNTL labellisé en juin 2000. Ce projet est financé par le Ministère de la Recherche pour une durée de trois ans. Le consortium initial du projet est composé de laboratoires de recherche et d'industriels : L'INRIA, le CEA-LIST, l'École des Mines de Paris ENMP, l'ENSAM de Chalon sur Saône, le LABRI, le LRV, le LIMSI-CNRS, l'ADEPA, EADS CCR, l'IFP, CLARTÉ, Dassault Aviation, EDF, Giat Industries, PSA Peugeot Citroën et Renault.

2 OpenMASK

2.1 Présentation générale d'OpenMASK

Les développements autour d'OPENMASK résultent, d'une part, de la volonté au niveau du projet de recherche Siames de l'IRISA de disposer d'un environnement de démonstration unique, permettant de fédérer l'ensemble des travaux de recherche de l'équipe et, d'autre part, de disposer d'un cadre de développement modulaire, performant et extensible. L'enjeu majeur de cet objectif est d'offrir la capacité de factoriser les développements et de permettre la

¹. Projet de recherche de l'IRISA (UMR 6074, unité mixte de recherche INRIA, CNRS, Université de Rennes I et INSA de Rennes), à l'origine d'OpenMASK.

réutilisation de composants qui une fois spécifiés et réalisés peuvent être exploités sans connaître le détail de leur mise en œuvre.

Récemment, la volonté de placer cet environnement logiciel en Open Source² a été motivée par la conviction qu'un tel outil est aussi adapté à une communauté de chercheurs et industriels qui, soit sous la forme d'utilisateurs, soit sous la forme de contributeurs, veulent participer à l'émergence de cette nouvelle forme de développement. Le modèle Open Source est de plus en plus utilisé aujourd'hui bien qu'il ne soit pas exclusif. En effet, rien n'oblige les utilisateurs/contributeurs d'OpenMASK à adhérer à ce modèle.

Sur le fond, l'approche conceptuelle de développement retenue dans OpenMASK consiste :

- à proposer un cadre modulaire de développement logiciel fondé sur la notion de composant permettant d'atteindre les objectifs d'extensibilité et de composition ;
- à autoriser, par encapsulation, l'intégration de composants logiciels extérieurs (exemple : modules en Open Source pour la détection de collision ou le calcul dynamique de composants mécaniques) ;
- à proposer un *framework* de développement constitué d'un environnement d'exécution (*run time*) et d'un environnement de développement ;
- à proposer un cadre permettant d'atteindre la performance quel que soit le contexte (multi-machine, multi-processeur, multi-OS, cluster de PC), sans créer de dépendance sur le développement des modules ;
- à proposer une solution logicielle qui doit fonctionner sur des gammes de plates-formes matérielles différentes s'adaptant du PC portable à la visualisation immersive sur grand écran cylindrique ou plan de travail virtuel.

Pour atteindre cet objectif, OpenMASK se fonde sur quatre concepts clés, les trois premiers étant relatifs à l'exécution tandis que le dernier est relatif au développement :

le noyau : comme son nom l'indique, il représente le cœur du système. Il met en œuvre l'ensemble des services de base nécessaires à l'exécution coordonnée d'un ensemble de modules (cf. section 2.2) et ceci, quel que soit l'environnement d'exécution ;

l'objet de simulation : dans OpenMASK, l'unité de modularité est appelée objet de simulation. Il peut servir à décrire aussi bien le comportement et le contrôle du mouvement d'une entité ou d'un objet virtuel qu'un périphérique d'interaction. Cet objet de simulation dispose d'entrées, de sorties et de paramètres de contrôle et est activé régulièrement par le noyau (cf. section 2.3) ;

l'application : avec OpenMASK, concevoir un environnement virtuel revient à choisir (ou programmer) les objets de simulation et à les paramétrer pour les adapter au contexte. De plus, les objets de simulation sont organisés sous la forme d'un arbre de simulation représentant la hiérarchie fonctionnelle de cette application (cf. section 2.4) ;

le framework de développement : il est mis en œuvre sous la forme de classes abstraites permettant un développement rapide et sûr de nouveaux objets de simulation.

2.2 Le noyau

Afin de rendre indépendant le développement des objets de simulation de l'environnement d'exécution (système d'exploitation, système distribué, machine parallèle), ce noyau peut être vu comme une machine virtuelle d'exécution. En d'autres termes, vis à vis de l'application de réalité virtuelle, il joue le rôle de *middleware* et se charge de transposer les relations qu'un objet de simulation a avec le système d'exploitation ou avec un autre objet de simulation selon l'environnement d'exécution. Une autre manière d'appréhender le noyau d'OpenMASK est de le considérer comme le gestionnaire d'un bus logique sur lequel les objets de simulation viennent se connecter. Ces branchements permettent à la fois l'échange d'information (communication inter module), la synchronisation temporelle des modules et le contrôle, au sens paramétrage, des modules (cf. figure 1). La programmation d'un module est réalisée grâce à une API C++ ouverte pour le développement d'objets de simulation et pour l'adaptation des noyaux d'exécution.

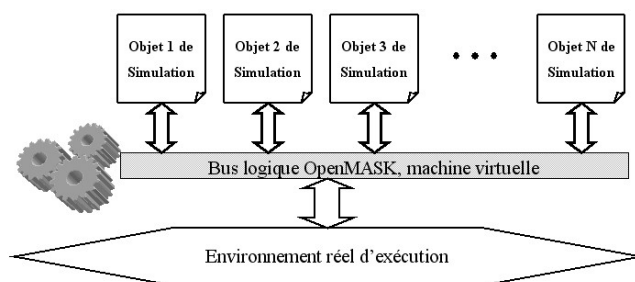


FIG. 1 – OpenMASK : bus logique ou machine virtuelle.

Vus d'un objet de simulation, les services offerts par les noyaux représentent les services du bus logique (*middleware*) ou de la machine virtuelle. Ces services concernent essentiellement l'accueil des objets de simulation, la communication entre objets, la gestion du temps et la distribution des calculs.

2.3 L'objet de simulation

L'objet de simulation est l'unité modulaire de développement d'OpenMASK. C'est au sein de l'objet de simulation

2. <http://www.openmask.org>

que tout le code décrivant l'évolution de l'objet et son interaction avec les autres objets est localisé. Une question se pose lors de la conception d'une application de réalité virtuelle : quelle doit être la granularité de l'objet de simulation ? Dans la pratique, ce choix est à la charge du concepteur/programmeur. En effet, OpenMASK n'impose aucune règle quant au niveau de détail ou de complexité d'un objet de simulation. L'expérience des utilisations actuelles d'OpenMASK montre que la granularité d'un objet de simulation varie d'une application à l'autre et peut représenter un humanoïde virtuel complet avec ses comportements ou une sphère inerte et ce dans la même application.

Le rôle d'un objet de simulation est de fournir le résultat d'un calcul en fonction de données qui lui seront transmises par d'autres objets de simulation. Il va donc devoir communiquer avec son environnement composé d'autres objets de simulation. Deux modes de communication ont été élaborés :

un mode flot de données : certains objets de simulation sont par nature des producteurs de données. Dans certains cas, ces données sont produites avec régularité (simulateur mécanique, dispositif physique d'interaction fonctionnant par requête d'échantillonnage temporel, ...). De manière duale, certains objets de simulation sont des consommateurs de données qui nécessitent d'être alimentés de manière régulière (visualisation, module logiciel de traitement d'un capteur synchrone, ...). Dans ce cas, un lien de communication flot de données doit être établi entre ces objets de simulation ;

un mode événementiel : d'autres objets de simulation sont sensibles à des données ou événements produits de manière asynchrone (exceptions, signaux de configuration, ...) par le noyau ou d'autres objets de simulation. Un second mécanisme, fondé sur des événements valués ou non, a donc été introduit dans OpenMASK. Un signal est une information émise par un objet (ou par le noyau pour les signaux systèmes) dans l'environnement. Les signaux sont différenciés entre eux par des identifiants (la signature du signal) et il est possible de leur associer une valeur ou un message ;

Chaque objet de simulation peut avoir le calcul de son évolution déclenché de deux manières différentes :

- la première concerne une activation régulière de l'objet de simulation selon une fréquence donnée. Ce type d'activation est typiquement utilisé pour la synchronisation avec le visuel ou pour l'activation de modules de calcul de résolution mécanique d'objets.
- la deuxième technique d'activation est réalisée sous forme d'activation événementielle. Son usage caractéristique concerne le traitement de dépendances asynchrones entre objets de simulation.

L'objet de simulation est bâti autour d'une interface simple et d'un code de calcul représenté par des méthodes génériques. Le fait pour un objet de simulation de réagir d'une façon prédéterminée à un certain nombre d'événements peut faire partie de son interface, et doit donc être préservé à travers l'héritage et être visible par réflexion. Les auditeurs d'événements sont des objets remplissant ce rôle. Ils encapsulent des fragments de code qui sont associés à certains événements et qui sont automatiquement appelés lorsque ces événements sont reçus par l'objet. En tant qu'éléments de l'interface d'un objet ils doivent être construits dans le constructeur de l'objet de simulation.

2.4 L'application

Pour une application donnée, les objets de simulation sont structurés dans un arbre de simulation. L'objet racine de cet arbre est le contrôleur, mais le reste de la sémantique de l'arbre de simulation est laissé au concepteur d'application. Il y a deux fonctionnalités d'OpenMASK dont le comportement change en fonction de la structuration de l'arbre de simulation.

1. la création d'objet, puisque l'interprétation de la chaîne de caractères représentant la classe de l'objet à créer est faite récursivement à partir de l'objet père de l'objet à créer. Les prochaines versions d'OpenMASK pourraient faire la distinction entre le créateur d'un objet et le père de celui ci pour l'interprétation de cette chaîne de caractère, influant sur le type exact de l'objet créé ;
2. les fonctions de recherche d'un objet. L'arbre de simulation permet de faire des recherches globales ou limitées à un sous-arbre, aux frères ou encore aux fils dans l'arbre de simulation.

Les objets de simulation d'OpenMASK peuvent être créés soit :

1. statiquement : leur description est faite dans l'arbre de simulation, paramètre du contrôleur à la création ;
2. dynamiquement, à l'initiative du programmeur ;
3. dynamiquement, en fonction des besoins des autres objets. Ceci est vrai en particulier dans le cas de l'exécution distribuée, puisque des objets miroirs sont créés au besoin pour communiquer avec les objets de simulation de référence.

Tout dans la conception d'OpenMASK a été fait pour permettre une distribution aisée des calculs, puisque toutes les interactions entre les objets ont lieu à travers le noyau ou en utilisant des objets construits par le noyau (cf. figure 2). En particulier, les objets de simulation n'ont pas à être retouchés pour pouvoir être utilisés par un contrôleur distribué, puisque tous les problèmes d'intégrité des données sont à gérer au niveau des outils fournis par le contrôleur.

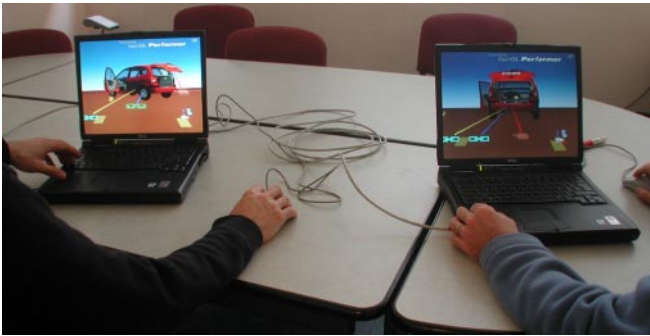


FIG. 2 – Travail coopératif sur deux portables en réseau local.

2.5 Les composants fondamentaux d'OpenMASK

OpenMASK dispose d'ores et déjà d'un certain nombre de services exploitables pour la réalisation d'applications. Ces services indispensables concernent un objet de simulation dédié à la visualisation et des objets de simulation permettant la mise en œuvre d'expérimentations interactives et coopératives. En particulier, il y a lieu de préciser que le noyau d'OpenMASK est naturellement distribué, le fait d'intégrer un module de visualisation et les mécanismes d'interaction offre naturellement la capacité à produire des applications coopératives.

- OpenMASK-3DVis : Kit logiciel de visualisation interactive

OpenMASK-3DVis fût la première contribution logicielle fournie avec OpenMASK. C'est un ensemble d'objets de simulation, réutilisables et évolutifs, pour la visualisation, la navigation et la désignation dans des environnements virtuels animés.

2.6 Le retour d'effort

Le traitement du retour d'effort est, pour les applications de réalité virtuelle, un domaine en plein essor. En effet, de plus en plus de dispositifs haptiques sont actuellement disponibles sur le marché et de nombreuses sociétés de l'industrie manufacturière expérimentent de tels dispositifs dans des applications de prototypage virtuel telles que le montage ou le démontage virtuel. Dans ce contexte nous avons fait l'acquisition d'un bras haptique à six degrés de liberté, le VIRTUOSE6D conçu par la société HAPTION.

Nous travaillons sur ce domaine dans le cadre du projet PERF-RV (cf. section PERF-RV) à l'étude du montage virtuel dans le contexte automobile (cf. figure 3. A ce titre, nous avons proposé une architecture générique permettant la mise en œuvre du retour d'effort dans OpenMASK. Cette architecture générique a été conçue en exploitant les caractéristiques modulaires et de distribution d'OpenMASK. En particulier, les caractéristiques essentielles de cette étude



FIG. 3 – Visualisation immersive et retour d'effort.

concernent l'exploitation de la structure d'objets de simulation et de communication d'OpenMASK permettant de définir une structure modulaire contenant l'ensemble des ingrédients nécessaires à l'application :

- module d'interaction ;
- module de visualisation ;
- module de détection de collision ;
- module de simulation mécanique ;
- module de calcul d'un effort virtuel ;
- module de visualisation.

2.7 Conclusion

Pour conclure, nous croyons qu'OpenMASK représente un compromis intéressant entre performance et capitalisation du savoir-faire, puisqu'il est déjà largement utilisé comme plate-forme logicielle pour différents programmes de recherche. Ces programmes incluent des applications de réalité virtuelle coopérative, d'interaction utilisateur en environnement virtuel, de retour haptique, de simulation comportementale, de capture de mouvement et de contrôle de mouvement. OpenMASK est en particulier utilisé au sein de Perf-RV.

3 Perf-RV

La demande du secteur industriel en réalité virtuelle s'exprime de façon de plus en plus forte dans les secteurs porteurs que sont l'automobile, l'aéronautique, le transport, l'énergie mais aussi dans l'architecture, la culture et le médical par exemple. Il est apparu nécessaire dans ces conditions de mettre en place une activité de recherche et de développement procurant les nouvelles technologies capables de répondre aux besoins industriels mentionnés plus haut et donc de permettre de faire évoluer les méthodes de travail des utilisateurs finaux grâce à des interfaces plus naturelles et plus avancées.

Nous avons donc proposé de créer une structure de centre d'expérimentation en réalité virtuelle sur la thématique du *Bureau d'Étude du futur*. Cette plate-forme est destinée à

soutenir un programme scientifique sur les trois thèmes suivants :

- Modélisations et Simulations Numériques ;
- Interfaces et Communications Homme-Machine ;
- Méthodes, Usages et Perceptions.

Ces trois thèmes concourent à définir des méthodes, outils et interfaces communs aux différents domaines d'application mentionnés précédemment. Les défis scientifiques qui sont liés au développement de systèmes de prototypage virtuel sont nombreux et l'on peut citer parmi les plus importants :

- La simulation réaliste en temps réel, qui doit s'appuyer sur de nouvelles méthodes de modélisation numérique ;
- L'interaction physique (geste et retour d'effort), imposant l'étude d'interfaces matérielles innovantes ;
- Le travail coopératif : interaction multi-utilisateurs en environnement immersif dans un contexte multi-métiers et sur des systèmes immersifs distants ;
- L'ergonomie des interfaces.

Les principaux points mis en avant par ce réseau sont :

- Mettre en commun les ressources humaines et expérimentales de différents laboratoires et partenaires industriels ;
- Offrir différentes plates-formes matérielles (salle immersive, Plan de Travail Virtuel, . . .) ainsi que de nombreux dispositifs d'interaction permettant réellement de mener des expérimentations concrètes en réalité virtuelle ;
- Fournir un site d'évaluation technologique concernant l'exploitation d'applications interactives et de réalité virtuelle et réalité augmentée ;
- Offrir les moyens humains permettant de tester les solutions innovantes issues de la coopération des partenaires ;
- Être ouvert en cours de fonctionnement à des partenaires académiques et industriels souhaitant rejoindre le réseau ;
- Factoriser et partager sur les différents sites l'expérience acquise à travers le réseau. Ce partage sera mis en œuvre par des développements coordonnés et partageables permettant de capitaliser les ressources temporellement et géographiquement.

3.1 Sous projets et actions de PERF-RV

PERF-RV est organisé en quatre sous-projets thématiques qui sont eux même décomposés en actions. Chaque action est ciblée vers un objectif scientifique ou technologique et est portée par un nombre limité de partenaires. De plus, dans chaque sous-projet une action particulière vise à animer un groupe de travail dont les missions, pour les quatre sous-projets concernent :

- La définition des attentes techniques de chaque indus-

- triel concernant les applications du couplage des interfaces haptiques et de la visualisation immersive ;
- La définition des contraintes industrielles liées à la mise en place de ces applications et le savoir-faire nécessaire ;
- La réalisation d'une synthèse de ces besoins et contraintes pour spécifier le cadre expérimental (test case) permettant la mise en œuvre des différentes solutions technologiques, leur utilisation, test et validation. Compte tenu des secteurs industriels représentés (aérospatiale, automobile, défense,...) dans ce sous-projet plusieurs cadres expérimentaux seront définis ;
- L'accompagnement des industriels dans les expérimentations, la validation et l'évaluation du potentiel d'applications dans leur domaine ;
- L'aide des industriels et des partenaires de R&D pour le montage de projets européens.
- Sous-projet 1 : Interfaces haptiques et visualisation immersive
 - Action A1 - Groupe de Travail
 - Action A2 - Démonstrateur interface haptique et visualisation immersive
 - Action A3 - couplage haptique-visuel
 - Action A4 - Conception et revue de projet immersives dans un MoveTM
 - Action A5 - Retour d'effort pour les études d'ergonomie
 - Action A6 - Intégration de la RV dans le processus de conception de produits
- Sous-projet 2 : Interface multimodale et coopérative
 - Action A1 - Groupe de Travail 3.1).
 - Action A2 - Serveur distribué d'événements pour dispositifs de RV
 - Action A3 - Interactions coopératives locales et distantes
- Sous-projet 3 : Simulation d'assemblage et de montage
 - Action A1 - Groupe de Travail 3.1).
 - Action A2 - simulation d'assemblage et montage
 - Action A3 - Extraction d'éléments de simulation d'assemblage et de montage
 - Action A4 - Simulation réalité virtuelle d'un assemblage aéronautique
 - Action A5 - Revue d'application montage virtuel dans
- Sous-projet 4 : Formation au geste technique
 - Action A1 - Groupe de Travail
 - Action A2 - Forum des métiers

3.2 PERF-RV : quelques résultats

Depuis son lancement la plate-forme PERF-RV a produit de nombreux résultats, tant par l'organisation de réunions régulières des groupes de travail que par l'activité de chacune de ses actions. En particulier, les groupes de travail des quatre sous-projets ont contribué à :

- Présenter les actions respectives des partenaires industriels et chercheurs afin de définir les conditions initiales du projet ;
- Etablir la liste des points clés qui conditionnent la réussite ou l'échec d'une application de réalité virtuelle : définir les caractéristiques fonctionnelles des applications RV ciblées et éclairer les axes de recherche où un effort particulier devra être réalisé ;
- Structurer l'état de l'art, de l'offre et de la demande (voir le livrable T0+6) ;
- Détecter les actions factorisables dans le sous projet, et finalement entre les sous projets tant au niveau recherche qu'au niveau des synergies industrielles ;
- Ouvrir le projet à de nouveaux partenaires qui ont activement participé au groupe en tant qu'auditeur et contributeur libre.

Nous présentons ici, quelques résultats :

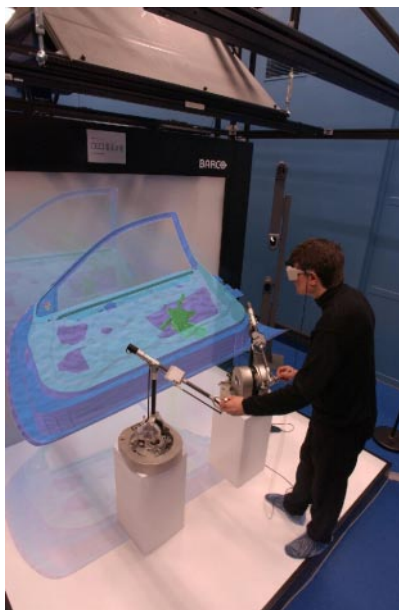


FIG. 4 – Scénario Renault sur la plate-forme PHARE du CEA/LIST (Données Renault).

- Sous-projet 3 : Action A5 - Revue d'application montage virtuel dans le domaine automobile :]
Dans cette action, les activités de formalisation ont mené à préciser la sélection de scénarios de montage, et activités préparatoires pour l'analyse des tâches opératoires et la définition des besoins pour une revue de montage/démontage dans le domaine automobile.

Le CEA/LIST et l'INRIA ont testé plusieurs logiciels permettant de convertir les données CAO fournies par Renault (format IGES) en données utilisables pour le rendu visuel et l'haptique. Le CEA/LIST a réalisé les 3 scénarios spécifiés par Renault. Ce logiciel a pour but de visualiser en stéréoscopie et de manipuler avec rendu haptique les données fournies par Renault (cf. figure 4).

- Sous-projet 4 : Formation au geste technique



FIG. 5 – Utilisation du simulateur de formation.

Afin d'identifier un contexte métier pertinent et réaliste au regard des technologies de la RV (et en particulier des interfaces haptiques), nous nous sommes associés les compétences d'experts sur ces deux domaines (formation et systèmes haptiques) :

- L'Association Professionnelle de la Formation pour Adultes (AFPA) qui apporte sa connaissance de l'ingénierie pédagogique liée aux formations techniques ;
- SIMTEAM, société spécialisée en développement d'application mettant en œuvre des interfaces haptiques.

Cette association a permis le développement d'un prototype de simulateur de fraiseuse (cf. figure 5) expérimenté auprès d'apprenants..

3.3 Conclusion et perspectives

Le bilan de l'activité de la plate-forme PERF-RV montre une montée en puissance de travaux fondamentaux dans le domaine, une forte composante de développement innovant et une grande cohérence dans les collaborations Recherche / Industrie.

Session 3

Systèmes Robotiques Avancés

- ***Architectures mécaniques complexes pour la manipulation et la locomotion***
 - La conception d'un robot parallèle à trois degrés de liberté l'orthoglide
D. Chablat
 - Optimisation et contrôle de la configuration d'un rover articulé
F. Ben Amar
- ***Biomécanique du mouvement***
 - Afférences sensori-motrices et stabilité posturale
P. Thoumié
 - Applications des outils de l'automatique au problème de la restauration du mouvement de membres paralysés sous stimulation électrique fonctionnelle
D.Guiraud, H.El Makssoud, P.Poignet, P.Fraisse, E.Dombre
- ***Micro-robotique et micromanipulation***
 - Microsystèmes pour la robotique et micromanipulation
L.Buchaillet, S.Regnier
 - Micro et nano précision
J.David, S.Leleu S.Duhem, L.Lahousse, G.P.Vailleau

La conception d'une machine outil robot parallèle à trois degrés de liberté l'Orthoglide

Damien Chablat, Philippe Wenger, Félix Majou
Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes
1, rue de la Noë, 44321 Nantes
Damien.Chablat@ircsyn.ec-nantes.fr

Résumé

Cette article présente l'historique de la conception de l'Orthoglide, une machine outil à architecture parallèle à trois degrés de liberté. Conçu à partir d'un cahier des charges dédié à l'usinage grande vitesse, cette architecture possède des propriétés cinéostatiques homogènes dans son espace de travail grâce à l'existence d'une configuration isotrope. Ces propriétés ont été obtenues en utilisant plusieurs méthodes d'optimisation dont les critères et les contraintes seront présentés. Ces résultats seront illustrés par le prototype de l'Orthoglide construit à l'IRCCyN.

1- Introduction

L'usinage à grande vitesse (UGV) exige des performances dynamiques de plus en plus élevées de la part des machines-outils. Ces performances peuvent être améliorées en équipant les machines-outils de moteurs plus puissants. Cependant, ces améliorations sont limitées par les masses élevées des axes des machines-outils classiques dites « sérielles » (axes en séries). Sur une machine-outil sérielle, les axes sont « empilés » les uns sur les autres. Sur la figure 1 par exemple, l'axe Y supporte l'axe X. Le moteur de l'axe Y doit donc déplacer deux corps massifs.

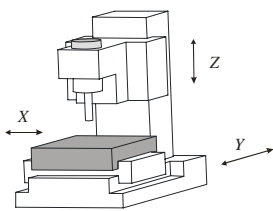


Figure 1 : Machine-outil sérielle

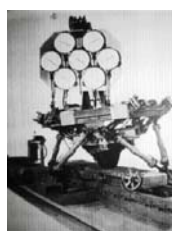


Figure 2 : Plate-forme de Gough-Stewart

Pour diminuer les inerties des machines-outils, une solution très intéressante consiste à changer l'architecture cinématique en plaçant les axes non pas en série mais en parallèle (architecture parallèle) [1]. La première application industrielle connue des mécanismes parallèles est la plate forme de Gough [2] (Figure 2), destinée au test de pneumatiques. C'est un mécanisme à six degrés de liberté, muni de six vérins reliant la base à la plate-forme mobile. A la fin des années soixante,

D. Stewart réutilisera cette architecture pour concevoir un simulateur de vol [3, 4].

La première présentation officielle d'une machine-outil parallèle remonte à 1994 avec la Variax (Gidding & Lewis) au salon de Chicago. Cette machine reprenait l'architecture de type plate-forme de Gough-Stewart communément appelée « hexapode ». Depuis cette date, plusieurs industriels travaillent sur des prototypes de machines-outils parallèles. La plupart d'entre eux ont repris l'architecture hexapode. Dans ce cas, l'outil est relié à une base fixe au moyen de six jambes télescopiques montées en parallèle. Les masses en mouvement sont plus faibles que dans une machine-outil sérielle puisque chaque moteur ne déplace que le plateau supportant l'outil. De plus, les jambes ne subissant aucune contrainte de flexion, leur structure peut être allégée. En revanche, les limites des architectures hexapodes, comme dans la plupart des architectures parallèles, sont un volume de travail restreint et complexe. Les équations qui relient les déplacements de l'outil à ceux des moteurs sont non linéaires ce qui engendre des variations importantes des performances au sein du volume de travail.

Une alternative à l'architecture hexapode a été présentée par l'ETH Zürich avec l'hexaglide. Cette architecture se caractérise par des jambes de longueur fixe qui glissent sur des rails. L'avantage de cette architecture réside dans le fait que les moteurs sont fixes, ce qui diminue les inerties et permet l'emploi de moteurs linéaires. De plus, la dissipation thermique des moteurs est facilitée.

Des versions 3 axes de l'hexaglide ont été proposées par la suite avec le Triaglide (Mikron), le Linapod (ISW Uni Stuttgart), le Quickstep (Krause & Mauser) et l'Urane SX (Renault-Automation). Ces machines reprennent en fait une architecture déjà proposée en robotique avec par exemple le « Delta linéaire » [5] et le « Y-Star » [6] permettant de maintenir une orientation fixe de l'outil.

Les machines hexaglide et triaglide ont pour avantage supplémentaire d'offrir un volume de travail présentant une dimension ajustable à la demande (il suffit d'augmenter la longueur des liaisons glissières pour augmenter d'autant la longueur du volume de travail). Cependant, les performances restent non homogènes dans le volume de travail.

Plus récemment, trois équipes de recherche ont produit une famille de manipulateurs à trois degrés de liberté, isotropes dans tout l'espace de travail [7, 8, 9]. Bien que ces manipulateurs possèdent le même comportement qu'une

machine outils trois degrés de liberté conventionnelle, ses jambes sont soumises à la flexion et doivent donc être dimensionnées en conséquence, ce qui alourdit la structure et donc diminue les performances dynamiques. Pour finir, il existe d'autres structures de machines, comme par exemple des versions hybrides parallèle-sérielles à l'image de la machine 5 axes Tricept 805 du suédois Neos-Robotics. Nous ne les citerons pas toutes dans cet article. Pour une vision plus complète des machines parallèles existantes, le lecteur pourra se reporter au site internet [11] particulièrement bien documenté sur ce sujet.

2- Conception de l'Orthoglide

2.1 Cahier des charges

Le cahier des charges qui a guidé l'élaboration de l'orthoglide est le suivant. L'objectif était la conception d'une machine 3 axes rapide d'architecture parallèle, extensible à 5 axes, ne présentant pas les inconvénients inhérents aux mécanismes parallèles. Les critères principaux de conception qui ont été retenus sont les suivants : (i) actionneurs fixes de type glissières (diminution des inerties, possibilité d'utiliser des moteurs linéaires, meilleure dissipation thermique), (ii) volume de travail de forme régulière proche d'un cube, (iii) homogénéité des performances dans tout le volume de travail et dans toutes les directions, (iv) symétrie de construction (diminution des coûts), (v) articulations simples (pas de cardan ni de rotule), (vi) pas de flexion dans les jambes.

2.2 Choix de l'architecture

Depuis une vingtaine d'année, de nombreuses études ont été entreprises sur la conception des mécanismes parallèles. Hervé a proposé dans [12-13] un outil pour la synthèse des robots parallèles basés sur la théorie mathématique des groupes de Lie. Dans [6], cet outil a été appliqué à la conception d'un manipulateur parallèle à trois degrés de liberté en translation, appelé Y-STAR (Fig. 3).

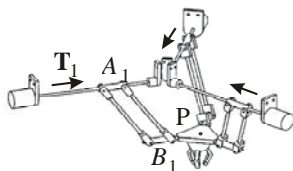


Figure 3 : Manipulateur Y-Star

Récemment, Kong a proposé la génération de manipulateurs parallèles de translation basés sur la théorie des vis [8] et Karouia a fait de même pour les manipulateurs sphériques [10].

Le robot Y-Star, avec les actionneurs hélicoïdaux remplacés par les actionneurs prismatiques suivis par des pivots passifs est un choix commode répondant à ces

contraintes. Nous l'avons choisi comme mécanisme de base du projet d'Orthoglide. La synthèse structurale est maintenant réalisée et nous allons maintenant optimiser le placement des jambes pour répondre à des contraintes d'isotropies.

2.3 Optimisation de l'architecture des jambes

2.3.1 Conditionnement et manipulabilité

Pour une architecture sérielle de machine outil de type PPP, les facteurs de transmission de vitesse et de force sont constants dans tout l'espace de travail. Pour un mécanisme parallèle, en revanche, ces rapports peuvent changer de manière significative dans l'espace de travail parce que le déplacement de l'outil n'est pas linéairement lié au déplacement des actionneurs prismatiques.

En effet, il existe des zones de l'espace de travail dans lesquelles les vitesses et les forces maximales mesurées à l'outil peuvent différer de manière significative des vitesses et des forces maximales que les actionneurs peuvent produire. Ces problèmes se produisent plus particulièrement à proximité des singularités où les efforts dans les jambes peuvent tendre vers l'infini.

Soit \mathbf{p} le vecteur vitesse des articulations motorisées et soit \mathbf{p}_P le vecteur vitesse du point P . Ces deux vecteurs sont reliés par la matrice jacobienne \mathbf{J} définie telle que $\mathbf{p}_P = \mathbf{J} \mathbf{p}$. La matrice \mathbf{J} permet aussi de définir les efforts statiques entre l'outil et les actionneurs. Dans le cas des manipulateurs parallèles, il est plus simple d'étudier la matrice jacobienne inverse, notée \mathbf{J}^{-1} . Pour évaluer la capacité d'un mécanisme parallèle à transmettre les forces ou les vitesses des actionneurs vers l'outil, deux indices de performances complémentaires peuvent être employés : le conditionnement de la matrice jacobienne inverse ainsi que les ellipsoïdes de manipulabilité [14].

Le conditionnement d'une matrice est défini comme étant le rapport entre sa plus grande et sa plus petite valeur propre. Son domaine de variation est entre 1 et plus l'infini. Lorsqu'un mécanisme est en configuration singulière, le conditionnement tend vers l'infini. En configuration isotrope, il est égal à un. Dans cette configuration, la vitesse et la rigidité statique de l'outil sont égales dans toutes les directions. Dans ce cas, le conditionnement mesure l'uniformité de la distribution des vitesses et des efforts autour d'une configuration de l'outil mais ne permet pas de mesurer l'importance des facteurs d'amplification ou d'effort de vitesse.

Une ellipsoïde de manipulabilité est définie par les vecteurs propres de $(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ et les longueurs de ses axes principaux sont les racines carrées de ses valeurs propres que l'on nomme aussi facteurs d'amplification de vitesse (ou de force) [15]. Pour la conception de l'Orthoglide, les facteurs d'amplification de vitesse sont bornés entre 0.5 et 2.

2.3.2 Définition de la configuration isotrope

Pour concevoir une machine outil en translation avec un comportement cinématique proche de celui d'une machine-outil classique, nous imposons les conditions suivantes : (i) il existe une configuration isotrope dans l'espace de travail, (ii) et la valeur des facteurs d'amplification de vitesse est égale à un dans cette configuration.

En écrivant la relation entre les vitesses articulaires $\dot{\mathbf{p}}$ et la vitesse du point P, notée $\dot{\mathbf{p}}$, on obtient

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{B}\dot{\mathbf{p}}$$

avec

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 - \mathbf{a})^T \\ (\mathbf{b}_2 - \mathbf{a}_2)^T \\ (\mathbf{b}_3 - \mathbf{a}_3)^T \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 - \mathbf{a}_1)^T \mathbf{T}_1 & 0 & 0 \\ 0 & (\mathbf{b}_2 - \mathbf{a}_2)^T \mathbf{T}_2 & 0 \\ 0 & 0 & (\mathbf{b}_3 - \mathbf{a}_3)^T \mathbf{T}_3 \end{bmatrix}$$

Pour obtenir $\mathbf{J} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{1}$, nous obtenons deux conditions géométriques sur la position des jambes [10] :

- (i) la première contrainte implique que les vecteurs \mathbf{W}_i soient orthogonaux entre eux.
- (ii) la seconde contrainte implique que, pour chaque jambe, les vecteurs \mathbf{T}_i et \mathbf{W}_i doivent être colinéaires.

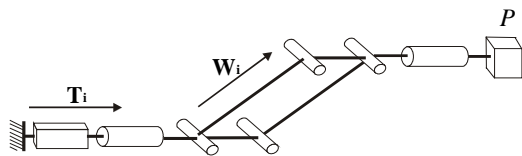


Figure 4: Une jambe du Y-Star

Puisque, dans la configuration isotrope, les vecteurs \mathbf{W}_i sont orthogonaux, ceci implique que les vecteurs de \mathbf{T}_i sont orthogonaux, c'est-à-dire que les articulations prismatiques motorisées sont orthogonales.

2.3.3 Définition de l'architecture des jambes

Le nouvel arrangement géométrique des jambes mène à une singularité du parallélogramme (Figure 5) qui devient un anti-parallélogramme [16-17] : une rotation passive apparaît autour d'un axe orthogonal au plan du parallélogramme. Une solution à ce problème est de changer l'architecture des jambes en réarrangeant les pivots, tout en gardant le même degré de liberté.

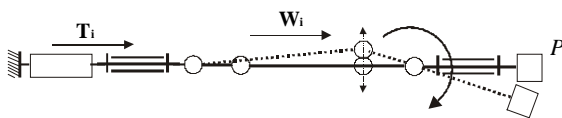


Figure 5 : Singularité du parallélogramme en configuration isotrope

Une seconde architecture de jambes est proposée dans figure 6.

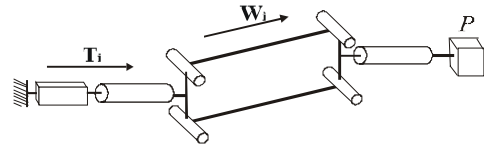


Figure 6 : Seconde architecture de jambe

Dans ce cas, la singularité du parallélogramme dans la configuration isotrope est évitée mais un autre problème surgit : une singularité spéciale de la jambe. Il y a une rotation passive autour du vecteur \mathbf{T}_i . Il s'avère que cette singularité particulière n'est pas détectée par la méthode décrite dans [18]. Aussi, [19] propose une manière de la trouver et nomme ce type de singularité (RPM, IO, II)[14]. RPM signifie qu'un mouvement passif superflu est possible. Ce mouvement est la rotation du parallélogramme autour de l'axe de \mathbf{T}_i (Figure 9). IO et II signifie que dans cette configuration, nous avons simultanément, une vitesse de sortie nulle (outil, $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{0}$) et une vitesse d'entrée nulle (actionneurs, $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{0}$).

Dans la configuration isotrope, chaque jambe peut passivement transmettre une force dont l'axe est orthogonal au plan du parallélogramme ce qui signifie qu'aucune translation du point P le long de cet axe n'est possible (Figure 7, IO et II).

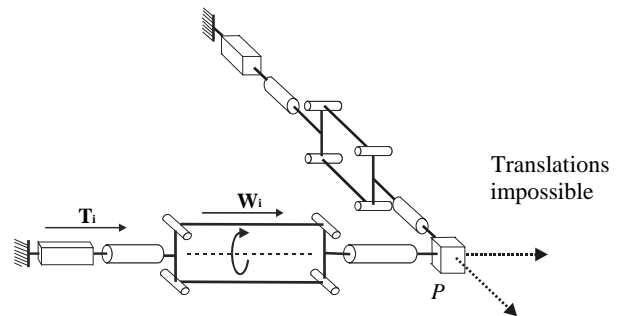


Figure 7 : Configuration singulière des jambes dans la configuration isotrope

En outre, pour avoir un mécanisme à trois degrés de liberté en translation pure (l'outil ne peut pas tourner), les parallélogrammes doivent être orthogonaux l'un à l'autre dans la configuration isotrope. Ainsi, le mécanisme se bloque dans cette configuration parce qu'aucune translation ni rotation de l'outil n'est possible. La dernière version des jambes de l'Orthoglide (Figure 8) évite tous les problèmes précédents mentionnés dans la configuration isotrope et ailleurs : aucune singularité de parallélogramme, et aucune singularité de jambe.

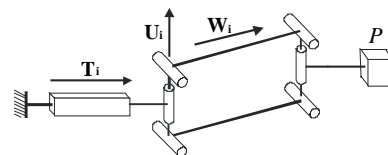


Figure 8 : Architecture définitive des jambes

2.4 Optimisation des longueurs des jambes en fonction d'un espace de travail prescrit

L'espace de travail d'une machine outil conventionnelle 3 axes est généralement donné en fonction de la taille d'un parallélépipède rectangle. Dans le cas de l'Orthoglide, son espace de travail est relativement régulier. C'est l'intersection de trois cylindres dans lequel il est possible d'inscrire un cube dont les côtés sont parallèles aux plans xy , xz et yz respectivement. En raison de la symétrie de l'architecture, l'espace de travail prescrit de l'Orthoglide sera un cube.

Le but de cette section est de définir la position des points bas A_i , des longueurs des jambes $L = A_i B_i$ et des variations articulaires $\Delta\rho$ qui vérifie les contraintes d'amplification de vitesse et en fonction de la taille de l'espace de travail prescrit.

Notre optimisation se décompose en trois étapes:

- Définir la position des points Q_1 et Q_2 placés sur la diagonale $x = y = z$ définissant deux sommets de l'espace de travail prescrit et vérifiant les contraintes sur les facteurs d'amplification de vitesse. Ces points sont associés aux postures de l'Orthoglide les plus proches des configurations singulières [20] (Figure 9 et Figure 10).

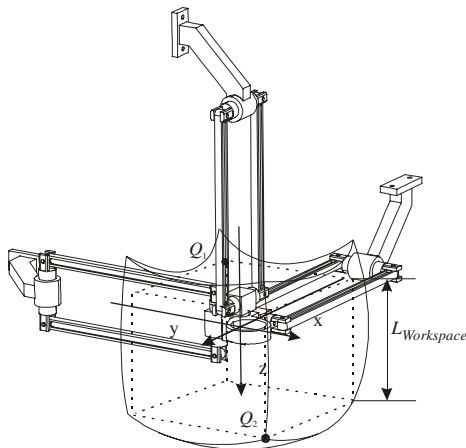


Figure 9 : Position de l'espace de travail prescrit

- Définir la longueur des jambes L à partir des points Q_1 et Q_2 en fonction des dimensions de l'espace de travail prescrit. En étudiant les facteurs d'amplification de vitesse (f_1 et f_2) le long de l'axe $x = y = z$, il est possible d'exprimer la longueur des jambes en fonction des dimensions du cube prescrit (Figure 11) [21]. Pour les facteurs d'amplification de vitesse choisis et pour un espace de travail cubique de 200 mm de côtés, on obtient des longueurs de jambes de 310.6 mm.
- Définir les limites articulaires des articulations prismatiques telles que l'espace de travail prescrit soit complètement inclus dans l'espace de travail de l'Orthoglide (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Pour obtenir la première limite articulaire, nous utilisons le point Q_2 alors que pour

la seconde limite articulaire, c'est le point Q_1 car nous devons tenir compte de la forme sphérique rentrante de l'espace de travail. Pour le prototype de l'Orthoglide, nous avons utilisé des vis à billes dont le déplacement entre butées électriques est de 250 mm avec 10 mm de chaque côté avant la butée mécanique.

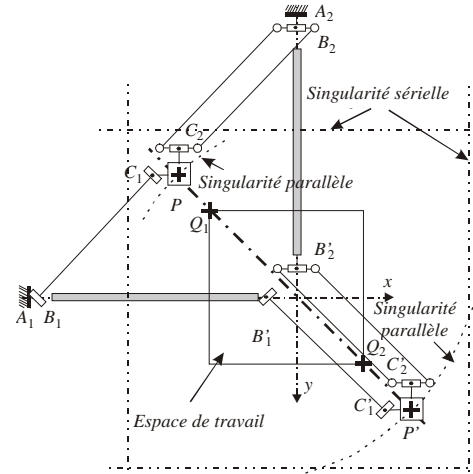


Figure 10 : Position des postures « critiques » dans l'espace de travail de l'Orthoglide

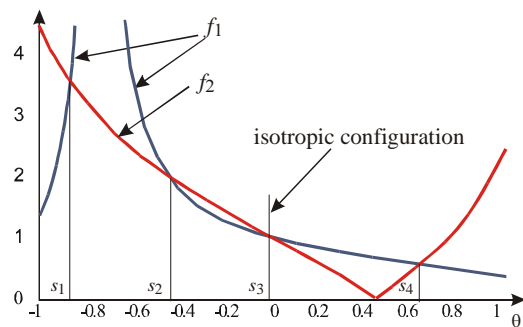


Figure 11 : Evolution des facteurs d'amplification de vitesse le long de l'axe $x = y = z$

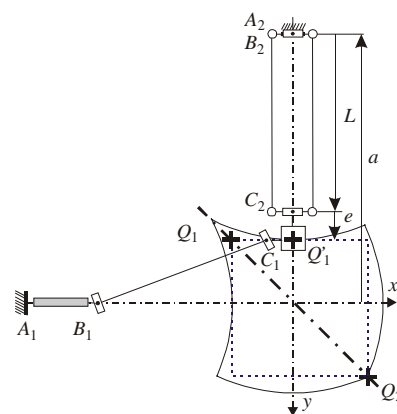


Figure 12 : Définition des limites articulaires.

2.5 Le prototype de l'Orthoglide

Un prototype à échelle réduite a été réalisé à l'IRCCyN en utilisant les résultats précédents (Figure 13). Les trois pièces (1), (2) et (3) ont été conçues pour éviter les

interférences entre les parallélogrammes et les guidages linéaires. L'outil est décalé par rapport au point P pour éviter les collisions entre les parallélogrammes et la pièce usinée. La vitesse maximale de l'outil est de 1.2 m/s et l'accélération maximale est de 14 m/s^2 pour une charge maximale sur l'outil de 2 kg. L'espace de travail peut être représenté par un cube de 200 mm de côté.

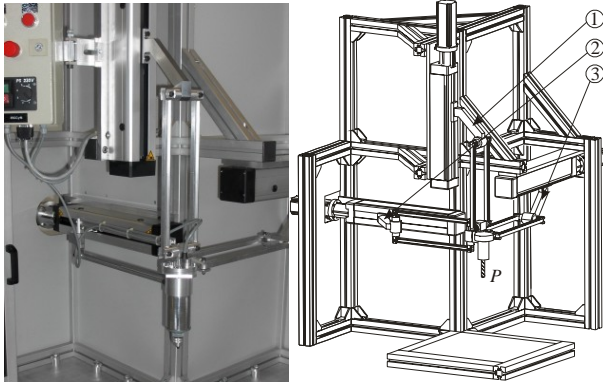


Figure 13 : Prototype et modèle CAO de l'Orthoglide

3- Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les premières étapes de la conception de l'Orthoglide dont la cinématique a été présentée en 2000 [22]. Nous avons utilisé deux contraintes de conception, l'isotropie de la matrice jacobienne ainsi que les facteurs d'amplification de vitesse. Un prototype de ce mécanisme a été construit à l'IRCCyN et sert actuellement de plate-forme aux projets ROBEA MAX et MPP.

4- Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au financement de la Région des Pays de Loire, de l'Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche, de l'Ecole des Mines de Nantes et du C.N.R.S (Projet ROBEA MAX).

Pour la construction du prototype, nous remercions S. Bellavoire, G. Branchu, P. Lemoine et P. Molina pour leur collaboration.

5- Bibliographie

- [1] Tlustý J., Ziegert J., Ridgeway S., "Fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machine tools", *Annals of CIRP*, Vol. 48:1, pp 351-356, 1999.
- [2] Gough V. E., "Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance", *Proceedings Auto Div. Inst. Mech. Eng.*, 1956-1957.
- [3] Stewart D., "A Platform with 6 Degrees of Freedom", *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, 180 (Part 1, 15), pp. 371-386, 1965.
- [4] Merlet J.P., "Les robots parallèles", 2e édition, HERMES, Paris, 1997.
- [5] Clavel R., "DELTA, a fast robot with parallel geometry", *Proceedings of the 18th International*

Symposium of Robotic Manipulators, IFR Publication, pp. 91-100, 1988.

[6] Hervé J.M., Sparacino F., "Star, a New Concept in Robotics", 3rd Int. Workshop on Advances in Robot Kinematics, pp. 180-183, 1992.

[7] Carricato, M., Parenti-Castelli, V., "Singularity-free fully isotropic translational parallel manipulators", *The Int. J. Robotics Res.*, Vol. 21, No. 2, pp. 161-174., 2002.

[8] Kong, X. and Gosselin, C.M., "Type synthesis of linear translational parallel manipulators," in Lenarcic, J. and Thomas, F. (editors), *Advances in Robot Kinematic*, Kluwer Academic Publishers, June, pp. 453-462, 2002.

[9] Kim, H.S. and Tsai, L.W., "Evaluation of a Cartesian manipulator", *Advances in Robot Kinematic*, Kluwer Academic Publishers, June, pp. 21-38, 2002.

[10] Karouia M., Hervé J.M., "A three-dof tripod for generating spherical rotations", *Advances in Robot Kinematic*, Kluwer Academic Publishers, June, pp. 395-402, 2000.

[11] www.parallelemic.org.

[12] Hervé J.M., Sparacino F., "Structural Synthesis of Parallel Robots Generating Spatial Translation", 5th Int. Conf. on Adv. Robotics, IEEE n° 91TH0367-4, Vol.1, pp. 808-813, 1991.

[13] Leguay-Durand S., "Conception et Optimisation de Mécanismes parallèles à Mobilités Restreintes", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, 1998.

[14] Yoshikawa T., "Manipulability of Robotic Mechanisms", *The Int. J. Robotics Res.*, Vol. 4, No. 2, pp. 3-9, 1985.

[15] Angeles, "Fundamentals of Robotic Mechanical Systems", Springer-Verlag, 1997.

[16] Vischer P., Clavel R., "Argos : A Novel 3-DOF Parallel Wrist mechanism", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 1, pp. 5-11, January 2000.

[17] Majou F., Wenger Ph. et Chablat D., "Design of a 3-Axis Parallel Machine Tool for High Speed Machining: The Orthoglide", 4ème Conférence Internationale sur la Conception et la fabrication Intégrées en Mécanique, IDMMME, Clermont-Ferrand, France, 14 au 16 mai 2002.

[18] Gosselin C., Angeles J., "Singularity analysis of Closed-Loop Kinematic chains", *Proc. IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, pp. 281-290, June 1990.

[19] Zlatanov D., Bonev L., Gosselin C., "Constraint singularities", www.parallelemic.org, Laboratoire de robotique de l'Université Laval, Canada, July 2001.

[20] Chablat D., Wenger Ph. et Merlet J-P, "Workspace Analysis of the Orthoglide using Interval Analysis", 8th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Kluwer Academic Publishers, Juin 2002.

[21] Chablat D., Wenger Ph., "Architecture Optimization of a 3-DOF Parallel Mechanism for Machining Applications, the Orthoglide", *IEEE Transactions On Robotics and Automation*, Vol. 19/3, pp. 403-410, Juin, 2003.

[22] Wenger Ph, Chablat D., "Kinematic Analysis of a New Parallel Machine Tool: the Orthoglide", 7th

International Symposium on Advances in Robot
Kinematics, Juin 2000.

Optimisation et contrôle de la configuration d'un rover articulé

Faïz Ben Amar, Christophe Grand, Frédéric Plumet, Philippe Bidaud
Laboratoire de Robotique de Paris, Université Pierre et Marie Curie - CNRS
amar@robot.jussieu.fr

Résumé

Cet article aborde le problème de l'optimisation, par la reconfiguration, des performances d'un système articulé à roues lors de son déplacement sur un sol irrégulier. On étudiera l'incidence de la configuration du système sur les performances de locomotion notamment la stabilité, la traction et la manoeuvrabilité. Nous développerons pour cela une commande cinématique de la posture du robot permettant l'asservissement de celle-ci autour de la configuration dite optimale. Ces travaux seront illustrés et validés sur une cinématique particulière d'un rover à roues et à pattes.

1 Introduction

Les robots mobiles tout terrain trouvent leurs applications de nos jours dans plusieurs domaines. On identifie principalement l'exploration terrestre (polaire et volcanologique) ou planétaire (lune, mars) ainsi que les applications militaires ou civiles pour l'observation et la surveillance dans des environnements naturels, urbains voir déstructurés. Les sols sur lesquels doivent évoluer ces engins présentent par endroit des difficultés de traversabilité majeures. Ces difficultés se traduisent à la fois en terme de géométrie de la surface (discontinuités, relief 3D, densité de roches...) et de nature physique du sol (sol meuble, sol non-cohésif, sable, éboulis,...). Ces types d'environnement complexe nécessitent des systèmes de locomotion à haute capacité de mobilité et de franchissement. Les systèmes hybrides qui combinent à la fois des organes roulants (roues ou chenilles) avec des mobilités internes conjuguent à la fois les avantages des systèmes à roues et ceux des systèmes à pattes à savoir la rapidité de déplacement pour le premier et la capacité de franchissement pour le second. Ces systèmes roue-patte illustrés par le robot Hylos [4][5] ou le robot Hybtor (ou Workpartner)[6] sont dits à haute mobilité, du fait de leur redondance cinématique. Ils introduisent un concept générique de locomotion appelé "rolking". Outre le mode basique par roulement (adapté au route, terrain plat avec des faibles pentes et de faibles irrégularités), on distingue pour ces systèmes le mode roulement avec reconfiguration (adapté au franchissement de fortes pentes et dévers), le mode péristaltique (adapté au passage de sols non cohésifs) ou encore des modes ambulatoires basés sur la définition d'allure de déplacement plus ou moins complexe. Par ailleurs, la sélection d'un mode de locomotion approprié aux conditions locales d'environnement requiert des moyens d'identification en-ligne des paramètres physico-géométriques du sol sur lequel évolue le robot.

Ces capacités d'adaptation s'expriment au travers des boucles de commande haut niveau par un choix adapté du mode de déplacement mais aussi dans les boucles bas niveau, avec par exemple, l'ajustement des couples de traction en fonction de la nature physique du sol ou encore la correction de la configuration du robot en fonction du dévers local du sol.

Différentes cinématiques de systèmes à roues et ayant des mobilités internes actives ont été réalisées dans divers laboratoires. On les retrouve principalement au JPL/NASA avec le robot SRR [7] qui a la capacité de contrôler son angle de roulis lors d'évolution sur des pentes et des dévers ou le Gofor [11] qui est mini-rover à 4 pattes-roues ayant chacune un degré de liberté actionné lui permettant la correction de son attitude en tangage et roulis. Les mobilités internes de ces systèmes ont été exploitées par une recherche de la configuration qui optimise la marge de stabilité pour le premier et la répartition des charges pour le second. La cinématique du Marsokhod Lama à 6 roues motrices présente des mobilités internes entre les essieux lui offrant un mode de déplacement péristaltique [2] [1]. On retrouve cette cinématique avec plus de mobilités actives entre les essieux sur le Marsokhod Iares à 17 ddl [8] et sur le WAAV à 12 ddl [10]. Pour ce dernier, l'exploitation de ces mobilités a fait l'objet de travaux sur les capacités de recouvrement suite à divers sortes de retournement. Par opposition à ces systèmes à suspension active, les systèmes passifs peuvent offrir des performances intéressantes en terme de franchissement dans certaines situations particulières. Ainsi, la cinématique du Shrimp [3] est particulièrement appropriée au franchissement de marches ou d'escaliers.

Cet article traite de l'optimisation et de la commande de la posture d'un robot ayant une cinématique roue-patte lors d'un déplacement par roulement sur une surface de sol "irrégulière" sans fortes discontinuités. Typiquement, c'est une surface formée de succession de pentes et de dévers dont la taille est supérieure à la taille du véhicule. La présence de discontinuités géométriques importantes introduit nécessairement une discontinuité de la cinématique du roulement et exigent donc un traitement particulier qui ne sera pas abordé pas dans cet article. Cette procédure sera appliquée au cas du robot Hylos. Pour cela, nous commencerons par définir les paramètres de posture de ce robot, qu'on cherchera par la suite à "optimiser" en vue d'une maximisation des performances de locomotion du système. Cette pos-

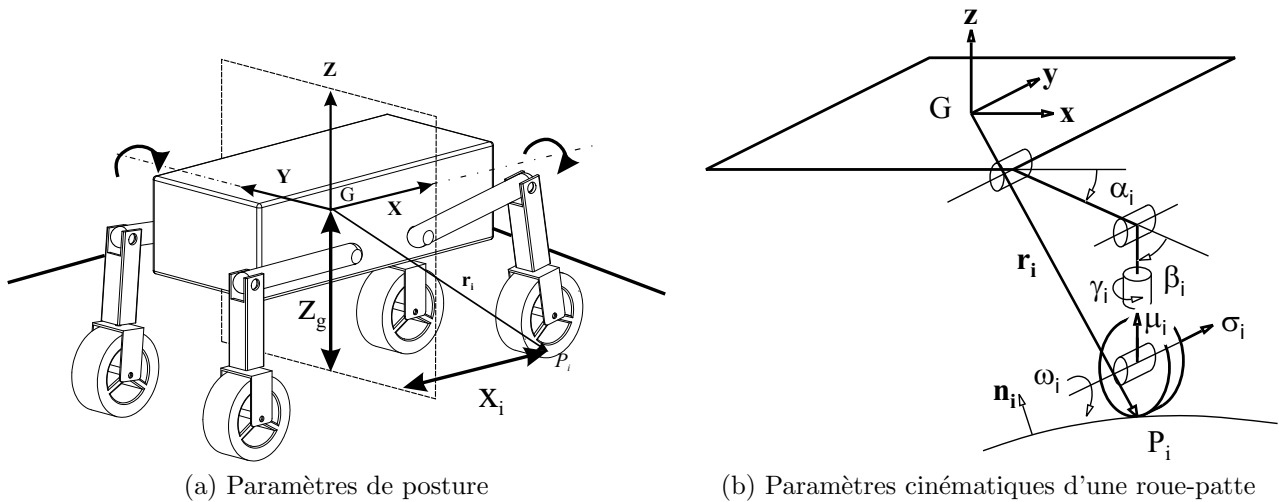


FIG. 1 – Cinématique et paramétrage du rover Hylos

ture sera commandée sur la base du modèle cinématique inverse du robot et fera l'objet de la section 3. Enfin, nous présenterons quelques résultats illustrant la commande de la posture et l'apport de la reconfiguration cinématique lors de mouvement sur des sols irréguliers.

2 Définition de la posture

2.1 Paramètres de posture d'Hylos

Hylos est une plate-forme hybride à 4 pattes à roues (figure 1(a)). Chaque patte est articulée par 2 liaisons pivot à axes parallèles, actionnées par des systèmes pantographiques (non représentés sur la figure), et supporte à son extrémité une roue directrice et motrice. La mobilité générale de ce système est égale à 10 ddl. Elle est calculée à partir de la différence entre le nombre de paramètres cinématiques ($28 = 16$ ddl de mobilités internes + $4 \cdot 3$ ddl par contact roue-sol supposé sans glissement) et le nombre d'équations cinématiques ($18 = 6 \cdot 3$, 3=nombre de chaînes cinématiques indépendantes dans le graphe du mécanisme). Les 10 paramètres cinématiques de l'espace opérationnel correspondent aux 6 paramètres de vitesse de la plate-forme ($\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}$) et à 4 autres paramètres internes de posture. Nous avons choisi pour ces derniers les variations des 4 demi-empattements x_i de chacune des roues (distance suivant l'axe longitudinal entre le centre de la plate-forme et le point de contact) (fig.1(a)). Ainsi, le vecteur des paramètres géométriques correspondant à la définition de la posture est $\mathbf{p} = (\varphi, \psi, z_g, x_1, x_2, x_3, x_4)^t$ où φ est l'angle de roulis, ψ est l'angle de tangage, z_g est la hauteur du centre de la plate-forme par rapport au sol définie comme étant la moyenne des hauteurs des points de contact z_i ($z_g = \frac{\sum_i z_i}{4}$) et x_i est appelé le demi-empattement du point de contact P_i de coordonnées dans (x_i, y_i, z_i) dans le repère de la plate-forme.

2.2 Optimisation de la posture

Le problème de l'optimisation de la posture peut être traité en considérant plusieurs critères de performance de locomotion qui expriment la stabilité, la traction, l'énergie, la répartition des efforts de contact, etc... L'analyse proposée ici est élaborée sur la base d'hypothèse de mouvement quasi-statique. On suppose également que le centre de masse est quasiment au centre de la plate-forme et ne varie pas quand le robot change de posture. D'une façon générale, la répartition des forces normales aux contacts exprime la stabilité du système (à 4 contacts), alors que la répartition des forces tangentielles représente la capacité de traction ou encore la consommation énergétique. De plus, l'optimisation de la posture doit tenir compte des contraintes liées à l'espace de travail des pattes et de la transmission des efforts dans celles-ci. Cette optimisation doit tenir compte également de la capacité d'identification de certains paramètres d'interaction avec l'environnement. Cependant, la répartition des efforts au sol dépend principalement des normales au sol qui sont assez difficiles à mesurer ou à estimer, il est donc difficile d'adapter la posture du système aux variations des normales aux contacts. De plus, cela nécessiterait des vitesses importantes des systèmes de suspension et aurait tendance à augmenter la consommation énergétique. L'objet de la méthode de reconfiguration proposée est de mettre en oeuvre une adaptation aux variations d'élévation des zones de contacts au sol. L'élévation de chaque point de contact peut être estimée aisément à partir de la configuration de la plate-forme et des angles articulaires dans chacune des pattes. Pour cela, nous procédons ici à une définition d'une posture et son évaluation en supposant que le robot est localement sur un plan incliné qui est un plan moyen calculé à partir des 4 points de contact. On définit η_s l'angle de la ligne de plus forte pente de ce plan et θ_s l'orientation de l'axe du robot par rapport à cette ligne (voir figure 2).

La voie du robot Hylos (distance latérale entre les roues)

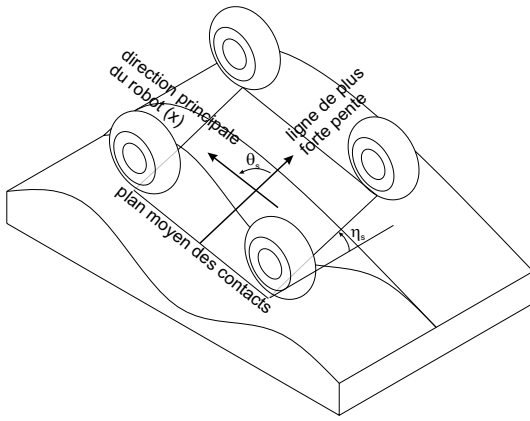


FIG. 2 – Définition des angles de pente d’un plan moyen.

étant constante, une équi-répartition des charges (forces verticales) entre le train droit et le train gauche du robot impose un angle de roulis nul de la plate-forme. Cependant, le système est redondant dans le plan sagittal et offre plusieurs solutions pour la condition d’équi-répartition entre l’avant et l’arrière, il suffit simplement que les distances horizontales d entre le centre de masse et les points de contact soient les mêmes entre l’avant et l’arrière (fig.3). Afin d’obtenir des configurations proche de la configuration nominale du robot qui respecte la transmission des efforts dans les pattes ainsi que la manoeuvrabilité du robot (axe de direction ayant un angle de chasse par rapport au sol inférieur à 30 deg.), on impose que la direction principale du robot (x) soit parallèle à la ligne du plan du sol contenue dans le plan longitudinal du robot. Cette ligne est inclinée par rapport au plan horizontal d’un angle ψ' égale à

$$\psi' = \arcsin(\cos(\theta_s) \sin(\eta_s)) \quad (1)$$

Les angles η_s, θ_s sont estimés à partir du modèle géométrique direct et la mesure des angles de roulis et de tangage par des inclinomètres. En choisissant une hauteur de garde au sol z_g et un empattement nominal e_n , la posture optimale qui offrent l’équi-répartition des charges est :

$$p^* = (0, \psi', z_g, \frac{e_n}{2} - |z_g| \tan \psi', \frac{e_n}{2} - |z_g| \tan \psi', -\frac{e_n}{2} + |z_g| \tan \psi', -\frac{e_n}{2} + |z_g| \tan \psi') \quad (2)$$

Ces postures sont illustrées sur la figure (3) pour une pente d’angle $\eta_s = 30$ deg. et pour différentes valeurs d’orientation $\theta_s = \{0, 45, 90\}$ deg. Ces postures donnent des forces normales identiques. Il en est de même pour les forces tangentielles si les propriétés des contacts sont homogènes et si les actionneurs des roues sont identiques. Ces postures peuvent être améliorées en tenant compte de la contrainte de manoeuvrabilité (angle de chasse faible). On peut diminuer voir annuler l’angle de chasse des roues avant afin d’utiliser celles-ci comme seul train directeur du véhicule comme illustré

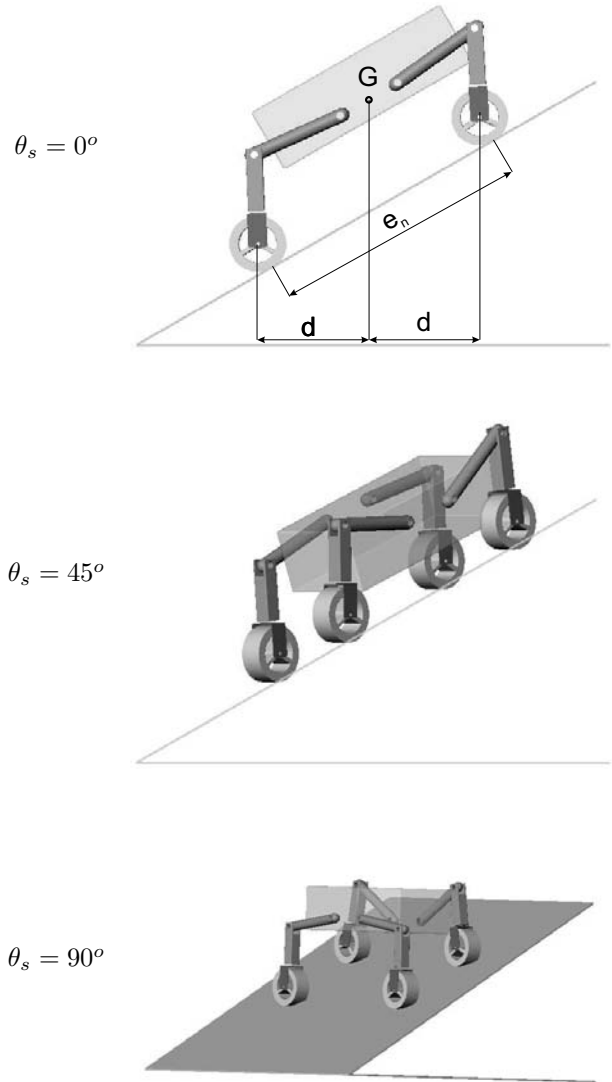


FIG. 3 – Postures sur pente avec différentes orientations offrant une équi-répartition des forces normales

sur la figure (4).

La figure (5) compare les limites de stabilité (définies par une force normale nulle, $F_n = 0$) et les limites de contrôlabilité (définies par le cône de frottement, $|F_t| = \mu F_n$) entre les deux cas avec ou sans reconfiguration sur des sols en pentes. Ces courbes sont représentées sur des graphes polaires où η_s et θ_s sont le rayon et l’angle du système de coordonnées polaires. On remarque dans le cas de la reconfiguration l’augmentation nette de ces limites ainsi qu’un caractère quasi-isotropique de la stabilité et de la traction.

3 Commande de la posture

3.1 Modèle cinématique inverse

Dans cette partie, nous allons d’abord établir la forme inverse du modèle cinématique général du robot Hylos sur un sol irrégulier paramétré afin de l’exploiter par la

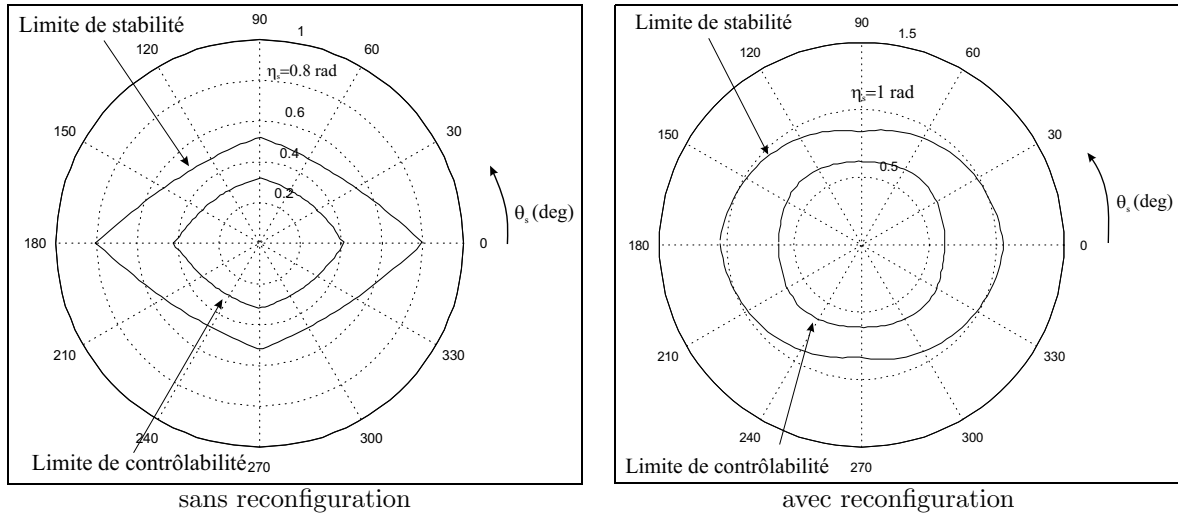


FIG. 5 – Evaluation de la posture en terme de stabilité et de traction et comparaison avec une posture sans reconfiguration

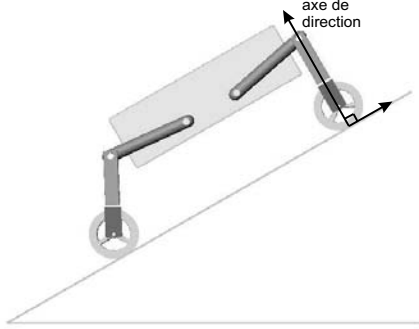


FIG. 4 – Correction de la posture (cas de $\eta = 30$ deg. et $\theta = 0$) compte tenue de la contrainte de manoeuvrabilité.

suite dans la définition d'une loi de commande de la posture. On note $\mathcal{R}=(G,\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$ le repère lié à la plateforme et $\mathcal{R}_i=(P_i,\mathbf{t}_i,\mathbf{l}_i,\mathbf{n}_i)$ un repère lié au $i^{\text{ème}}$ contact où \mathbf{n}_i est la normale au sol, \mathbf{t}_i est le vecteur tangent dans le plan de la roue $\mathbf{t}_i = \frac{\boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{n}_i}{\|\boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{n}_i\|}$ et $\mathbf{l}_i = \mathbf{n}_i \times \mathbf{t}_i$ (voir figure 1(b)). La vitesse du point de contact P_i par rapport au sol s'exprime par

$$\mathbf{v}_{(P_i/\mathcal{R}_0)} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + \mathbf{v}_{(P_i/\mathcal{R})} \quad (3)$$

où $(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})^t = \mathbf{v}_p$ est le vecteur des composantes du torseur cinématique de la plateforme par rapport au sol et \mathbf{r}_i est le vecteur position du point P_i dans \mathcal{R} . En traduisant la condition de roulement sans glissement au point P_i définie par $\mathbf{v}_{(P_i/\mathcal{R}_0)} = \mathbf{0}$, l'équation (3) devient :

$$-(\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i) = \mathbf{v}_{(P_i/\mathcal{R})} \quad (4)$$

Compte tenue de la cinématique d'une patte à roue du robot Hylos (fig.1(b)), on peut écrire

$$\mathbf{v}_{(P_i/\mathcal{R})} = \dot{\alpha}_i \mathbf{y} \times \mathbf{a}_i + \dot{\beta}_i \mathbf{y} \times \mathbf{b}_i + \dot{\gamma}_i \boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{c}_i + \omega_i \boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{d}_i \quad (5)$$

où α_i, β_i désignent les paramètres articulaires de la patte, γ_i, ω_i sont l'angle de braquage et la vitesse de rotation de la roue, $\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\sigma}_i$ sont l'axe de direction et l'axe de la roue, $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{c}_i, \mathbf{d}_i$ sont les vecteurs qui relient les points des axes des liaisons au point de contact.

On suppose que l'axe de direction est quasi-normal au sol, ce qui implique que le produit $\boldsymbol{\mu}_i \times \mathbf{c}_i = \boldsymbol{\mu}_i \times -r_w \mathbf{n}_i$ est quasi nul (r_w est le rayon de la roue). Cela se traduit par une mobilité partielle au niveau de la liaison de direction ($\dot{\gamma}_i$ n'a pas d'incidence sur la vitesse instantanée de la plateforme). De même, on suppose que la normale au sol est dans le plan de la roue, donc $\omega_i \boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{d}_i = \omega_i \boldsymbol{\sigma}_i \times -r_w \mathbf{n}_i = -r_w \mathbf{t}_i$. On introduit également la vitesse d'adaptation de la patte \mathbf{v}_i définie par

$$\mathbf{v}_i = \dot{\alpha}_i \mathbf{y} \times \mathbf{a}_i + \dot{\beta}_i \mathbf{y} \times \mathbf{b}_i = \mathbf{J}_i(\dot{\alpha}_i, \dot{\beta}_i)^t \quad (6)$$

Ce vecteur appartient au plan (\mathbf{x}, \mathbf{z}) . La matrice \mathbf{J}_i est la jacobienne de la patte par rapport à la plateforme et exprimée au point de contact. Considérant les hypothèses précédentes, l'équation cinématique de la chaîne devient

$$\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + \mathbf{v}_i = r_w \omega_i \mathbf{t}_i \quad (7)$$

Le mouvement latéral et de lacet du véhicule est obtenu à partir du braquage et du roulement de la roue. La projection de cette équation vectorielle sur $\mathbf{l}_i = \boldsymbol{\sigma}_i$ exprimant la condition de non-glissement latéral traduit le caractère non-holonome spécifique aux systèmes utilisant des roues conventionnelles. Celle-ci s'exprime par

$$\boldsymbol{\sigma}_i^t (\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + \mathbf{v}_i) = 0 \quad (8)$$

On suppose que cette équation est satisfaite à chaque instant par la détermination de l'angle de braquage cinématiquement compatible avec les vitesses des

corps du système. Comme cela a déjà été précisé, on introduit dans ce modèle $\dot{x}_i = \mathbf{x}^t \mathbf{v}_i$ afin de contrôler le paramètre de posture x_i . De même, on pose $\dot{z}_i = \mathbf{z}^t \mathbf{v}_i$ la variation de la hauteur de la patte. Le problème cinématique inverse consiste alors à déterminer les paramètres articulaires $(\dot{\alpha}_i, \dot{\beta}_i, \gamma_i, \omega_i)$ pour des vitesses opérationnelles données $(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4)$.

La projection de l'équation (7) sur le vecteur unitaire $\mathbf{u}_i = \frac{\boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{z}}{\|\boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{z}\|}$, donne la vitesse de rotation de la roue

$$r_w \omega_i = \frac{\mathbf{u}_i^t (\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + \dot{x}_i \mathbf{x})}{\mathbf{u}_i^t \mathbf{t}_i} \quad (9)$$

Cette équation est singulière quand \mathbf{t}_i et \mathbf{u}_i sont perpendiculaires (par exemple, pour un contact frontal $\mathbf{n}_i = \pm \mathbf{x}$ et $\gamma_i = 0$, dans ce cas $\mathbf{t}_i = \pm \mathbf{z}$, $\boldsymbol{\sigma}_i = \mathbf{y}$, donc $\mathbf{u}_i = \mathbf{x}$). Ce cas ne rentre pas dans le cadre de cette étude puisqu'on s'intéresse à des terrains irréguliers sans grande discontinuité. La connaissance de ω_i permet le calcul de \dot{z}_i en utilisant l'équation :

$$\dot{z}_i = \mathbf{z}^t (-\mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + r_w \omega_i \mathbf{t}_i) \quad (10)$$

Maintenant, on peut calculer les vitesses articulaires de la patte en utilisant

$$(\dot{\alpha}_i, \dot{\beta}_i)^t = \mathbf{J}_i^{-1} \mathbf{v}_i = \mathbf{J}_i^{-1} (\dot{x}_i, \dot{z}_i)^t \quad (11)$$

Enfin, la résolution de l'équation (8) conduit à la relation suivante de l'angle de braquage :

$$\gamma_i = \arctan \left(\frac{w_{i_y}}{w_{i_x} S_{\alpha_i \beta_i} - w_{i_z} C_{\alpha_i \beta_i}} \right) \quad (12)$$

avec $w_{i_x} = v_x + \omega_y z_i - \omega_z y_i + \dot{x}_i$, $w_{i_y} = v_y + \omega_z x_i - \omega_x z_i$ et $w_{i_z} = v_z + \omega_x y_i - \omega_y x_i + \dot{z}_i$ sont les composantes de vitesse du centre de la roue par rapport au sol. La forme générale de ce modèle inverse est utilisée pour la commande de la posture. Elle peut être également utilisée pour le suivi de la trajectoire.

3.2 Loi de commande de la posture

Lors d'évolution sur une surface irrégulière, le robot doit maintenir sa posture autour d'une posture désirée \mathbf{p}^* . Une simple loi de commande proportionnelle est utilisée afin d'asservir la posture du robot sur celle désirée. Celle-ci s'écrit :

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{K}_p (\mathbf{p}^* - \mathbf{p}) \quad (13)$$

où $\dot{\mathbf{p}} = (\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{z}_g, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4)^t$ et \mathbf{K}_p une matrice diagonale positive.

Ceci permet de calculer les vitesses de posture de la plate-forme, en utilisant les équations :

$$\begin{cases} v_z = -\dot{z}_g + \omega_y \frac{\sum_i x_i}{4} - \omega_x \frac{\sum_i y_i}{4} \simeq -\dot{z}_g \\ \omega_x = \dot{\varphi} - \dot{\theta} \sin \psi \simeq \dot{\varphi} \\ \omega_y = \dot{\psi} \cos \varphi + \dot{\theta} \cos \psi \sin \varphi \simeq \dot{\psi} \cos \varphi \end{cases}$$

Dans la première équation, on a supposé que le centre de contact projeté dans un plan horizontal est proche de celui du centre de la plate-forme. Dans les deux équations suivantes, on a négligé l'effet de la vitesse de rotation de lacet $\dot{\theta}$. Ces paramètres de posture et les autres paramètres de vitesses $(v_x, v_y, \dot{\theta})^t$ donnés par le module de suivi de trajectoire sont par la suite utilisés comme entrées du modèle cinématique inverse qui doit donc calculer à partir des équations (9, 11, 12) les consignes en vitesses et en position des actionneurs. Ces équations nécessitent la connaissance des normales au sol aux contacts. L'équation (7) montre que \mathbf{t}_i peut être estimée à partir des mesures de la vitesse de la plate-forme et celle des vitesses articulaires $(\dot{\alpha}_i, \dot{\beta}_i)$. Cependant, la mesure des vitesses linéaires de la plate-forme n'est pas simple puisque l'intégration des mesures des accéléromètres pose le problème de dérive dans le temps. Pour les expérimentations faites sur Hylos, les normales aux contacts sont considérées identiques et sont calculées à partir d'un plan moyen des points de contact.

4 Résultats

Cette méthode de commande de posture a été implantée sous un simulateur dynamique. La figure (figure 6) est une vue des simulations du robot Hylos en évolution sur un terrain irrégulier. Le déplacement se fait en ligne droite à vitesse constante de 30 cm/s. Cette simulation a été comparée à l'évolution du rover dans le cas sans reconfiguration et avec les mêmes conditions initiales et aux limites.

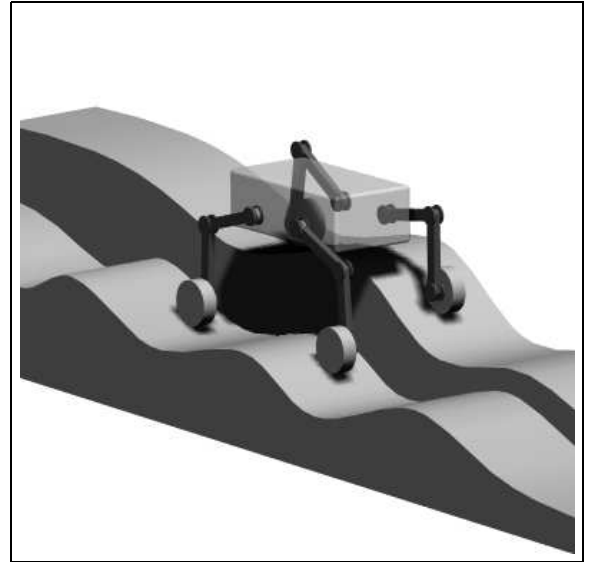


FIG. 6 – Vue du simulateur dynamique

La figure (7) montre l'évolution des marges de stabilité, définie par Papadopoulos [9], pour les 2 modes de déplacement. On remarque bien la relative constance de celle-ci dans le cas avec contrôle de posture. On note également cette propriété pour les efforts normaux de contact (voir figure 8).

La partie expérimentale entreprise sur le robot Hylos est décrite en détail dans la partie démonstrateur des

actes de ces journées. Les résultats obtenus permettent de valider d'une part la faisabilité de la loi de commande et d'autre part les capacités cinématiques intrinsèques du système en terme de reconfiguration. Ces expérimentations seront complétées par une instrumentation du système avec des capteurs d'efforts à 3 axes chacun. Ils sont disposés dans les structures des pattes et permettent la mesure des 3 composantes de forces à chaque contact. Ces mesures permettront d'une part une meilleure adaptation du système au sol par la mise en oeuvre d'une boucle de maintien de contact et d'autre part une appréciation de la répartition réelle des forces normales et tangentielles aux contacts qui sont comme on l'a déjà évoqué des indices précieux de la stabilité et de la capacité de traction du système.

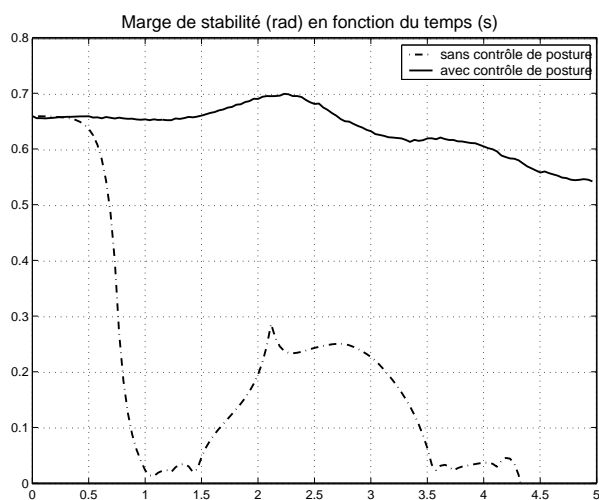


FIG. 7 – Comparaison des marges de stabilité dans les deux cas

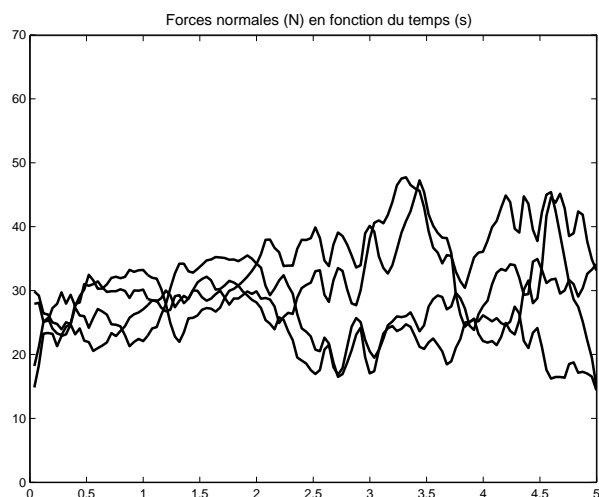


FIG. 8 – Forces normales aux contacts dans le cas avec reconfiguration

5 Conclusion

Nous avons développé dans cet article une méthode d'optimisation de la configuration d'un robot à roues

et à pattes lors de son évolution sur des sols irréguliers. Cette méthode tente de prendre en compte plusieurs critères notamment de stabilité et de traction ainsi que des contraintes liés à la cinématique de la patte et à la dirigeabilité du robot. Nous avons présenté une loi de commande de la posture utilisant un modèle cinématique du robot et quelques capteurs simples comme des inclinomètres. Ceci a été validé en simulation et en expérimentation sur le rover Hylos. Même si la modélisation cinématique est restée générale pour prendre toute la mobilité du système, l'étude du suivi de trajectoires doit être menée afin de soulever les problèmes éventuels de couplage entre ce module et celui de la reconfiguration. Ce travail sera également poursuivi par l'étude d'autres modes de déplacement : d'une part le franchissement de fortes discontinuités et la recherche de configurations assurant le meilleur passage des difficultés en terme de stabilité et de progression, et d'autre part le déplacement en mode séquentiel basé sur divers types d'allures symétriques comme celui du mode péristaltique du robot Lama ou asymétriques à la manière de la marche d'un quadrupède.

Références

- [1] G. Andrade, F. BenAmar, Ph. Bidaud, and R. Chatila. Modeling wheel-sand interaction for optimization of a rolling-peristaltic motion of a marsokhod robot. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 576–581, 1998.
- [2] G. Andrade Barroso. *Modélisation et Adaptation du Mouvement de Robot Tout-Terrain*. PhD thesis, Université Paris VI, 2000.
- [3] T. Estier, Y. Crausaz, B. Merminod, M. Lauria, R. Piguët, and R. Siegwart. An innovative space rover with extended climbing abilities. In *International Conference on Robotics in Challenging Environments*, Albuquerque, USA, 2000.
- [4] C. Grand, F. BenAmar, and P. Bidaud. Kinematic analysis and stability optimisation of a reconfigurable legged-wheeled mini-rover. In *SPIE Conference on Unmanned ground-vehicle technology IV*, pages 295–303, Orlando, USA, 2002.
- [5] C. Grand, F. BenAmar, F. Plumet, and P. Bidaud. Stability control of a wheel-legged mini-rover. In *5th International Conference on Climbing on Walking Robots*, pages 323–331, Paris, France, 2002.
- [6] A. Halme, I. Leppänen, S. Salmi, and S. Ylönen. Hybrid locomotion of a wheel-legged machine. In *International Conference on Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, 2000.
- [7] K. Iagnemma, A. Rzepniewski, S. Dubowsky, and P. Schenker. Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrain. *Autonomous Robots*, 14(1) :5–16, 2003.
- [8] M. Maurette. Mars rover autonomous navigation. *Autonomous Robots*, 14(2-3), 2003.
- [9] E.G. Papadopoulos and D.A. Rey. A new measure of tipover stability for mobile manipulators. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3111–3116, 1996.
- [10] S.V. Sreenivasan and K.J. Waldron. Displacement analysis of an actively articulated wheeled vehicle configuration with extensions to motion planning on uneven terrain. *Transactions of the ASME*, 118(6) :312–317, 1996.
- [11] S.V. Sreenivasan and B.H. Wilcox. Stability and traction control of an actively actuated micro-rover. *Journal of Robotics Systems*, 11(6) :487–502, 1994.

Afférences sensori-motrices et stabilité posturale

Pr Philippe Thoumié

Service de Rééducation Neuro-orthopédique
Hôpital ROTHSCILD 33 Boulevard de Picpus 75012 PARIS

philippe.thoumie@rth.ap-hop-paris.fr

Résumé

Le contrôle de la posture et de l'équilibre est une fonction complexe régulée de façon automatique par le système nerveux et qui est mise à contribution à tout moment dans l'activité humaine. Ce contrôle s'organise sous la forme d'une commande motrice en fonction de paramètres variés que sont la tâche à accomplir, la stabilité du support et les capacités fonctionnelles du sujet. Les afférences périphériques codant pour les référentiels internes (égocentrés) ou externes (géo ou allocentrés) contribuent à la régulation de cette fonction; elles se caractérisent par une sensibilité et des délais d'activation propres. Il est possible à partir de modèles expérimentaux variés que nous rapporterons ici d'approcher les règles qui président à l'élaboration et l'adaptation des activités posturales.

Mots Clef

Equilibration, Afférences.

1 Introduction

Les mécanismes qui sous tendent le contrôle de la posture de l'équilibre sont complexes car ils mettent à contribution des structures très variées du système nerveux. La perturbation des voies ou des centres impliqués dans ce contrôle à l'occasion de pathologies caractérisées ou du vieillissement physiologique, contribue à la genèse de troubles de l'équilibre et de chutes. Nous proposons ici un rappel de physiologie de l'équilibration dont le but est d'aider à mieux caractériser les déficiences responsables de ces troubles et de jeter les bases d'une prise en charge raisonnée des patients chuteurs.

2 Définitions

Une posture correspond au maintien de toute ou partie du corps dans une position de référence. Le contrôle de l'équilibre en position debout et appui bipodal est un des aspects particuliers du contrôle postural particulièrement développé chez l'homme, en raison de l'instabilité naturelle de cette position. C'est à partir de cette position debout érigée que les réactions au déséquilibre sont les plus complexes et s'opposent à la tendance naturelle de

la chute. Celle ci peut être interprétée comme un échec des réactions de correction de l'équilibre.

3 Bases neurophysiologiques du contrôle postural

Le contrôle de l'équilibre fait appel à des effecteurs musculaires commandés par des structures du système nerveux central, elles mêmes connectées à des afférences périphériques, l'ensemble constituant un système de régulation fortement automatisé (2).

Les structures du SNC mises en jeu dans le contrôle postural sont de façon privilégiée le tronc cérébral, le cervelet, les ganglions de la base et les hémisphères cérébraux au niveau de l'aire motrice supplémentaire et du lobe pariétal droit.

Les effecteurs musculaires sont répartis sur l'ensemble de la musculature tant axiale que périphérique. Pour assurer la partie active du contrôle postural et de l'équilibre, ils doivent s'opposer à l'action de la pesanteur sur les segments de membre superposés. Ils exercent ainsi ces forces soit de façon passive par la mise en jeu de leur composante viscoélastique, soit de façon active par leur recrutement le plus souvent automatique.

Les afférences périphériques regroupent les afférences proprioceptives (neuro-musculaires), extéroceptives (cutanées), labyrinthiques et visuelles.

Il est possible de caractériser leur activation à partir de leur délai de mise en jeu et leur sensibilité au mouvement.

3.1 Le délai de mise en jeu :

Les afférences du fuseau neuro-musculaire sont les plus rapidement mises en jeu. Ainsi lors du déséquilibre provoqué par le déplacement d'une plate-forme mobile la dorsiflexion brutale de la cheville entraîne l'apparition, au niveau du Triceps Sural d'un patient en appui bipodal, d'une activité musculaire de courte latence (36-45 ms) puis de moyenne latence (75-90 ms).

Les afférences vestibulaires sont responsables lors de la chute verticale de l'apparition d'une activité électromyographique dans les membres inférieurs dont la latence est de 75 ms.

Les afférences visuelles ne contribuent à moduler les réponses à la déstabilisation qu'au delà de 100 millisecondes

3.2 La sensibilité au déplacement

Une étude réalisée sur plate-forme dynamique par Fitzpatrick et McCloskey (3) a bien montré que la sensibilité au déplacement en position debout était de l'ordre de 10 minutes d'angle (0.003 radian). Elle correspond à la sensibilité proprioceptive des membres inférieurs seuls, issue des fuseaux neuromusculaires. Le seuil visuel était plus élevé à vitesse de déplacement basse, identique à vitesse de déplacement élevée. Le seuil vestibulaire était le plus élevé (4 degrés), ce qui avait déjà été établi par des travaux anciens.

4 Evaluation instrumentale de la posture et de l'équilibre

Les concepts concernant la régulation de l'équilibre ainsi que les mesures instrumentales des paramètres d'équilibration se sont développés à partir de l'utilisation des plates-formes de forces dont la conception a évolué avec le temps. A côté des plates-formes statiques de conception déjà ancienne se sont développées des plates-formes dynamiques auxquelles sont maintenant couplés enregistrements électromyographiques et cinématiques.

La complexité croissant des systèmes, si elle éloigne l'évaluation instrumentale de la sphère de l'exploration accessible au quotidien, a permis de mieux préciser les caractéristiques de l'équilibre en terme de réactions, de référentiel et de stratégies d'équilibration.

LA STATION DEBOUT IMMOBILE CHEZ LE SUJET NORMAL

Elle a particulièrement été étudiée en France par Gagey et Weber (4) qui en ont précisé la valeur des paramètres de base dans la population de référence. La surface que balaie le centre des pressions est extrêmement réduite, proche de 1 cm². Le centre des pressions est situé en arrière et à droite du centre de la plate-forme dans les conditions de normalisation proposées. L'analyse par FFT montre l'absence de pic fréquentiel et des fréquences d'oscillation basses inférieures à 0.5 hZ. Il n'existe qu'une faible inter corrélation entre les deux paramètres de déplacement antéro-postérieur et latéral.

La fermeture des yeux majore la surface d'oscillation. Le rapport entre les valeurs mesurées yeux fermés/yeux ouverts constitue le coefficient de Romberg.

LES LIMITES DE LA STATION DEBOUT

En dehors des conditions d'application précédentes qui ne concernent que l'équilibre statique, plusieurs auteurs ont proposé l'utilisation des plates-formes de force dans l'évaluation dynamique de l'équilibre en modifiant les conditions d'appui au sol : on a ainsi pu proposer la mesure de l'équilibre en appui unipodal, sur un support de mousse et lors de tests évaluant les limites de l'équilibre.

La station debout unipodale

Il s'agit d'une situation instable dont on a vu les grandes variations lors de l'évaluation clinique.

L'analyse sur plate-forme de forces trouve son intérêt dans une évaluation quantitative de l'instabilité modérée (le patient doit pouvoir tenir au moins 20 secondes) en pratique orthopédique. Cet examen n'est pas utilisable par compte dans les instabilités majeures liées aux atteintes neurologiques ou au simple vieillissement car la durée de l'appui unipodal dépasse rarement quelques secondes dans ces situations (6). Le simple test clinique d'appui unipodal prend alors toute sa valeur (7).

L'étude du déséquilibre antéro-postérieur

L'équilibre quasi-statique en appui bipodal ne sollicite qu'une partie du système complexe qui assure l'équilibration. On a pu ainsi montrer que les afférences labyrinthiques n'étaient stimulées qu'au-delà d'une certaine amplitude d'oscillations.

Différents auteurs ont proposé au cours des dernières années de sensibiliser l'étude de l'équilibration sur plate-forme de forces en recherchant les limites du déséquilibre.

Ainsi, Schieppati et Coll. (8) ont proposé de mesurer les coordonnées du centre des pressions dans les conditions de base puis en position de déséquilibre volontaire avant et arrière. Ces auteurs ont observé chez le sujet sain une diminution des capacités d'inclinaison volontaire les yeux fermés. Il existe de façon remarquable une importante dégradation de ces résultats lors du vieillissement et chez les patients atteints de maladie de Parkinson.

LES REACTIONS AU DESEQUILIBRE

Les limites de l'utilisation des plates-formes de force statiques ont conduit depuis les travaux initiaux de L. Nashner à proposer l'utilisation de plates-formes dynamiques, permettant à la fois d'induire un déséquilibre par rotation ou translation de la plate-forme, et de mesurer les conséquences mécaniques du recrutement des muscles assurant la correction de l'équilibre. On se reportera avec intérêt aux travaux de l'équipe de Portland sur cette thématique (9).

Les résultats de ces examens peuvent être interprétés à différents niveaux :

Le délai des réponses au niveau d'un même muscle étiré fait apparaître des réponses musculaires de latence variable, correspondant à un niveau d'intégration donné : les réponses de courte latence (40 millisecondes) sont d'origine spinale monosynaptique et les réponses à longue latence (>100 ms) sont d'origine supraspinale, c'est à dire qu'elles font relais par des centres du contrôle de l'équilibre situés à la base du cerveau.

La chronologie de mise en jeu des différents groupes musculaires permet de caractériser plusieurs stratégies d'équilibration : disto-proximale ou stratégie de cheville, proximo-distale ou stratégie de hanche.

L'évaluation des réponses motrices en situations de déprivation sensorielle (yeux fermés, sol mousse) permet une exploration des différentes afférences périphériques mises en jeu dans l'équilibration. Un des aspects les plus aboutis de la posturographie dynamique est représenté par l'Equitest qui est une plate-forme mobile que l'on peut paramétrer en stabilisant le support ou l'environnement et qui permet à partir des réponses aux translations du support de préciser les stratégies utilisées par le sujet et d'orienter le diagnostic des troubles de l'équilibre vers une pathologie d'organe (proprioception, vision, vestibule) plus précise.

5 Biomécanique de la chute

Si l'équilibre en appui uni ou bipodal a été largement utilisé en recherche fondamentale ou clinique, l'analyse de la chute et de ses caractéristiques en terme d'activités musculaires, de cinétique du centre de gravité et d'impact au sol a été plus rarement abordé.

Le rattrapage de l'équilibre au cours de la chute avant est un protocole original développé par M.C. Do (10) au cours duquel le patient est initialement retenu en position incliné puis lâché à son insu avec pour consigne de rattraper l'équilibre en quelques pas. L'évaluation fait appel à l'analyse électromyographique de l'activation des muscles des jambes et l'analyse de la dynamique du centre de gravité et du centre des pressions à l'aide d'une plate-forme de forces. Ce protocole permet de mesurer la chute du centre de gravité au cours de la réaction de rattrapage de l'équilibre et la longueur du pas exécuté pour freiner la chute.

La mesure de l'impact lors de la chute est une problématique intéressante mais qui n'est pas sans poser des problèmes méthodologiques voir éthiques.

Van den Kroonenberg et Coll. (11) ont proposé d'étudier, lors de la chute latérale sur un matelas, l'impact sur la hanche et le membre supérieur ainsi que la position du tronc. Ils ont montré qu'il existait plusieurs façons de chuter, suivant en particulier que l'on résistait à la chute ou qu'au contraire on accompagnait celle-ci. Le résultat le plus instructif est que les patients qui résistent à la chute ont un impact plus important que ceux qui se laissent tomber. De plus deux sujets sur six seulement étaient capables de freiner la chute en se retenant avec le membre supérieur.

6 Le vieillissement de la posture et de l'équilibre

Le vieillissement affecte tous les éléments entrant en compte dans la régulation de la posture et de l'équilibre, qu'il s'agisse du contrôle central, des effecteurs moteurs ou des afférences périphériques (12).

Le vieillissement des afférences est le mieux connu car le plus facile à évaluer.

Le vieillissement du système nerveux périphérique a pour conséquence chez le sujet âgé, en l'absence de neuropathie caractérisée, une diminution de la sensibilité vibratoire et discriminative tandis que les explorations

neurophysiologiques montrent une diminution des vitesses de conduction nerveuse après 60 ans.

Au niveau visuel, le vieillissement se caractérise par une diminution de la perception fovéale et périphérique et de façon plus spécifique par une diminution de la perception visuelle des oscillations spontanées du corps par rapport à l'environnement.

A niveau vestibulaire, le vieillissement n'est responsable de troubles de l'équilibration que dans les conditions d'exclusion des autres afférences proprioceptives ou visuelles.

Plusieurs protocoles ont été proposés afin de caractériser le vieillissement du contrôle postural, faisant appel suivant les cas à la posturographie statique, dynamique ou à des paradigmes expérimentaux plus sophistiqués.

Sur plate-forme de force statique (examen stabilométrique), le vieillissement se caractérise par une augmentation des oscillations posturales que l'on peut rapprocher de la perte de la sensibilité discriminative au niveau des pieds sans que cette relation soit exclusive de tout autre paramètre. L'élément le plus caractéristique est l'importance prise au cours du vieillissement par les afférences visuelles, qui se caractérise par une augmentation du coefficient de Romberg (rapport des oscillations yeux fermés/yeux ouverts). Dans ces conditions, le sujet âgé "s'accroche" à ses afférences visuelles, plus qu'aux autres afférences, proprioceptives ou vestibulaires (13). Au-delà d'un certain âge, on observe suivant certains auteurs une inversion de ces résultats, témoignant de la dégradation de la fonction visuelle qui perd alors de sa prépondérance dans les réactions d'équilibration.

L'étude de l'équilibre dynamique sur plate-forme de forces a montré chez les personnes âgées l'utilisation plus fréquente des stratégies de hanches.

Privilégier la stratégie de hanche chez la personne âgée apparaît donc comme une réponse à la perte des afférences périphériques des membres inférieures, bien que l'on ne puisse exclure la participation d'autres paramètres biomécaniques (la diminution de la force des Tibialis et les rétractions d'Achille communément observées lors du vieillissement diminuent également la capacité de réaliser une flexion dorsale de cheville, donc d'utiliser la stratégie de cheville).

Dans le rattrapage de l'équilibre proposé par MC Do, Thelen et coll (14) ont montré chez les personnes âgées que cette stratégie n'était envisageable que jusqu'à un degré d'inclinaison du corps en avant, au delà duquel le rattrapage n'était pas possible. Cet angle limite d'inclinaison diminue chez la personne âgée, plus du fait de la diminution des capacités motrices (incapacité d'augmenter la vitesse d'exécution du pas) que de la diminution des afférences sensorielles.

7 Equilibre et pathologie neurologique

La notion d'un contrôle central de la posture et du mouvement explique l'importance de la perturbation des ces fonctions au cours des atteintes du système nerveux.

L'implication à côté des lésions des centres ou des voies nerveuses de complications liées à la croissance chez l'enfant ou de complications orthopédiques à tout âge doit faire prendre en charge simultanément les composantes neuro-orthopédiques des membres inférieurs et les troubles de régulation centrale.

7.1 L'hémiplégie

L'équilibre de l'Hémiplégique se caractérise une augmentation de la surface d'appui en appui bipodal et par un transfert d'appui vers le côté sain, d'autant plus marqué qu'il s'agit d'une hémiplégie gauche. Ceci est interprété comme un décalage de la référence égocentrée du côté de la lésion cérébrale (15). Dans les conditions de déprivation sensorielle étudiée sur Equitest par Bonan et Coll. (16), les patients hémiplégiques privilégient les afférences visuelles dans leurs réactions d'équilibration et se trouvent en difficulté lorsque cette afférence est inexacte.

La mise en jeu d'un programme de rééducation utilisant un biofeedback postural peut contribuer à une amélioration de ces troubles statiques (17), cette modification n'étant toutefois pas corrélée à l'amélioration des paramètres d'équilibration au cours de la marche (18). Récemment, une étude prospective et comparative a toutefois montré que l'utilisation du feedback visuel n'améliorait pas les scores d'équilibre par rapport à une rééducation classique (19).

7.2 La maladie de Parkinson

Les troubles de l'équilibre chez le parkinsonien sont dominés par une perte des réactions d'équilibration et une diminution des ajustements posturaux anticipateurs (20). Il en résulte un retard à l'initiation du mouvement ainsi qu'à sa réalisation en particulier en condition d'équilibre instable. Cette perte d'adaptation rend ces patients particulièrement sensibles aux chutes lors de déséquilibres internes (réalisation d'un geste) ou externe (déstabilisation par une poussée).

Au niveau de la régulation de l'équilibre, les études ont montré chez ces patients une contribution préférentielle des afférences visuelles sur les afférences proprioceptives ou vestibulaires (21).

Au niveau de l'équilibre, l'utilisation de tests cliniques permet de différencier les patients parkinsoniens à risque de chutes des autres. S'il n'existe pas de différence significative en appui bipodal, on observe chez les patients chuteurs une diminution significative de la durée maximale d'équilibre en appui unipodal (22).

7.3 Les syndromes cérébelleux

L'augmentation des oscillations posturales du cérébelleux est connue de longue date.

L'utilisation d'une plate-forme de force permet quantifier l'augmentation de la surface du stabilogramme et de suivre l'évolution des troubles sous l'influence d'un traitement. Dichgans et Coll (23) ont dégagé de

l'enregistrement stabilométrique quelques éléments plus spécifiques, en particulier l'augmentation privilégiée des oscillations antéropostérieures dans les lésions vermiennes et des oscillations latérales dans les lésions spinocérébelleuses.

7.4 Les ataxies proprioceptives

La perte des afférences proprioceptive des membres inférieurs est compensée par une sollicitation préférentielle des afférences visuelles bien mise en évidence par le test de Romberg. Dans les formes frustes, l'examen clinique peut être complété par une évaluation sur plate-forme de force qui permet d'objectiver une valeur élevée du quotient de Romberg.

7.5 Les polynévrites

La neuropathie diabétique entraîne sur le plan postural une augmentation des oscillations posturales mesurées sur plate-forme de forces. Dans les neuropathies évoluées, la perte des afférences périphériques et le déficit moteur se conjuguent pour rendre inefficaces les stratégies de cheville et périlleux l'initiation du pas (steppage). La prise en compte de ces déficiences doit conduire dans les formes évoluées à un chaussage adapté qui rigidifiera l'extrémité du membre inférieur tandis que l'on privilégiera l'équilibration à partir des stratégies de hanche.

8 Chutes et personnes âgées

L'analyse de la chute des personnes âgées et des complications secondaires à type de fracture de siège divers fait discuter depuis de nombreuses années l'implication d'un certain nombre de paramètres physiques qu'il convient de prendre en compte dans un programme de rééducation.

Les modifications de force et d'équilibre liés à l'âge sont bien connues; on a pu ainsi préciser la diminution conjointe lors du vieillissement de la force du quadriceps, de la proprioception articulaire et des capacités posturales (12).

La comparaison de population de patients chuteurs et non chuteurs permet de mettre en avant un certain nombre de caractéristiques du patient à risque de chute. Certains paramètres relèvent de pathologies associées et de caractéristiques de l'environnement et ne seront pas discutés ici. Nous ne soulignerons que les paramètres intéressants le rattrapage de l'équilibre et les facultés de rééducation.

Il existe à la phase initiale du déséquilibre une période critique de mise en jeu des réactions destinées à éviter la chute. Ces réactions ont pour but de freiner la chute du centre de gravité (10). Elles peuvent être mises en défaut chez la personne âgée par plusieurs facteurs :

- Défaut de perception du déséquilibre du fait du vieillissement ou d'une lésion des récepteurs périphériques (visuels, vestibulaires, neuro-musculaires et cutanés). La diminution de la

vision est associée de façon directe à une majoration du risque de chutes.

- Retard de déclenchement des activités réflexes par augmentation des latences nerveuses (neuropathie, compression des voies nerveuses intra-rachidiennes).
- Augmentation des délais de traitement du signal : le vieillissement se traduit par une augmentation des temps de réaction aux ordres simples et surtout complexes ou successifs.
- Impossibilité s'assurer plusieurs tâches simultanément : les tests de charge mentale augmentent chez le sujet âgé les temps de réactions élémentaires.
- Déficit moteur au niveau des muscles effecteurs.
 - Muscles des membres inférieurs qui interviennent dans les réactions d'équilibration tels le Quadriceps et le Tibial antérieur.
 - Muscles des membres supérieurs tels les triceps qui interviennent dans la protection lors de la chute.

Les capacités d'entretien des fonctions d'équilibration et de la force musculaire sont préservées chez les personnes âgées, ce qui présage de la possibilité d'améliorer ces performances. Les études épidémiologiques ont montré intérêt d'un exercice régulier sur la diminution du risque de chute, indépendamment du rôle de l'exercice sur la prévention de l'ostéoporose. D'une façon générale, comme l'a montré une méta-analyse des études faisant appel à la prise en charge des patients chuteurs (24), toutes les prises en charge incluant exercices et travail de l'équilibre entraînent une diminution du risque de chutes.

9 Conclusion

Posture et équilibre sollicitent une partie importante de la musculature et font appel à une régulation complexe du système nerveux. Les techniques modernes d'évaluation du mouvement permettent de mieux caractériser les déficiences impliquées dans les troubles de l'équilibre et de la marche et de proposer des stratégies de prise en charge à partir de bases cohérentes.

La multiplication des conditions d'évaluation contribue à mieux cerner la mise en jeu des afférences sensorimotrices dans la régulation de l'équilibre et leur implication dans les différentes situations cliniques conduisant au déséquilibre, en particulier les pathologies neurologiques et les chutes de la personne âgée.

Références

1. Amblard B. Les descripteurs du contrôle postural. *Ann. Réadaptation Méd. Phys.* 1998, 41, 225-237.
2. Massion J. Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination. *Progr. Neurobiol.* (1992) 38, 35-56.
3. Fitzpatrick and McCloskey. Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *J. Physiol.* 1994, 478, 1, 173-186.
4. Gagey PM et Weber B. Posturologie. Régulation et dérèglements de la station debout. Masson; Paris, 1995, 145 p.
5. Tropp H., Ekstrand J., Gillquist J. Stabilometry in functional instability of the ankle and its value in predicting injury. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1984, 16, 64-66.
6. Bohannon R, Larkin PA, Cook AC, Gear L, Singer J. Decrease in timed balance test score with ageing. *Phys. Ther.* 1984, 64, 1067-1070.
7. Vellas BJ, Wayne S, Romero L, Baumgartner RN, Rubenstein LZ, Garry PJ. One leg balance is an important predictor of injurious fall in older persons. *J. Am. Geriatr. Soc.* 1997, 45, 735-738.
8. Schieppati M, Hugon M, Grasso M, Nardone A and Galante M. The limits of equilibrium in young and elderly normal subjects and in Parkinsonians. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1994, 93, 286-298.
9. Horak F, Henry SM, Schumway-Cook A. Postural perturbations : new insights for treatment of balance disorders. *Phys. Therap.* 1997, 77, 5, 533.
10. Do MC, Breniere Y, Brenguier P. A biomechanical study of balance recovery during the fall forward. *J. Biomechanics* 1982, 16, 1-7.
11. van den Kroonenberg AJ., Hayes WC, McMahon TA Hip impact velocities and body configurations for voluntary falls from standing height. *J. Biomech.* 1996, 29, 6, 807-811.
12. Hurley MV, Rees J, Newham DJ (1998). Quadriceps function, proprioceptive acuity and functional performance in healthy young, middle-aged and elderly subjects. *Age and ageing*, 27, 55-62.
13. Straube A., Botzel K., Hawken M, Paulus W, Brandt T. Postural control in the elderly : differential effect of visual, vestibular and somatosensory inputs. In : *Posture and gait : development, adaptation and modulation*. B. Amblard, A. Berthoz and F. Clarac Eds, Elsevier, 1988, 105-114.
14. Thelen DG, Wojcik LA, Schultz AB, Ashton-Miller JA and Alexander NB (1997) Age differences using a rapid step to regain balance during a forward fall. *J. Gerontol.* 52, 1, M8-M13.
15. Rode G., Brun F., Rougemoont M.C., Eyssette M. et Boisson D. Posturographie et récupération de l'équilibre chez l'hémiplégique. In : *Posture, équilibration et médecine de rééducation*. Masson, Paris, 1993 pp 175-179.
16. Bonan I, Yelnik A., Laffont I., Vitte E. et Freyss G. Sélection des afférences sensorielles dans l'équilibration de l'hémiplégique après accident vasculaire cérébral. *Ann. Réadaptation Méd. Phys.* 1996, 39, 157-163
17. Shumway-Cook A, Anson D, Haller S. Effects of

- postural sway biofeedback on reestablishing stance stability in hemiplegic patients. *Arch. Phys. Med Rehabil.* 1988, 69, 395-400.
18. Winstein CJ, Gardner ER, McNeal DR, Barto PS, Nicholson DE. Standing balance training : effects on balance and locomotion in hemiparetic adults. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 1989, 70, 755-762.
 19. Walker C, Brouwer BJ, Culham EG. Use of visual feedback in retraining balance following acute stroke. *Phys. Ther.* 2000, 80, 9, 86-895.
 20. Bazalgette D, Zattara M, Bouisset S, Bathien N, Rondot P. Postural adjustments associated with rapid arm movements in parkinson's disease. In : *Proceedings of VII international symposium on Parkinson disease. Advances in Neurology*, 1986, 45, 371-374.
 21. Bronstein AM, Hood JD, Gresty MA, Panagi C. (1990) Visual control of balance in cerebellar and parkinsonian syndromes. *Brain* 113, 767-779.
 22. Smithson F., Morrise ME, Iansek R. (1998) Performance on clinical tests of balance in Parkinson's disease. *Phys. Ther.* 6, 577-592.
 23. Dichgans J, Mauritz KH, Allum JHJ and Brandt T Postural sway in normal and ataxic patients. *Agressologie*, 1976, 17C, 15-24.
 24. Province MA, Hadley EC, Hornbrook et al. (1995) The effects of exercise on falls in elderly patients. *J.A.M.A.* 273, 1341-1347.

Applications des outils de l'automatique au problème de la restauration du mouvement de membres paralysés sous stimulation électrique fonctionnelle

Guiraud David^{1,2}, El Makssoud Hassan², Poignet Philippe², Fraisse Philippe², Dombre Etienne²

¹INRIA, UR Sophia Antipolis
²LIRMM, UMR 5506, Montpellier
 161 Rue Ada, 34392 Montpellier Cedex 5
 David.Guiraud@lirmm.fr

Résumé

Les techniques de stimulation électrique fonctionnelle (FES) peuvent efficacement restaurer certaines fonctions motrices comme la station debout et la déambulation chez le paraplégique, ou la préhension chez le tétraplégique. La synthèse automatique des séquences de stimulation et a fortiori le contrôle en boucle fermée restent des sujets mal formulés et non résolus. L'une des approches possibles que nous présenterons dans cet exposé est l'utilisation de certains outils de l'automatique appliqués à la robotique. Cela nécessite au préalable de définir un modèle biomécanique complet du membre étudié. De nombreux travaux donnent des éléments de ce modèle mais l'agrégation des différentes parties restent délicates. L'article s'attache à montrer dans quelle mesure les approches en robotique et en FES ont des points communs mais aussi des différences notables (modélisation et identification de l'actionneur : le muscle), et quels sont les objectifs à court terme ainsi que les grands défis à relever.

Mots Clef

Mouvement humain, modélisation, identification, biomécanique, FES.

1 Introduction

Cette étude s'insère dans une thématique générale de recherche : la restauration du mouvement chez le tétra ou paraplégique par stimulation électrique fonctionnelle (FES). La faisabilité est actuellement démontrée grâce à la réussite de deux implantations sur des patients paraplégiques (figure 1) réalisées dans le cadre du projet SUAW [1, 2] (Stand Up And Walk, Biomed II communauté européenne). D'autres équipes [3, 4, 5] ont aussi développé des implants avec succès. Néanmoins d'importantes limitations subsistent : i) Les systèmes fonctionnent en boucle ouverte. ii) La mise au point des séquences de stimulation est empirique. iii) L'interface de commande du patient est uniquement constituée de boutons poussoirs, insuffisants pour un contrôle riche de haut niveau. Afin de pallier ces limitations, plusieurs éléments sont nécessaires : i) des algorithmes de synthèse de mouvement, ii) une commande en boucle fermée basée sur un nombre minimal de capteurs afin d'éviter le rejet par le patient, iii) la définition d'une interface patient riche en mode de fonctionnement afin de rendre le pilotage performant en préservant une approche intuitive.

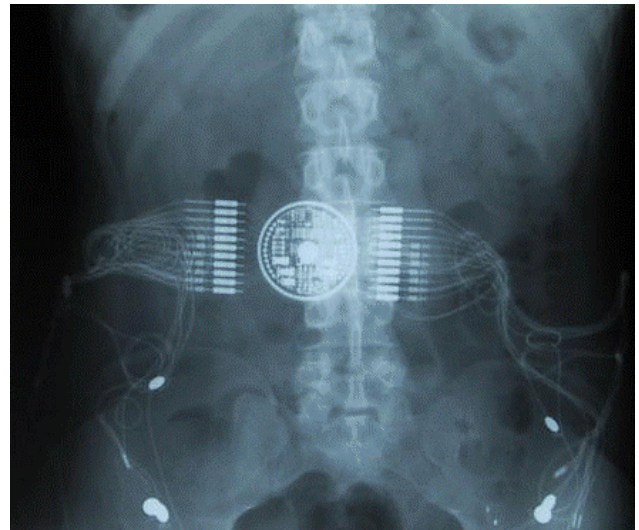


Figure 1 : système implant + électrodes

L'approche choisie par notre équipe est celle adoptée en robotique et utilise les outils de l'automatique. Par exemple, concernant le modèle géométrique, première étape de notre travail, la description utilise les paramètres définis par Khalil-Kleinfinger. L'article propose quelques réflexions sur la manière d'utiliser les outils de l'automatique dans ce domaine très spécifique, et les difficultés nouvelles que nous rencontrons. Enfin, il faut rappeler que dans le cas de la paraplégie, le bas du corps est partiellement commandé et le haut du corps reste sous l'action volontaire du patient. Celle-ci reste inconnue tout en pouvant influencer grandement sur le mouvement. En simulation, il faudra donc définir un comportement « standard » qui, par exemple, minimise les efforts exercés par les bras. Dès lors, on comprend que la simulation n'a pas pour objectif de prévoir le comportement du patient mais plutôt d'évaluer des lois de commande, des trajectoires synthétisées, par rapport à un comportement idéalisé du patient. La simulation garde tout son intérêt dans l'estimation, même imprécise mais réaliste, des performances attendues sur un patient déterminé. Dans le cas d'une commande référencée modèle, on reste dans le domaine de l'estimation et non dans la prédiction stricte de l'évolution des variables d'états, pour les mêmes raisons. De ce fait, le modèle peut subir des simplifications ayant peu d'incidence sur l'estimation des performances. C'est sur cette base qu'ont été faits tous les choix présentés dans cet article.

2 Modélisation géométrique et identification

2.1 Hypothèses et modèle

A la complexité de la modélisation du système biomécanique s'ajoutent les difficultés d'identification des paramètres. Ainsi, plus le modèle est complexe, moins les paramètres sont identifiables aisément sur un individu donné, et leur détermination est remplacée par des valeurs issues de mesures moyennes sur cadavre. Afin de limiter toutes ces difficultés, nous avons choisi de ne retenir que les éléments nécessaires à notre contexte particulier d'utilisation : i) notre étude est limitée à quelques mouvements pour le patient paraplégique : la station debout équilibrée, la marche quasi-statique, et éventuellement la montée et descente d'une marche, ii) le haut du corps n'est pas commandé et reste sous contrôle volontaire, iii) un nombre limité de muscles est activé. Nous pouvons ainsi réduire le nombre de degré de liberté du membre inférieur à ceux qui seront commandés, et à ceux qui de manière passive, jouent un rôle important dans les cas particuliers des mouvements cités. Pour le haut du corps, nous avons choisi de limiter le nombre de ddl à ceux nécessaires pour décrire les différentes postures du haut du corps. Par ailleurs, les hypothèses suivantes ont été admises pour définir notre modèle : i) le corps est considéré comme une association de corps rigides représentés par des segments, ii) les articulations comportent de une à trois liaisons rotoïdes d'axes concourants. Le bassin sert de référence et de point de départ de l'arborescence.

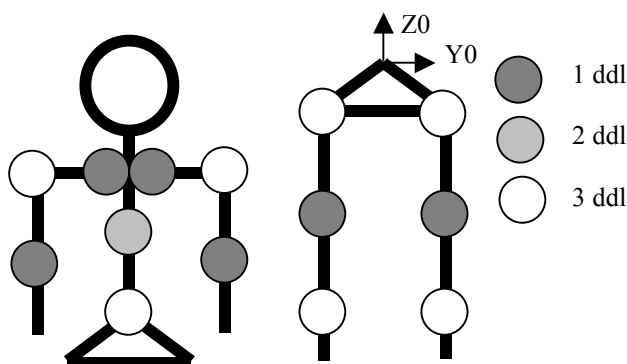


Figure 2 : modèle géométrique

Le modèle comporte finalement 14 articulations, 29 ddl augmentés des 6 nécessaires à la localisation et l'orientation du bassin dans l'espace, et 15 corps. Ils se distribuent comme suit : cheville 2x3 ddl, genou 2x1 ddl, hanche 2x3 ddl, bassin 3 ddl, milieu du dos 2 ddl, haut du dos 2x1ddl, épaule 2x3 ddl, coude 2x1 ddl.

2.2 Identification et observation

L'une des méthodes envisagées pour identifier le modèle géométrique est l'utilisation d'un système de capture de mouvement 3D basé sur des prises vidéos multi-caméras et détection de marqueurs. Ceci permet par ailleurs d'observer le mouvement exécuté par le patient. Ces techniques ainsi que le matériel sont disponibles sur le marché et produisent des données relativement précises,

ils sont décrits dans [6, 7]. Le modèle géométrique décrit en 2.1 comporte 16 longueurs à identifier, 10 en tenant compte de la symétrie droite-gauche. La méthode d'identification liée à la capture de mouvement peut se dérouler de deux manières différentes. La première comporte une étape de détermination sur l'ensemble des images d'un mouvement des centres (pour 2 ou 3 ddl) et axes de rotation (pour 1 ddl) dont on déduit ensuite la longueur de tous les segments sauf le pied et l'avant bras. Cette méthode nécessite de définir un repère sur chaque segment. Ensuite le calcul des centres se fait en supposant que la trajectoire décrite par les marqueurs du segment $i+1$ dans le repère i sont sur des sphères dont le centre est le centre de rotation. Il est déterminé par des calculs simples de géométrie [8, 9]. Dans le protocole d'identification, on peut demander au patient d'effectuer des trajectoires maximisant les déplacements autour des centres de rotation afin de diminuer les erreurs induites par des mouvements de faibles amplitudes. En effet, les données utiles pour l'identification, seront d'autant mieux conditionnées que les calculs des centres et axes de rotation se feront sur des positions successives éloignées. La deuxième étape consiste, pour chaque image, à ajuster le modèle géométrique ainsi obtenu sur les données par des méthodes de minimisation d'erreur [10], les variables étant les coordonnées articulaires, et la fonction à minimiser étant la somme des distances entre centres de rotation calculés et ceux du modèle. Cette approche présente le double avantage de ne pas nécessiter le calcul du modèle géométrique inverse, et de pouvoir trouver une solution même en cas de masquage de marqueurs. Elle garantit intrinsèquement la cohérence du résultat trouvé par rapport aux longueurs de segments.

La deuxième approche regroupe en une étape l'identification des longueurs et la détermination des coordonnées articulaires en minimisant la somme des distances entre les positions des marqueurs et celles calculées par le modèle géométrique direct [11]. Cette approche nécessite moins de capteurs, une seule étape et présente comme la précédente l'avantage de garantir une certaine cohérence des résultats et d'éviter le calcul du modèle géométrique inverse. Par contre, la fonction à minimiser est de dimension supérieure et la recherche du minimum plus complexe. Les deux approches sont conjointement développées par l'équipe du LIRMM et l'équipe BIPOP de l'INRIA Rhône-Alpes. C'est deux méthodes supposent que le modèle ne comporte pas liaison prismatique. La réalité est différente, mais l'adjonction de liaison prismatique par exemple au niveau de l'épaule serait une approximation tout aussi grossière du fonctionnement très complexe de celle-ci. Dans notre modèle l'épaule suit un arc de cercle alors qu'une liaison prismatique lui imposerait un segment de droite. Mais le cadre de travail décrit en 2.1 justifie cette approximation. Une autre voie pour l'identification des paramètres géométriques est l'utilisation de l'imagerie médicale qui sera décrite dans la section 4.

3 Modélisation de l'actionneur

Il s'agit d'une partie complètement absente de la robotique classique à ce niveau de complexité. Les implications sur la qualité de la modélisation puis sur la synthèse des lois de commande sont fortes et font émerger de nouveaux problèmes tant pratiques que théoriques.

3.1 Modèle

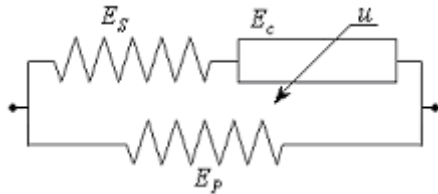


Figure 3 modèle de Hill Maxwell

Quelques travaux [12, 13] suffisent à décrire le muscle en première approche. En particulier le comportement mécanique est assez bien traité que ce soit à l'échelle microscopique ou macroscopique. Par contre, la commande n'a été introduite que très récemment [14] et dans un contexte différent du notre puisqu'il s'agit de modéliser le myocarde. Le muscle cardiaque est strié mais non fatigable, et son activation est de nature différente. Ce modèle reste néanmoins le plus complet et le seul à comporter une entrée de commande indispensable dans notre cas. Le modèle est basé sur la structure mécanique de Hill-Maxwell. Le ressort linéaire E_s rend compte des contractions isométriques, le ressort à réponse exponentielle E_p explique la résistance passive du muscle, et enfin l'élément contractile E_c est lui-même constitué de deux parties : i) un modèle statique intégrant recrutement et fatigue, ii) un modèle mécanique commandé. Le modèle mécanique commandé part de la description microscopique de Huxley qui donne l'évolution de la densité n de paires attachées d'actine et de myosine en fonction du temps t et de la déformation adimensionnée x des ponts d'actine-myosine.

$$\begin{cases} \dot{k}_c = \left(k_{\max} - k_c - \frac{\sigma_{\max} - \sigma_c}{1 + a_0 [a_1 k_c + \sigma_c]} a_0 k_c \right) U + \left(k_c - \frac{a_3 k_c + \sigma_c}{1 + a_0 [a_1 k_c + \sigma_c]} a_0 k_c \right) a_2 \dot{\epsilon} \\ \dot{\sigma}_c = \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_c}{1 + a_0 [a_1 k_c + \sigma_c]} \right) U + \left(k_c - \frac{a_3 k_c + \sigma_c}{1 + a_0 [a_1 k_c + \sigma_c]} a_0 k_c \right) a_2 \dot{\epsilon} \end{cases} \quad (2)$$

La fonction d'activation globale du muscle U est issue d'un modèle statique appelé courbe de recrutement. Il s'agit d'une description macroscopique de l'activation des unités motrices incluant l'activation des axones moteurs, la dynamique du Calcium, la fatigue et les relations force-longueur. Le lien avec les modélisations microscopiques plus fines n'est pas réalisé et des travaux sont en cours sur ce sujet relativement délicat. Enfin, dans un premier temps, un modèle simple - bras de levier - décrit le transfert de la force musculaire vers les couples articulaires F1. La masse musculaire est reportée sur les

$$\frac{\partial n}{\partial t} + v(t) \frac{\partial n}{\partial x} = f(x, t) [1 - n(x, t)] - g(x, t) n(x, t) \quad (1)$$

Dans l'équation (1) deux fonctions apparaissent : i) f fréquence d'attachement, ii) g fréquence de détachement. Sorine [14] introduit une définition (figure 4) faisant apparaître une commande u d'origine chimique et la vitesse de raccourcissement $\dot{\epsilon}_c$ de l'élément contractile.

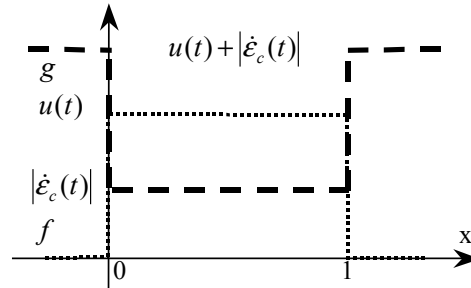


Figure 4 fonctions f et g définies par Sorine.

Le passage à l'échelle mésoscopique est basée sur une approche statistique et se fait par le calcul des moments en x d'ordre 0 à 2 respectivement image d'une raideur, d'un couple, et d'une énergie. On obtient les équations à l'échelle du sarcomère puis de la fibre musculaire à un facteur d'échelle près. Le passage à l'échelle macroscopique - le muscle entier - peut se faire sous la forme d'une sommation discrète de groupe d'unité motrice : plusieurs fibres en parallèle commandées par un seul signal. Mais dans un premier temps, une approche globale continue a été privilégiée afin de limiter le nombre de paramètres du modèle. On a finalement une commande continue U , somme discrète des commandes de groupe musculaire u qui donne deux équations qui définissent la dynamique de la raideur k_c et de la contrainte σ_c de l'élément contractile en fonction de la vitesse de raccourcissement totale $\dot{\epsilon}$ intervient :

segment de sorte que l'on ne tient pas compte des mouvements intramusculaires et on évite ainsi de définir des structures en chaîne fermée.

3.2 Identification

Le modèle comporte quelques dizaines de paramètres à identifier. Certains sont observables directement, d'autres ne sont pas accessibles à la mesure et nécessitent de faire fonctionner le muscle dans des modes particuliers : i) isotonique, ii) isocinétique, iii) isométrique. Dans ces trois cas les équations se simplifient et on accède à

l'observation d'un sous groupe de paramètres. Une chaise de mesure est en cours de réalisation. Elle peut fonctionner dans les trois modes cités et comporte deux degrés de liberté au niveau de la hanche, un au niveau du genou et trois au niveau de la cheville.

4 Modélisation dynamique

La modélisation dynamique est le travail le moins avancé mais il est fondé sur le formalisme Lagrangien classiquement utilisé en robotique.

$$F1 + F2 = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (3)$$

Trois considérations rendent cette modélisation délicate dans notre contexte d'application : i) les contacts unilatéraux avec le sol et bilatéraux avec le déambulateur, ii) le comportement sous contrôle volontaire du haut du corps, iii) les protocoles d'identification. Les forces de contact sont ramenées à des couples articulaires F2. Les contraintes imposées par les contacts uni ou bilatéraux sont exprimées sous la forme d'inéquation et d'équation (4).

$$F2 = J(q)^T \lambda, \psi(q) = 0, \phi(q) \geq 0 \quad (4)$$

Un travail important est mené par de nombreuses équipes [15] sur le problème délicat des contacts unilatéraux et nous ne développerons pas d'axes de recherche dans ce domaine. Il s'agit de trouver un compromis entre complexité de la mise en œuvre du modèle de contact – comprenant aussi l'identification – et le réalisme de la simulation dans les limites exposées en introduction. L'identification des paramètres dynamiques est possible grâce à l'imagerie médicale qui donne en plus une méthode d'identification des paramètres géométriques. L'IRM ou le densitomètre à rayons X donnent une image de la densité des tissus respectivement en 3D et 2D. Ainsi les matrices d'inerties peuvent être évaluées. La méthode reste néanmoins coûteuse, lourde dans le cas de l'IRM corps entier, irradiante dans le cas du densitomètre. C'est pour cette raison que des méthodes plus légères comme celle évoquée au paragraphe 2.2 seront évaluées et remplaceront l'imagerie médicale.

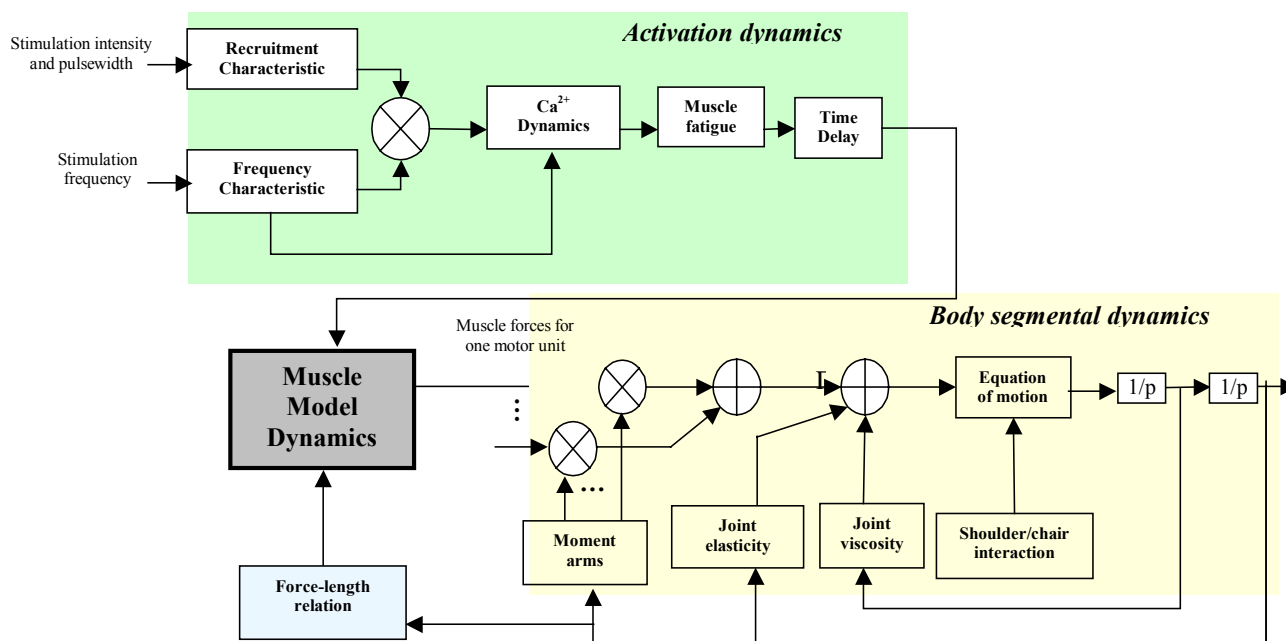


Figure 5 modèle complet

5 Conclusion et perspectives à court terme

Finalement le schéma 5 résume l'ensemble des briques du modèle. Le choix de l'approche automatique se fonde sur l'abondance des outils et la richesse des résultats théoriques du domaine. Cependant de nombreuses spécificités, et l'entrée encore très timide de la discipline dans le domaine de la restauration du mouvement d'un membre paralysé génèrent de nouveaux problèmes. Au niveau de la définition des modèles, les difficultés principales concernent essentiellement : i) l'identification qui demeure beaucoup plus délicate que sur un robot, essentiellement à cause de l'accès à la mesure ii) le modèle de l'effecteur, complexe et encore incomplètement décrit, iii) la modélisation comportementale du haut du corps indispensable en

simulation et synthèse de mouvement. Concernant la commande en boucle fermée, il est encore très difficile de définir la bonne approche car : i) les propriétés des modèles ne sont pas encore connues, ii) l'observabilité du système est imprécise et partielle, iii) l'interaction non contrôlée du haut du corps est du même ordre de grandeur que la commande des muscles paralysés. L'objectif à court terme est donc de valider l'approche sur des cas particuliers plus simples : la synthèse de la marche en boucle ouverte et la station debout équilibrée. Dans le premier cas on ne cherche pas à mettre en place des schémas de commande mais à valider l'ensemble de la modélisation dans un cas assez général de mouvement. Dans le deuxième cas, il s'agit de tester la commandabilité du système dans une configuration où de

nombreuses hypothèses permettent de simplifier le problème : i) mouvements de faible amplitude, ii) dynamique lente, iii) blocage de certains degrés de liberté, iv) muscle en fonctionnement isométrique. Ces deux applications serviront de test dans les trois ans à venir pour les modèles et les schémas de commande dans les cas simplifiés évoqués. Par ailleurs, l'identification des modèles fournit une méthode objective pour caractériser un système biomécanique. On peut ainsi en déduire des indicateurs objectifs de la déficience motrice chez des patients quelle que soit la pathologie motrice. Cet aspect est particulièrement intéressant, indépendamment de l'objectif final que nous avons dans le projet, pour évaluer les pathologies du système sensori-moteur afin de les classifier ou mesurer l'impact d'une thérapie ou d'une rééducation. La phase de validation expérimentale sur patient est donc la prochaine longue étape que nous allons démarrer dans les mois qui viennent.

Références

- [1] K. von Wild, P. Rabischong, G. Brunelli, M. Bénichou, K. Krishnan, "Computer Aided Locomotion by Implanted Electrical Stimulation in Paraplegic Patients (SUAW)," *Acta Neurochir*, vol. 79, pp. 99-104, 2001.
- [2] D. Guiraud, A. Pacetti, E. Meola, J. L. Divoux, P. Rabischong, "One year implanted patients follow up : SUAW project first results", in *Proc. CDROM of IFESS2001 6th Conference*, Cleveland, United States, June 2001.
- [3] R. Kobetic, R.J. Triolo, J. P. Uhler, C. Bieri, M. Wibowo, G. Polando, E. B. Marsolais, J. A. Davis, "Implanted Functional Electrical Stimulation System for Mobility in Paraplegia: A Follow-Up Case Report", *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering*, vol. 7, no 4, pp 390-398, December 1999.
- [4] B. Smith, Z. Tang, M. W. Johnson, S. Pourmedhi, M. M. Gazdik, J. R. Buckett, P. H. Peckham, "An Externally Powered, Multichannel, Implantable Stimulator-Telemeter for Control of Paralyzed Muscle", *IEEE Trans. On Biomedical Engineering*, vol. 45, no 4, pp 463-475, April 1998.
- [5] R. Davis, T. Houdayer, B. Andrews, S. Emmons, J. Patrick, "Paraplegia: Prolonged Closed-Loop Standing with Implanted Nucleus FES-22 Stimulator and Andrews' Foot-Ankle Orthosis", in *Proc. of XIIIth World Society of Stereotactic Functional Neurosurgery*, vol. 69, pp 281-287, 1997.
- [6] Brethes L., Analyse de la marche par vidéo 3D, Rapport de D.E.A., Juillet 2002, LIRMM Montpellier.
- [7] Hynek Bakstein, A Complete DLT-Based Camera Calibration With a Virtual 3D Calibration Object, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, 1999.
- [8] Halvorsen K., Lesser M., Lundberg A., A new method for estimating the axis of rotation and the center of rotation, *Journal of Biomechanics* 32 1221-1227, 1999.
- [9] Sahan S. Hiniduma Udugama Gamage, Lasenby J., New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation, *Journal of Biomechanics* 35 87-93, 2002.
- [10] Herda L., Fua P., Plänklers R., Boulic R., Thalmann D., Using Skeleton-Based Tracking to Increase the Reliability of Optical Motion Capture, Computer Graphics Lab (LIG), Swiss Federal Institute of Technology CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [11] Guilbert M., Intégration logicielle en vue d'une expérimentation en réalité virtuelle autour de la marche humaine, rapport de stage Mines de Douai, 2002.
- [12] Huxley A.F., Muscle structure and theory of contraction, *Progress in biophysics and biological chemistry*, vol. 7, chapter 6, Pergamon Press, 1957.
- [13] Zahalak G.I., A distribution moment approximation for kinetic theories of muscular contraction, *Mathematical Biosciences*, (114) pp. 55-89, 1981.
- [14] Bestel J., Modèle différentiel de la contraction musculaire contrôlée, Thèse, Université Paris IX Dauphine, Décembre 2000.
- [15] Brogliato B., Nonsmooth impact mechanics, Springer Verlag, 1996.

Microsystèmes pour la robotique et micromanipulation

L. BUCHAILLOT¹S. REGNIER²

¹Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN), UMR CNRS 8520
Cité Scientifique, Avenue H. Poincaré, BP 69
59652 Villeneuve d'Ascq Cedex
lionel.buchaillot@isen.iemn.univ-lille1.fr

²Laboratoire de Robotique de Paris (LRP)
BP 61 – 92265 Fontenay Aux Roses
regnier@robot.jussieu.fr

Résumé

Un microsystème intègre une électronique de commande, un micro-actionneur et une alimentation électrique. Les procédés de réalisation des microsystèmes se différencient de ceux de la micro-électronique par le fait qu'une couche mince doit être partiellement ou totalement désolidarisée du substrat. Un micro-actionneur ainsi produit est sensible aux fluctuations de son environnement (température, pression, accélération). Il est également capable de délivrer une puissance que l'on peut exploiter pour déformer ou déplacer un micro-objet, dévier ou interrompre la propagation d'une onde dans un guide. Dans cet article, de nombreuses illustrations de micro-robots extraites de la littérature sont présentées, ainsi qu'une réalisation du groupe "microsystèmes silicium" de l'IEMN. Cette dernière permet de démontrer un principe de télé-alimentation par couplage électromagnétique à 13,56 MHz.

*Une application importante de ces microsystèmes se trouve à la **micro-manipulation**. Celle-ci diffère de la manipulation classique par la physique des interactions des surfaces et l'amplitude des efforts et des déplacements engendrés. Les forces en présence à l'échelle microscopique sont différentes car les effets surfaciques sont prépondérants par rapport aux effets volumiques : les forces de Van der Waals, électrostatiques engendrés par la triboélectrification, capillaires sont fortement non linéaires par rapport à la distance de contact et engendrent la non reproductibilité de la micro-manipulation. De plus leurs amplitudes sont de l'ordre du micro-newton avec une variation importante sur des déplacements de quelques nanomètres. Plusieurs approches robotiques présentées dans cet article sont apparues pour répondre à cette spécificité : de la définition de micro-préhenseur à partir de matériaux intelligents à l'utilisation dérivée de systèmes robotiques existants.*

Mots Clef

Micro-manipulation ; adhésion ; outil actif ; télé-alimentation ; micro-convoyeur ; micro-robot

1 Introduction

Le terme micro-robot désigne à la fois un microsystème mobile capable de se déplacer d'un point à un autre et un système fixe capable de manipuler des objets microscopiques. Les avantages entrevus en 1988 par W. S. N. Trimmer dans son papier intitulé "Microrobots and micromechanical systems" [1] sont, en plus de l'excitation provoquée par l'exploration d'un nouveau domaine, une plus grande vitesse, une meilleure précision et plus de douceur dans les actionneurs mécaniques. Le gain de place obtenu doit permettre de réduire les coûts de production et éventuellement d'utiliser des matériaux plus nobles afin d'améliorer les caractéristiques du système global. On attend des microtechnologies qu'elles dépassent les limites de la manipulation et de la patience humaine, dans des domaines comme l'assemblage électronique, la médecine ou l'exploration spatiale. Le concept du micro-robot est décrit comme devant être similaire au robot du monde macroscopique, à savoir un objet ayant un comportement reprogrammable, une certaine adaptabilité devant des situations imprévues ou tout du moins contrôlable à distance [2]. Il doit être constitué d'une structure physique, d'un système de commande, d'une source de puissance, de capteurs et d'actionneurs. Il peut être fixe ou mobile, mais pour être utile il doit être capable de manipuler des objets [3]. En plus des problèmes majeurs de friction et de stiction inhérents à tout mécanisme microscopique [4], se pose pour les micro-robots celui de la miniaturisation de la source d'énergie et de la génération de forces suffisantes pour obtenir un déplacement ou une manipulation d'objet. A l'image de la micro-électronique, du fait de la possibilité d'intégration sur un substrat de silicium et de la production de masse, de nouveaux concepts se sont développés, consistant à multiplier le nombre d'actionneurs effectuant des actions à très petite échelle et de les assembler en série ou en parallèle pour obtenir un effet macroscopique [5-6]. La nécessité de convenablement coordonner l'ensemble des actionneurs et la volonté d'établir un contact entre les capteurs et une station distante demande la présence d'un minimum d'intelligence dans le système.

D'où l'idée de réaliser des micromachines distribuées et autonomes (ADMs pour Autonomous Distributed Microsystems). Un ADMs est un système composé de plusieurs sous-systèmes intelligents qui peuvent partager des informations, communiquer entre eux voir coopérer [7]. Comme première étape vers un ADMs, l'équipe du professeur Fujita de l'Université de Tokyo a développé le concept de système de déplacement distribué (DMMS pour Distributed Micro Motion System) (cf. figure 1) [8].

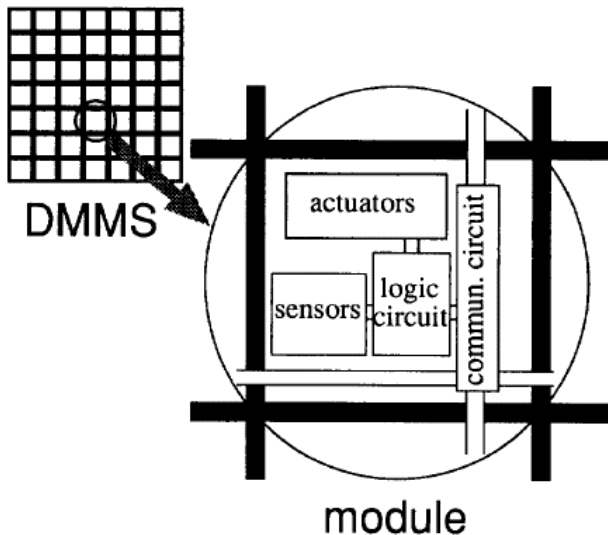


Fig. 1 Concept du DMMS : coordonner une multitude de cellules comprenant une unité logique associée à un micro-actionnement pour obtenir un mouvement à grande échelle [8].

L'idée maîtresse est toujours la même, coordonner un nombre important de petites actions, en l'occurrence un déplacement, afin d'obtenir une opération plus complexe et de grande échelle. Plusieurs dispositifs de micro-convoyage ont ainsi été réalisés utilisant soit des actionneurs thermiques reproduisant le mouvement des cils dans les organismes vivants [9], soit un flux d'air contrôlé par de multiples micro-valves [10-11], soit en utilisant des actionneurs électrostatiques [12-13] ou magnétiques [14]. Dans le cas du micro-convoyeur, l'alimentation électrique ne présente pas de difficultés autres que la connectique et le routage vers le réseau d'actionneur. En revanche, le micro-robot autonome requiert une stratégie d'alimentation adaptée à la puissance qu'il est capable de développer pour se mouvoir, à sa vitesse de déplacement, à son rayon d'action, à la masse qu'il peut embarquer, et aux signaux qu'il doit recevoir ou émettre pour lui permettre de se déplacer de manière coordonnée.

Dans les sections suivantes, plusieurs concepts de micro-robot sont présentés et classés en deux catégories d'après la littérature disponible pour chacun d'eux : les études en cours, et les réalisations avancées [15]. Ensuite, le concept de la télé-alimentation ainsi que les éléments constitutifs d'un micro-robot télé-alimenté seront décrits. Une tentative de prospective exposant les limites et les

perspectives sur le concept des micro-robots conclura cet article.

2 Les micro-robots

Plusieurs concepts de microrobots ont été mis au point mais rares sont ceux qui ont correctement fonctionnés. On pourrait imaginer qu'il suffit de retourner n'importe lequel des systèmes de microconvoyeurs précédemment cités pour obtenir un microrobot. Malheureusement la plupart de ces systèmes ne sont pas capables de supporter leur propre poids. De plus la rigidité des câbles, nécessaires à l'alimentation des actionneurs, empêche généralement le déplacement de ceux toujours fonctionnels. Quant à la réalisation de systèmes téléalimentés, un seul a été réalisé avec succès, mais sans la possibilité de le télécommander. La faible puissance transmissible limite les modes d'actionnements, excluant ceux à forte consommation d'énergie comme par exemple l'actionnement thermique qui nécessite des courants de l'ordre de la dizaine de mA. Or c'est précisément ceux-là qui sont capables de générer des forces importantes associées à de grands déplacements, et sont donc les plus appropriés pour des applications de transport.

Pour les dispositifs sans fils, on considère donc plutôt les actionnements piézoélectrique inverse et électrostatique, car leur force ne dépend pas de la puissance disponible mais de l'importance du champ électrique en présence. Une forte tension et un courant nul, à l'exception des charges capacitives, sont donc suffisants. De plus, ces modes d'actionnement sont particulièrement bien adaptés à la réduction d'échelle car lorsque la taille des actionneurs décroît, la densité d'énergie disponible augmente [1]. L'inconvénient majeur est le faible déplacement obtenu. Pour les actionneurs électrostatiques il est directement proportionnel à l'espace entre les électrodes de commande et par conséquent inversement proportionnel à la force coulombienne pour une tension donnée. Ainsi, pour obtenir un déplacement supérieur au micron de l'électrode mobile, des tensions pouvant aller au-delà de plusieurs centaines de volts sont nécessaires, à moins d'augmenter considérablement la surface des électrodes. En contre partie, ces faibles déplacements ont une précision submicronique et la répétition de l'actionnement permet d'obtenir des mouvements plus importants.

2.1 Etudes en cours

2.1.1 R. Yeh *et al.*, (2000, BSAC-Université de Berkeley)

Ce micro-robot reproduit la marche des insectes à six pattes. Le principe est le suivant. Seul un groupe de 3 pattes, positionnées en triangle équilatéral, est en contact avec le substrat tandis que les trois autres vont se positionner un peu plus loin. Puis les pattes initialement immobiles se déplacent à leur tour, etc... L'objectif de ce projet est de réaliser un système autonome alimenté par des cellules photo-voltaïque (cf. figure 2). Les pattes sont composées de deux poutres en polysilicium reliées par

une charnière [16]. Elles sont actionnées par des moteurs électrostatiques réalisés à l'aide de comb-drive et reproduisant le déplacement d'un ver de terre [17]. Seuls les pattes du robot et le moteur ont été réalisés. Ce dernier sera repris dans un autre projet (cf. §2.2.4).

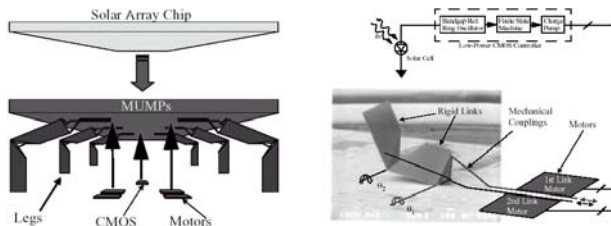


Fig. 2 Micro-robot à actionnement électrostatique alimenté par des cellules photo-voltaiques [18].

2.1.2 P. E. Kladitis et al., (2000, Université du Colorado)

Le principe de déplacement de ce microrobot est identique au précédent à la différence qu'il utilise un nombre plus important d'actionneurs connectés électriquement en six groupes. Ces groupes sont répartis en deux entités, commandées à l'aide de deux signaux en opposition de phase (cf. figure 3). La structure a pour dimensions 1*1 cm² et comprend 96 pattes de 270 µm de long. Les pattes sont fabriquées séparément et assemblées manuellement à l'aide de microprobes. L'érection hors du plan du substrat est obtenue grâce à des actionneurs thermiques en polysilicium. Ce dispositif a correctement fonctionné en microconvoyeur, en transportant un film de kapton de 9*9 mm² pesant 3 grammes. La vitesse maximale obtenue est de 7,55 µm/s à une fréquence de 2 Hz, pour une tension d'actionnement de 0-5 V. Mais le poids et la rigidité des câbles d'alimentation en or n'ont pas permis son utilisation en tant que micro-robot.

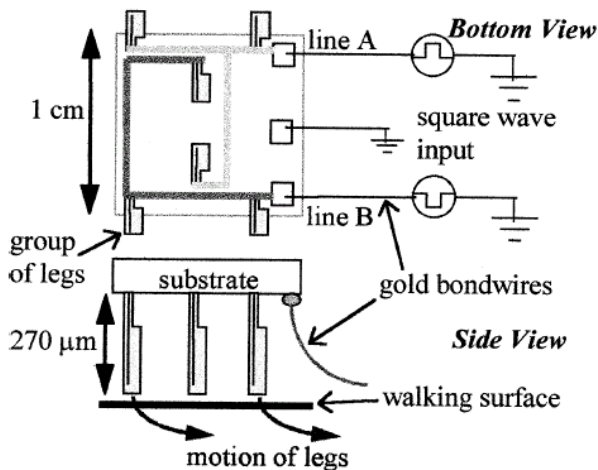


Fig. 3 Micro-robot à actionnement thermique [19].

2.1.3 D. Ruffieux et al., (2000, CSEM-Neuchâtel)

Ce projet consiste en un microrobot dont le déplacement reproduit le mouvement elliptique des pattes de certains animaux. Les actionneurs sont constitués d'un cylindre de silicium de 300 µm par 20 µm, connecté à une plaque centrale mobile selon trois degrés de liberté grâce à trois

poutres piézoélectriques bimorphes et commandées de façon indépendante (cf. figure 4). Si les trois signaux sont en phase, l'actionneur se déplace verticalement. Si l'un d'eux est inversé, une oscillation horizontale se produit. Le principe du déplacement consiste comme précédemment à actionner alternativement une moitié des pattes. Seuls des actionneurs individuels ont été réalisés. Les déplacements observés sont de +/- 6 µm latéralement et +/- 3 µm verticalement, pour une tension de +/- 10 V.

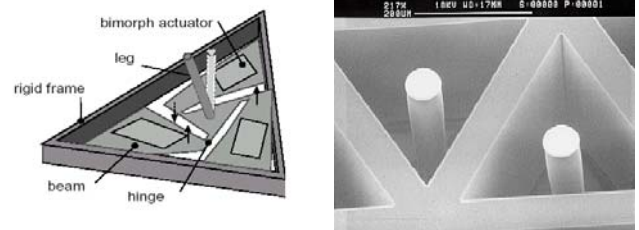


Fig. 4 Micro-robot à actionnement piézo-électrique [20].

2.1.4 U. Simu et al., (2002, Université d'Uppsala)

Ce robot reprend à nouveau le mouvement à 6 pattes de certains insectes, cette fois grâce à des actionneurs piézoélectriques. Leur principe est similaire à des bimorphes, à la différence que chaque patte est constituée de 4 lames piézo-électriques pouvant être actionnées de façon indépendantes afin d'obtenir un mouvement à 3 degrés de liberté (cf. figure 5). Le robot comprend deux ensembles de 6 pattes, un en contact avec le sol pour la locomotion et un autre orienté vers le haut pour pouvoir effectuer de la manipulation d'objet. Un circuit intégré a été développé pour effectuer la commande asynchrone des pattes. Une tension de 50 V provoque une élongation de 1,3 µm. Le déplacement du robot n'a pu être obtenu.

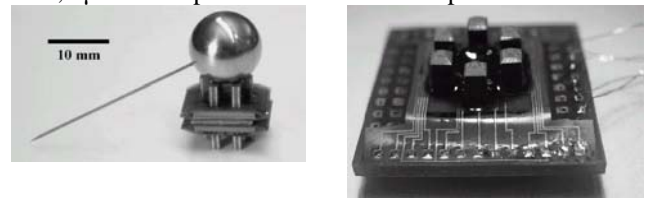


Fig. 5 Micro-robot à actionnement piézo-électrique. Le déplacement est obtenu en reproduisant les mouvements d'un insecte à six pattes [21].

2.1.5 A. Bonvilain et al., (2002, LAB, Université de Besançon)

Il s'agit toujours d'un robot à 6 pattes (cf. figure 6). Chacune des pattes est composée de deux actionneurs thermiques bilames silicium/SU8 dont les déformations sont verticales et de sens opposés. Ainsi en actionnant alternativement le bilame se déplaçant vers le haut, puis les deux bilames ensemble, un pas est obtenu. La dimension d'une patte est de 2 mm par 700 µm. 40 mA sous 5,6 V sont nécessaires pour obtenir une déflexion de 60 µm selon le plan horizontal. Des problèmes de connectique n'ont pas permis à ce jour de tester le robot complet.

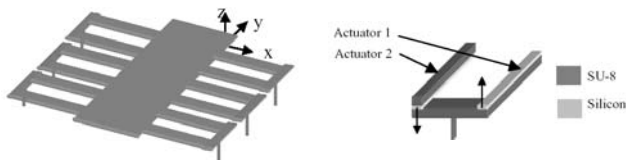


Fig. 6 Micro-robot à actionnement thermique [22].

2.2 Les réalisations avancées

2.2.1 T. Yasuda *et al.*, (1994 - Université de Tokyo)

Il s'agit à notre connaissance du premier micro-robot réalisé avec succès. La structure, dont les dimensions sont $0,7 \times 1,5 \text{ mm}^2$, est constituée de polysilicium. La présence de joints en polyimide permet un mouvement tridimensionnel des actionneurs. Ceux-ci sont actionnés via la table vibrante piézoélectrique sur laquelle le micro-robot se déplace : chaque actionneur a une fréquence de résonance propre. Lorsque la fréquence de la table correspond à celle de l'actionneur, celui-ci est activé. La superposition de plusieurs fréquences permet de contrôler les actionneurs de façon sélective. Le robot comprend six pattes, quatre servant à supporter la structure ainsi qu'à transmettre les vibrations de la table, les deux autres générant la force de déplacement (cf. figure 7). Il peut se déplacer selon deux degrés de liberté jusqu'à une vitesse de 6 mm/s , les deux pattes actives étant actionnées respectivement à 390 et 460 Hz . L'un des intérêts de ce système est l'absence de connectique vers une station distante. L'inconvénient majeur est la nécessité d'un substrat spécifique.

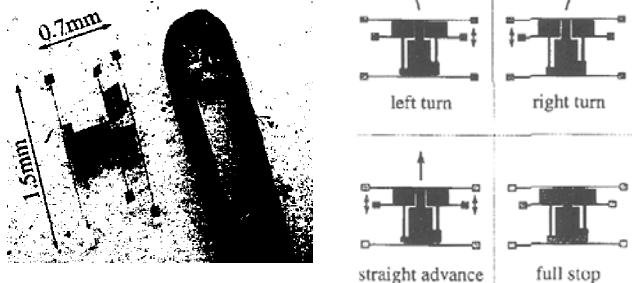


Fig. 7 Micro-robot à actionnement piézo-électrique. L'excitation provient du support, le micro-robot joue le rôle d'un résonateur [23].

2.2.2 T. Eberfors *et al.*, (1999 - Université de Stockholm)

Le robot consiste en un réseau de 8 pattes de silicium d'une longueur de $0,5$ à 1 mm disposées sur une surface de $15 \times 5 \text{ mm}^2$. Les pattes effectuent un mouvement de rotation hors du plan du substrat grâce à un rétrécissement thermique de joints en polyimide (cf. figure 8). Le déplacement est obtenu au moyen d'une commande asynchrone imitant le principe des cils des voix respiratoires, comme le micro-convoyeur du §2.1.3. Ce robot est l'unique réalisation fonctionnelle sur différents types de substrat et capable de supporter des charges non négligeables, jusqu'à 30 fois son propre poids, à savoir $2,5 \text{ mg}$. La vitesse maximale obtenue est de 6 mm/s à une

fréquence autour de 100 Hz , pour un signal carré de 18 V correspondant à une puissance de $1,1 \text{ W}$.

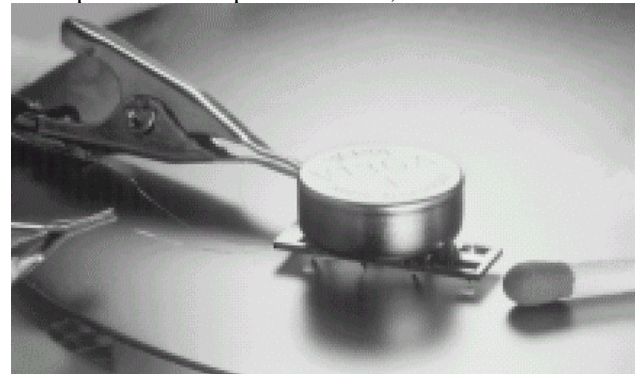


Fig. 8 Micro-robot à actionnement thermique [24].

2.2.3 M. Mita *et al.*, (2001 - Université de Tokyo)

Ce micro-robot de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ est constitué de 36 actionneurs dont la partie mobile vient heurter une électrode fixe pour provoquer un déplacement de la structure. La masse mobile est accélérée par la force électrostatique. Sa collision avec le stopper (cf. figure 9), qui est fixé à la base de l'actionneur, lui transmet une force d'impact qui, lorsqu'elle excède les forces de friction avec le substrat, génère un déplacement nanométrique. Une tension crête de 100 V à 200 Hz permet d'obtenir un déplacement de $2,7 \text{ }\mu\text{m/sec}$.

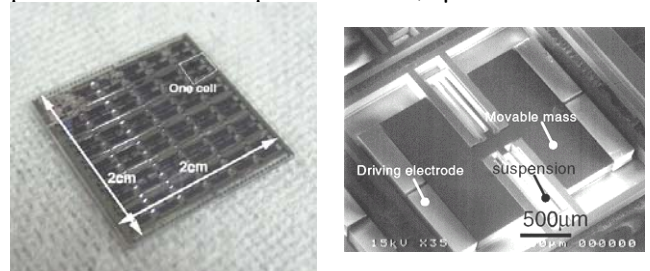


Fig. 9 Micro-robot inertiel [25].

2.2.4 S. Hollar *et al.*, (2002 - Université de Berkeley)

Ce projet est la continuité de celui présenté au §2.1.1 consistant à réaliser un système alimenté par des cellules photovoltaïques. C'est le premier robot autonome réalisé. Celui-ci comprend 2 pattes sur l'avant dont l'actionnement alterné permet de "traîner" le corps. Celui-ci est constitué de moteurs électrostatiques de type "ver de terre" permettant d'obtenir une variation d'angle de 30° sur les pattes, une cellule photovoltaïque et un circuit électronique basse tension. Les pattes sont réalisées en SOI (Silicon On Insulator) épais et composées de trois poutres articulées grâce à des charnières à deux niveaux de polysilicium (cf. figure 10). Le moteur électrostatique, en déplaçant la première poutre dans le plan du substrat, provoque une déflexion de la troisième poutre qui prend appui sur le bord du corps du robot. Le moteur développe une force de $120 \text{ }\mu\text{N}$ pour une tension de 30 V et a permis d'obtenir une variation d'angle de 30° sur les pattes. Le robot consomme $2,6 \text{ mW}$. Les premiers pas obtenus ont

déplacé le robot de 3 mm sur le coté sur une durée de 8 min.

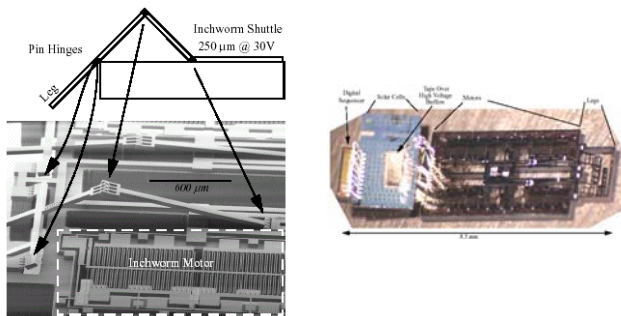


Fig. 10 Micro-robot à actionnement électrostatique. Alimentation par cellules photo-voltaïques [26-27].

3 Télé-alimentation d'un micro-robot

3.1 Principe

Le schéma de principe du système complet est représenté sur la figure 11.

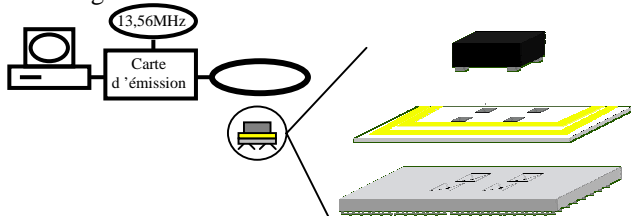


Fig. 11 Principe du système complet montrant la chaîne de transmission de l'énergie [15].

L'idée consiste à utiliser le couplage électromagnétique entre une antenne d'émission macroscopique et une antenne de réception intégrée sur le micro-robot. La réalisation du micro-robot nécessite l'utilisation des deux faces du substrat : la face supérieure supporte l'antenne de réception et une électronique permettant à la fois d'amplifier le signal électrique issu de l'antenne de réception, et de délivrer un signal de commande dont la fréquence et la phase conditionnent le sens et la vitesse de déplacement du micro-robot ; la face inférieure, en contact avec le support, peut être qualifiée de surface "active" car elle contient le réseau d'actionneurs censé produire le mouvement. La fréquence à laquelle s'effectue le couplage est égale à 13,56 MHz. Hormis par la fréquence elle-même, le rayon d'action du micro-robot est limité par la taille de l'antenne d'émission et la distance entre cette dernière et le micro-robot doit rester inférieure à une dizaine de centimètres.

Un tel principe permet de s'affranchir des câbles d'alimentation sans ajouter de masse comme cela serait le cas en employant une batterie embarquée. En outre, il est non seulement possible de transmettre de l'énergie, mais également de transmettre une information en modulant le signal émis vers l'antenne de réception intégrée sur le micro-robot.

3.2 Le micro-robot

Le mode d'actionnement choisi consiste à exploiter les forces électrostatiques et à les convertir en forces de frottement, ce même principe permet aux Scratch Drive Actuators (SDA) [28] de se mouvoir. Pour notre application, il a été nécessaire d'amplifier le déplacement produit par l'actionneur électrostatique à plaques parallèles en lui adjoignant un bras de levier (figure 12).

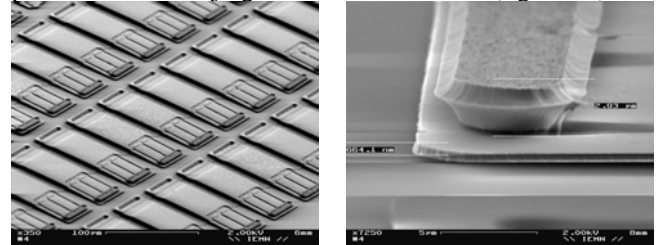


Fig. 12 Réseau de micro-actionneurs et détail de la partie en contact avec le support [15].

La tension requise par les actionneurs est de l'ordre de 40 V, soit environ la moitié de ce que peut délivrer le circuit électronique haute tension connecté à la sortie de l'antenne de réception. Les actionneurs sont agencés en réseau sur une surface calculée pour supporter la masse du substrat, du circuit électronique et de l'antenne. Le procédé de fabrication fait appel à l'usinage de surface à 3 niveaux de polysilicium. L'antenne intégrée, quant à elle, est fabriquée par électrodéposition d'or (25 μm) sur un substrat de résine SU-8 (figure 13). Cela permet d'hybrider ensuite l'antenne sur n'importe quel type de substrat.

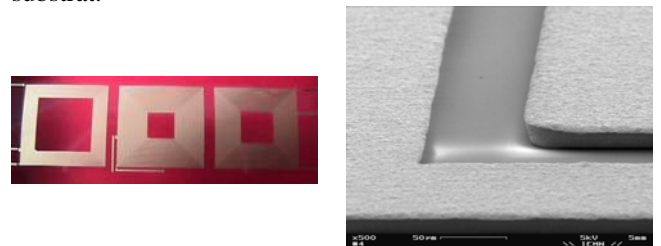


Fig. 13 Antenne intégrée en or électrodéposé sur un substrat de SU-8. Détail [15].

Le circuit électronique, fabriqué avec la technologie mixte I2T100 chez AMI Semiconductor, consomme 230 mW. Il fournit une puissance maximale de 23 mW en sortie ; des tensions variant entre 15 et 65 V, et un courant maximal de 1,5 mA pour une puissance minimale d'émission de 6 W. Il permet d'actionner de façon asynchrone quatre sorties grâce à une information transmise par modulation d'amplitude de la porteuse à 13,56 MHz.

4 Conclusion et perspectives

Plusieurs concepts de micro-robots ont été présentés et classés selon le degré de maturité de leur développement. Pour chacun, les principales performances ont été mentionnées. De cette étude bibliographique, il ressort que de nombreuses limitations restreignent l'exploitation des micro-robots à des fins applicatives. Parmi elle, la

source d'énergie qui pénalise l'autonomie de déplacement. Une solution, basée sur la télé-alimentation par couplage électromagnétique entre deux antennes est présentée succinctement ainsi que le micro-robot qui lui est associé. Cette étude est la première réalisation permettant, à distance, la commande asynchrone d'un dispositif MEMS par couplage inductif. Plusieurs points méritent d'être revus pour améliorer les performances du circuit électronique, l'amplitude de déplacement élémentaire produit par les actionneurs, la sensibilité à l'environnement à la fois de l'émission d'énergie (métal = apparition de courants de Foucault), et des micro-actionneurs (humidité, état de surface du support). La nécessité, liée au choix du mode d'actionnement électrostatique, d'obtenir des tensions d'au moins 20 V imposera vraisemblablement à l'avenir de découpler la commande de l'alimentation et d'utiliser plusieurs sources d'énergie. Par exemple, on pourrait utiliser des cellules photo-voltaïques pour générer la haute-tension et n'utiliser le couplage inductif que pour la télécommande. L'évolution du micro-robot en milieu confiné ne serait alors plus possible, mais la distance d'actionnement serait considérablement accrue.

Références

- [1] W. S. N. Trimmer, "Microrobots and micromechanical systems", *Sensors and Actuators*, vol. 19, n° 3, 1989, pp. 267-287.
- [2] T. Hayashi, "Micro mechanism", *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 3, (1991), pp. 2-7.
- [3] P. Dariot, R. Valleggi, M. C. Carozzat, M. C. Montesi and M. Coccot, "Microactuators for microrobots: a critical survey", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 2, 1992, pp. 141-157.
- [4] R. P. Feynman, "There's plenty of room at the bottom", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, vol.1, n° 1, 1992, pp. 60-66.
- [5] W. C. Tang, T. C. H. Nguyen and R. T. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures", *Sensors and Actuators*, vol. 20, 1990, pp. 25-32.
- [6] K. Minami, S. Kawamura and M. Esashi, "Fabrication of distributed electrostatic micro actuator (DEMA)", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, vol. 2, n° 3, 1993, pp. 121-127.
- [7] H. Fujita, "Future of actuators and microsystems", *Sensors and Actuators*, vol. A 56, 1996, pp. 105-106.
- [8] N. Takeshima and H. Fujita, "Design and control of systems with microactuators array", dans *Recent Advances in Motion Control*, K. Ohnishi et al. Eds. Nikkan Kogyo Shimun Ltd., 1990, pp. 125-130.
- [9] M. Ataka, A. Omodaka, N. Takeshima and H. Fujita, "Fabrication and operation of polyimide bimorph actuators for a ciliary motion system", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, vol. 2, n° 4, 1993, pp. 146-150.
- [10] S. Konishi and H. Fujita, "A conveyance system using air flow based on the concept of distributed micro motion systems", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, vol. 3, n° 2, 1994, pp. 54-58.
- [11] Y. Mita, S. Konishi and H. Fujita, "Two dimensional micro conveyance system with through holes for electrical and fluidic interconnection", *Proceeding of Transducers'97*, Chicago (USA), 1997, pp. 37-40.
- [12] M. Edo, Y. Watanabe, O. Morita, H. Nakazawa and E. Yonezawa, "Two dimensional micro-conveyer with integrated electrostatic actuators", *Proceeding of MEMS'99*, Orlando (USA), 1999, pp. 43-48.
- [13] Y. Mita, D. Collard, M. Mita and H. Fujita, "Fabrication of an inverted scratch drive actuator for a powerful and precise conveyance system", *Transaction of IEEE Japan*, vol. 119-E, 1999, pp. 1-2.
- [14] H. Nakazawa, Y. Watanabe, O. Morita, M. Edo and E. Yonezawa, "The two-dimensional micro conveyer", *Proceeding of Transducers'97*, Chicago (USA), 1997, pp. 33-36.
- [15] P. Basset, "Conception, réalisation et test d'un microsystème de transport alimenté à distance", Thèse de l'Université de Lille 1, 2003.
- [16] R. Yeh, J. J. Kruglick and K. S. J. Pister, "Surface-micromachined components for articulated microrobot", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, vol. 5, n° 1, 1996, pp. 10-17.
- [17] R. Yeh and K. S. J. Pfister, "Design of a low power silicon articulated microrobot", *Proceeding of International Conference on Robotics and Automation*, ??? (2000).
- [18] R. Yeh, S. Hollar, and K. S. J. Pfister, "Single mask, large force, and large displacement electrostatic linear inchworm motors", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, vol.11, n° 4, 2002, pp. 330-336.
- [19] P. E. Kladitis and V. M. Bright, "Prototype microrobots for micro-positioning and micro-unmanned vehicles", *Sensors and Actuators*, vol 80, (2000), 132-137.
- [20] D. Ruffieux, M. A. Dubois and N. F. de Rooij, "An ALN piezoelectric microactuator array", *proceeding of MEMS'00*, Myasaki (Japan), 2000, pp. 662-667.
- [21] U. Simu and S. Johanson, "Fabrication of monolithic piezoelectric drive units for a miniature robot", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, 2002, pp. 582-589.
- [22] A. Bonvilain and N. Chaillet, "Some prototypes of silicon-based thermal actuated microlegs for an insect-like micro-robot", *Proceeding of Mecatronics'01*, Besançon (France), 2001, pp. 437-442.
- [23] T. Yasuda, I. Shimoyama and H. Miura, "Microrobot actuated by a vibration energy field", *Sensors and Actuators A*, vol. 43, 1994, pp. 366-370.
- [24] T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kälvesten and G. Stemme, "A walking silicon micro-robot", *Proceeding*

- of Transducers'99, Sendai (Japan), 1999, pp. 1202-1205.
- [25] M. Mita, M. Arai, S. Tensaka, D. Kobayashi, P. Basset, A. Kaiser, P. Masquelier, L. Buchaillot, D. Collard and H. Fujita, "Electrostatic Impact-Drive Microactuator", Proceeding of MEMS'01, Interlaken (Suisse), 2001, pp. 590-593.
- [26] S. Hollar, A. Flynn, C. Bellew and K. S. J. Pister, "Solar Powered 10 mg silicon robot", proceeding of MEMS'03, Kyoto (Japan), 2003, pp. 706-711.
- [27] S. Hollar, A. Flynn, S. Bergreiter and K. S. J. Pister, "Robot leg motion in a planarized-SOI, 2 poly process", proceeding of Hilton Head'02, workshop, Hilton Head Island S.C., 2002.
- [28] T. Akiyama, and K. Shono, "Controlled stepwise motion in polysilicon structures ", J. Microelectromechanical Syst., Vol. 2, pp. 106-110,1993.

Micro et nano précision

Jean DAVID¹, Stéphane LELEU¹
Sébastien DUHEM², Ludovic LAHOUSSE², Georges Pierre VAILLEAU²

¹L2MA-ENSAM, 8 boulevard Louis XIV, 59046 LILLE Cedex

²BNM-LNE, 1 rue Gaston BOISSIER, 75724 PARIS Cedex 15

Positionnement de haute et très haute qualité géométrique

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter quelques concepts qui sont à la base des techniques qui rendent possibles la maîtrise des imperfections géométriques dans les machines et permettent l'accès à la fabrication industrielle d'objets très exigeants.

Mots clés

Métrologie, Nanométrie, Erreurs de géométrie, Correction logicielle, Conception.

1 Introduction

Le mot "précision", qui figure dans le titre de cet article est un mot difficile, parce que trop "imprécis", il rassemble et mêle trop de qualités différentes. Le métier qui existe autour de ce concept est très loin d'être une science exacte puisque son objet fondamental est la recherche et l'étude des erreurs et des incertitudes. Les progrès qui conduisent à rechercher des mesures de plus en plus fines amènent systématiquement à élargir la valeur relative des incertitudes.

1.1 Problématique

Les progrès de la construction d'objets de précision ont d'abord permis à l'homme de se situer dans l'univers qui l'entourait. Le développement des horloges, et leur application à la navigation, la réalisation d'instruments optiques ont permis l'observation de l'environnement lointain. Beaucoup plus près de nous, les perfectionnements du microscope ont conduit à la connaissance du très petit.

La maîtrise de la qualité géométrique a conduit à créer des objets qui, aujourd'hui remplissent notre univers en assurant des fonctions qui sont devenues indispensables. Pour prendre un exemple, un circuit intégré, évolué mais courant, existant dans tout ordinateur personnel sous forme d'une pastille de silicium d'un centimètre carré, gravée avec une finesse de 150 nanomètres comporte une cinquantaine de millions de composants élémentaires et leur réseau de connexions. Le coût de réalisation de cet objet est nettement inférieur à une centaine d'euros. Pour se faire une idée, on peut imaginer, après un grossissement d'un million de fois, un espace de 10 kilomètres de côté, gravé avec une finesse de détail correspondant à une quinzaine de centimètres, soit

l'épaisseur d'un mur mince. On peut dire que la complexité de ce circuit est comparable à celle de l'ensemble des constructions contenues dans une ville de l'importance de PARIS qui serait constituée d'immeubles de six ou sept étages, l'ensemble de la ville étant réalisé par la superposition simultanée sur toute sa surface d'étages en cohérence avec les étages déjà réalisés, les erreurs de cohérence étant suffisamment faibles par rapport à l'épaisseur des murs. En fait, la réalisation de ce circuit revient à concrétiser tous les détails des constructions de la ville sur le centimètre carré qu'elle occupe sur la carte de France au millionième. La machine qui réalise cette performance de précision en moins d'une seconde par circuit est appelée "photorépéteur". Cet exemple, mis en œuvre par une industrie majeure reste encore cependant très modeste par rapport au fonctionnement structures biologiques que le monde naissant des "nanotechnologies" commence à permettre d'approcher.

1.2 La notion d'information

L'opération de base dans une fabrication est de maîtriser la position relative d'un objet « outil » et d'un objet « pièce ». Dans une opération de fabrication, on vise à réaliser le plus parfaitement possible cette position, par contre, dans une action de vérification ou de contrôle, on peut être conduits à se contenter de "constater" simplement cette position relative, mais, en général avec un niveau d'incertitude plus fin. Cette nuance introduit une distinction entre la famille des machines-outils et celle des machines à mesurer. Il est essentiel, dans cette problématique de se rendre compte de ce que la qualité et la valeur des opérations tiennent dans la notion fondamentale d' "information". L'apparition récente, au cours du dernier demi-siècle des techniques qui permettent de traiter l'information a bien marqué la mise en évidence de cette fonction incorporelle dans les machines qui auparavant appartenaient fondamentalement au domaine des objets matériels. Cet exposé ne cherchera pas à présenter d'une façon exhaustive tout le savoir-faire qui existe dans la réalisation de machines précises mais se contentera de développer l'importance de cet aspect "information" dans la construction des machines de haute qualité géométrique. Il faut bien voir, en particulier, que cet

aspect information peut exister dans une structure de machine, même dans le cas où celle-ci ne comporte pas de potentiel de traitement informatique.

2. Un concept essentiel : la chaîne métrologique

Dans toute machine, l'objet "outil" et l'objet "pièce" qui sont en interaction sont reliés l'un à l'autre par une chaîne de solides et de liaisons. Les objets outil et pièce sont très souvent des solides assez parfaitement indéformables, parfois des influences à distance comme des rayons lumineux, mais qui, du point de vue qui nous intéresse se comportent comme des solides. D'une façon très familière, on peut dire que la chaîne métrologique supporte le trajet des micromètres, (ou des nanomètres) entre l'outil et la pièce par un chemin parallèle au contact outil/pièce et assure la maîtrise des positions relatives de ces deux objets au niveau de leur interaction. L'analyse de la qualité de la machine se fait obligatoirement par celle de cette chaîne. Les causes d'incertitude perturbant les éléments de cette chaîne, on peut prévoir les effets du cumul de diverses influences.

L'évaluation d'une machine, la mise en évidence de ses faiblesses, la mise en œuvre de solutions d'optimisation exigent l'identification de cette chaîne métrologique. Deux types de maillons composent une chaîne métrologique. Des éléments solides assurent une liaison permanente et théoriquement invariable entre leurs deux extrémités. C'est le rôle assuré dans une machine outil par les éléments constitutifs tels que les bâtis, les colonnes, les chariots. Un deuxième type de maillon, souvent moins visible sur le plan matériel assure la réalisation de liaisons modifiables, paramétrables entre les éléments du premier type. Ces liaisons variables sont à la base de la possibilité offerte de déplacer l'outil dans l'espace de travail de la machine. On les désigne par le terme "glissières". Il est fréquent, dans les machines classiques que ces glissières soient constituées simplement par des surfaces aménagées sur les extrémités des éléments solides de la machine. La mise en contact de ces surfaces assure une liaison géométrique entre les positions des éléments concernés. Dans le cas le plus courant, cinq degrés de liberté sont nominalement figés et le sixième degré de liberté, qui correspond au mouvement nominalement permis par la liaison glissière est contrôlé par un mécanisme de positionnement variable, par exemple, par un système vis/écrou éventuellement doté d'une fonction asservissement. La qualité géométrique de la glissière dépend fortement des phénomènes présents au niveau du contact physique entre les surfaces, et du maintien de ce contact. Des éléments intermédiaires peuvent participer à cette relation entre deux surfaces, un lubrifiant, des éléments roulants ou des éléments flexibles. Pour l'instant, nous ne considérerons que l'aspect « liaison en position » associé à ce contact, nous ne conservons donc que le point de vue "information de position relative" entre les solides qui portent les surfaces de la glissière. Nous pouvons

remarquer que les éléments en contact effectuent d'une façon implicite mais réelle un traitement d'information. Le contact de deux surfaces à pression faible correspond à la recherche de points les plus saillants. Lorsque la pression de contact augmente, la déformation élastique des surfaces en contact, correspondant à une minimisation de l'énergie de déformation élastique conduit vers des solutions aux moindres carrés. La présence de fluides entre les surfaces réalise d'une façon physique la recherche d'une solution moyenne sur l'ensemble de points en regard. Un ensemble d'éléments roulants, assimilables chacun à un ressort réalise une fonction équivalente, mais apporte la contribution de ses propres défauts de géométrie, très dépendante du phasage en rotation des divers éléments qui est très peu reproductible. Les liaisons réalisées par l'intermédiaire d'éléments flexibles réalisent une forme de traitement de l'information. Soumis à une déformation imposée suivant un degré de liberté, ils réagissent par une variation prévisible des cinq autres degrés de liberté. Leur comportement, exempt de phénomènes de frottement est parfaitement répétable. De la même façon, nous ne considérerons les éléments solides de la chaîne que sous la fonction "information de position relative" entre les deux extrémités de l'élément considéré. Les éléments correspondants sont alors considérés comme des "transmetteurs de position". Le premier enseignement à tirer de cette notion de chaîne métrologique est lié à la mise en évidence de la longueur développée de la chaîne d'éléments successifs à travers laquelle on devra préserver une qualité géométrique équivalente à celle qui est demandée sur l'objet fabriqué qui est, lui de relativement faible dimension.

2.1 Chaîne série ou chaîne parallèle

Dans les machines classiques, on identifie assez souvent une chaîne linéaire qui relie l'outil et le support de pièce, table ou autre. On laissera de côté les chaînes ramifiées qui correspondent aux machines à têtes multiples relativement rares et qui ne posent pas de problèmes logiques particuliers. Il est par contre intéressant de prendre en considération les chaînes de type parallèles, assez voisines des structures de robots du même nom et qui présentent un certain nombre d'intérêts, en particulier sur le plan économie de réalisation, légèreté et rigidité. Les calculs complexes liés à ce type de structure sont considérablement simplifiés dans le cas des petits déplacements correspondant aux erreurs. La linéarité liée à ce cas particulier autorise des temps d'exécution des calculs très brefs. D'autre part, la limitation à des petits déplacements rend les erreurs commises sur la modélisation de la structure peu sensibles. C'est une structure idéale pour réaliser matériellement des corrections de position.

Un cas particulier de chaîne parallèle existe, dans la mécanique de haute précision, que l'on peut appeler "chaîne parallèle orthogonale". Un bon exemple est fourni par l'architecture devenue classique de la table croisée qui est à la base des photorépéteurs dans laquelle, la table porte-objet

est bordée par deux miroirs plans et perpendiculaires de très haute qualité qui constituent les réflecteurs mobiles de deux interféromètres dont la direction support des faisceaux passe par la zone de travail. Depuis peu de temps, des règles de lecture incrémentales bidimensionnelles sont disponibles. Cette disposition permet qui permet de réaliser des mouvements bidimensionnels sans avoir à superposer deux étages de mécanismes précis conduit à économiser sur le nombre de maillons des chaînes et sur le cumul des incertitudes lié à ce nombre.

La notion de chaîne métrologique qui vient d'être exposée est indispensable pour permettre le cumul des différentes sources d'erreur qui pourront être identifiées dans une machine et prévoir ainsi l'effet qui sera constaté au niveau de l'élément terminal de la machine.

3 Les perturbations physiques qui compromettent la précision

La transmission de l'information "position" à travers la chaîne métrologique s'effectuant à travers des éléments concrets est soumise à des altérations très diverses qui ont pour résultat d'aboutir à des erreurs dans la position géométrique entre l'outil et la pièce travaillée. Il est intéressant d'esquisser un inventaire de ces causes. Il sera ensuite possible de minimiser ou de corriger l'effet de ces causes ou encore mieux d'éliminer leur influence.

3.1 Erreurs de réalisation des références métrologiques

Ces références sont réalisées sous forme d'objets matériels comportent des imperfections.

Les surfaces de glissière présentent des défauts de forme, ce qui engendre des mouvements erronés, les erreurs de réalisation des transmetteurs de position conduisent à des mouvements dont la position relative est différente de ce qui avait été prévu. A ce stade, nous pouvons considérer que ces erreurs de position sont stables. Elles sont de ce fait corrigibles d'une façon assez universelle par le moyen d'une correction informatique des informations. Dans certains cas, des moyens de correction matériels peuvent rester plus intéressants.

3.2 Le principe d'ABBE

Ce principe qui est dû au créateur de la modélisation du microscope optique a conduit à la réalisation d'un instrument de mesure dimensionnel capable de maîtriser des épaisseurs de bagues et de lentilles avec une incertitude de trois micromètres. Cette maîtrise était indispensable pour faire profiter le microscope des optimisations induites par la connaissance théorique du fonctionnement optique de son objectif. Ce principe recommande de toujours placer l'étalon de mesure dans le prolongement de la cote à mesurer, ce qui permet un report de l'information "longueur" avec le minimum d'incertitude, l'effet des rotations parasites des chariots devenant alors multiplié par

un bras de levier nul (Fig. 1).

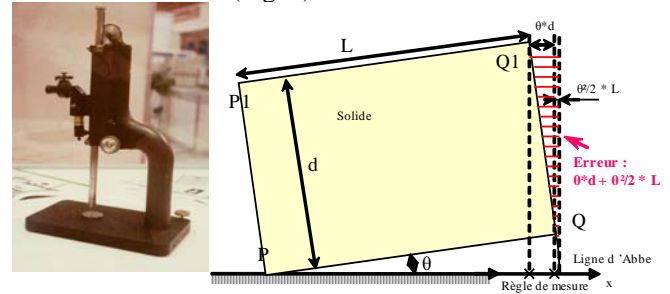


Fig. 1 : Mesureur et principe d'ABBE

3.3 Causes physiques de variation des éléments constituant la machine

Les différents éléments participant à la chaîne métrologique sont soumis à des perturbations susceptibles de modifier l'information qu'ils portent. Nous pouvons examiner les plus fréquentes.

3.3.1 Application d'efforts

Les efforts appliqués sur les éléments constituant la chaîne métrologique, solides de liaison autant que glissières provoquent des déformations. Nous devons classer ces efforts en deux catégories : ceux qui sont prévisibles et répétables, et ceux qui ne le sont pas. Dans la première catégorie, nous trouvons principalement les poids des éléments de la machine qui correspondent à des efforts importants, mais qui présentent souvent un caractère de permanence suffisant. Il faut cependant se méfier des machines à éléments interchangeables et des machines présentant des éléments lourds susceptibles de subir des mouvements de pivotement autour d'axes non verticaux. Dans la seconde catégorie, nous trouvons principalement les efforts liés au travail réalisé par la machine. Ces efforts sont cependant souvent très modérés quand on doit mobiliser le potentiel de précision de la machine.

L'existence de vibrations provenant de la machine elle-même ou de l'environnement introduit des efforts et donc des déformations des éléments. Ils sont beaucoup plus difficiles à prendre en compte que ceux qui proviennent de la pesanteur. Des solutions de protection internes à la machine ou externes existent mais ce problème reste difficile.

3.3.2 Variations de température

La dilatation homothétique :

Les variations de température provoquent des déformations des éléments solides par le phénomène de dilatation. Les aciers ont un coefficient de dilatation de 12.5 micromètres par mètre et par degré Kelvin. Des matériaux particuliers, l'Invar, alliage à 36% de nickel, ou le Zérodur, verre comportant une phase vitreuse et une phase cristalline permettent de diviser par dix ou cent cette sensibilité à la dilatation. Ils sont cependant coûteux et difficiles à mettre

en forme et à utiliser. Bien que parfois utiles, ils ne constituent pas une réponse universelle au problème de la dilatation. Ce phénomène de dilatation, bien connu de tous correspond à la dilatation homothétique répondant à une variation homogène de température. Dans ce cas, les erreurs sur les évaluations de longueurs sont bien en rapport avec le coefficient de dilatation, éviter les effets de ce phénomène conduit à prendre des précautions relativement élémentaires. En dernier recours, une mesure de température des éléments peut apporter une amélioration de précision par le moyen d'une correction relativement simple.

La dilatation avec variation non homogène de température :

La répartition de température dans les éléments qui composent la structure d'une machine, prise à un moment donné résulte de l'écoulement dynamique de quantités de chaleur. Ces écoulements qui trouvent leur origine dans les sources internes de la machine ou dans les influences non homogènes de l'environnement présentent un caractère dynamique, ils dépendent des inerties thermiques des éléments et de la conductivité des matériaux qui composent les éléments. Un régime transitoire correspond obligatoirement à une répartition des températures non homogène. Dans ce cas, les éléments de structure des machines vont présenter des effets de bilame, avec des champs de déformation et de contraintes qui vont provoquer des rotations relatives des éléments de structure. L'effet de ces rotations sur les erreurs de machine peut conduire à des effets d'amplification très sensibles. Il est important de supprimer dans le dessin des pièces, les structures en col de cygne pour les remplacer par des structures en forme de cadres. Les remèdes à ces difficultés liées à la déformation d'origine thermique font appel au bon sens et à la perception très rigoureuse des phénomènes d'écoulement de chaleur. Les compromis sont très délicats à décider, on se trouve souvent devant des principes contradictoires. Il est important de privilégier l'emploi de matériaux à bonne conductivité thermique, tels, par exemple que les alliages d'aluminium, malgré un coefficient de dilatation deux fois plus élevé que celui des aciers, la conductivité thermique étant une douzaine de fois plus élevée. Il ne faut pas oublier que prévoir des pièces creuses diminue la conductivité thermique effective dans des proportions sévères et diminue parallèlement l'inertie thermique, ce qui contribue à sacrifier la stabilité de forme. Une bonne stratégie consiste à concevoir des éléments massifs et de les protéger contre les perturbations par des écrans, de préférence conducteurs de la chaleur qui présenteront une température homogène. La réalisation de zones thermiquement isolées que l'on pourrait concevoir pour protéger certains éléments sensibles est parfois utile mais souvent dangereuse car elle est susceptible d'entretenir des gradients thermiques importants sous la simple influence de rayonnements peu énergétiques. Il est par exemple catastrophique de protéger des rayons lumineux, comme le faisceau d'une lunette autocollimatrice

par un tube isolant à la surface duquel s'établissent spontanément de forts gradients thermiques générateurs de courants de convection instables. La protection est utile vis-à-vis des courants existant naturellement dans une salle, mais il faut absolument le faire avec un tube épais en aluminium ou en cuivre qui présentera une température de surface homogène [3].

4. La correction des erreurs de machines

La qualité géométrique des machines résidant dans une « information », il vient naturellement à l'esprit de corriger cette information. Dans le métier de la machine-outil, il était bien connu, mais mal codifié qu'il fallait courber les surfaces de glissières pour obtenir des mouvements vraiment rectilignes. Des mécanismes, parfois assez complexes sont prévus pour engendrer des efforts qui provoquent sur les éléments de structure des machines des déformations qui compensent les déformations naturelles dues, par exemple à la pesanteur.

La présence devenue universelle de calculateurs numériques autorise maintenant une possibilité de stockage et de traitement d'information presque illimitée. De ce point de vue, le cas des machines à mesurer est très favorable puisqu'il suffit de modifier en ajoutant simplement des corrections les informations qu'elles fournissent sur la position de leur outil qui est presque toujours sphérique. Le cas des machines d'usinage est plus complexe, s'il est relativement facile de modifier les coordonnées cartésiennes de l'extrémité d'un outil, il n'est pas toujours facile de modifier la direction d'un outil long. Même sur des machines dites cinq axes qui ont ce potentiel, la réalisation de petits mouvements de correction peut être difficile du fait des limites de la mécanique de la machine. La solution peut alors résider dans l'introduction de mécanismes spécialisés de correction.

4.1 Limites de la correction des machines

La correction des machines peut être assez facilement basée sur une information stockée correspondant au relevé des erreurs de la machine saisies lors d'une opération d'étalonnage. On détermine alors une correction efficace pour l'état dans lequel se trouve la machine lors de cette opération d'étalonnage. Le problème se pose de la validité de cette information qui peut se révéler périmée et ne peut porter que sur la part "répétable" de ces erreurs. Il faut d'ailleurs vérifier si cette information reste stable à long terme. La part non répétable de ces erreurs ne peut être corrigée, en particulier celle qui relève des effets vibratoires et des variations de l'état thermique.

4.2 Vers une correction plus efficace de la géométrie des machines par l'intégration du concept "information"

Une évolution vers une correction plus efficace consiste à actualiser très fréquemment les informations sur la variation

de géométrie à partir d'informations fournies par des capteurs fonctionnant en temps réel ou légèrement différé [1].

Dans la chaîne métrologique d'une machine, les guidages constituent un maillon faible vis-à-vis des perturbations physiques diverses, en particulier vis-à-vis des efforts susceptibles de s'exercer à ce niveau. L'existence de jeux, le comportement mal déterminé des éléments intermédiaires contribuent à introduire des effets non répétables, donc très difficiles à corriger. Le potentiel de traitement d'information qui est maintenant systématiquement disponible autorise à disposer un certain nombre de capteurs susceptibles de rendre compte de la position relative des deux maillons auxquels ils sont reliés. De cette façon l'information "position relative" sera mise à jour en permanence et sa qualité ne dépendra que de celle des capteurs. Un avantage fondamental est la très grande facilité disponible pour créer une information redondante à partir d'un ensemble de capteurs en nombre surabondant. L'information sera traitée par le biais d'une optimisation aux moindres carrés. On obtient ainsi, du point de vue de la précision les avantages qui sont normalement l'apanage des systèmes d'appui hyperstatiques. Cette redondance affine le niveau d'incertitude que l'on peut attendre mais cet avantage est relativement mineur sur le plan du rapport coût/qualité. Un avantage important est de permettre d'éviter les positions "singulières", qui peuvent parfois se présenter et compromettre la précision, mais le vrai avantage est de disposer en permanence d'une information sur la cohérence des capteurs et ainsi de disposer instantanément d'une alerte sur une défaillance d'un des capteurs. En dehors de ce cas de défaillance, le système fournit en permanence une évaluation sur la validité des hypothèses de fonctionnement et sur le niveau réel des incertitudes mises en jeu. Les capteurs mis en jeu dans cette fonction peuvent normalement être des capteurs à faible course, destinés à ne mesurer que de très faibles variations, il est relativement facile d'utiliser des capteurs de grande précision sans exiger une très grande dynamique. Les capteurs sans contact disponibles sur le marché correspondent bien à cette fonction.

Il peut se révéler intéressant d'appliquer aux capteurs de grand déplacement la logique de redondance afin de bénéficier des avantages cités précédemment sur les paramètres de déplacement à grande variation : respect du principe d'ABBE par le moyen d'un calcul simple, effet de moyenne sur les incertitudes, détection de défaillance.

4.3 Vers la structure métrologique "dissociée"

Un développement du concept peut être trouvé en spécialisant les surfaces de guidage dans leur rôle de "porteur d'information" et de les dispenser totalement de la fonction "transmission d'efforts". Leur forme géométrique qui n'a pas besoin d'être parfaite, elle est susceptible d'être étalonnée et corrigée. De ce fait, la conception leur structure qui n'a à supporter aucune autre charge que son poids peut

être extrêmement libre et optimisée vers une très grande stabilité géométrique. Leur supportage peut en particulier être optimisé d'une façon qui les rende très peu sensibles aux vibrations de l'environnement.

Comme il reste nécessaire de maintenir en position les éléments de la machine et de supporter les efforts éventuels de travail, on doit prévoir, en parallèle à l'ensemble des éléments qui constituent la chaîne métrologique, une chaîne "porteuse" dont la fonction sera de supporter les éléments de la chaîne métrologique et d'amener l'outil en position relative par rapport à la pièce d'après les informations fournies par cette chaîne métrologique.

5 Exemple de réalisations

Nous présentons les deux réalisations effectuées au sein du BNM-LNE en collaboration avec le L2MA mettant en œuvre les principes présentés. La première est un plateau pivotant de haute précision, aujourd'hui référence nationale de mesure angulaire française. La seconde, en cours de réalisation, est une table croisée de résolution nanométrique.

5.1 Plateau pivotant de référence

Le plateau pivotant de référence est la première matérialisation du concept de structure métrologique dissociée. La fonction guidage en rotation est réalisée par un plateau à billes classiques qui supporte les efforts de la table mobile du plateau. Les erreurs de position du mouvement de rotation de la table sont mesurées en permanence par une structure métrologique composée de capteurs sans contact en face d'une couronne bi-conique (Fig. 2). Le nombre de capteurs réside dans un compromis entre coût et le niveau d'incertitudes recherché. Avec un choix de huit capteurs, nous obtenons une incertitude élargie ($k=2$) de 0,5 micromètre dans l'espace de travail du plateau d'un diamètre de 500mm avec une cohérence des capteurs de l'ordre de 0,1 micromètre. La surveillance de ce paramètre permet la détection de dysfonctionnements éventuels et garantit la qualité de la mesure en cours d'exécution. Les sources de chaleurs sont placées majoritairement à l'extérieur du plateau et les pièces métrologiquement sensibles sont en alliage d'aluminium afin de diminuer les effets néfastes des gradients thermiques.

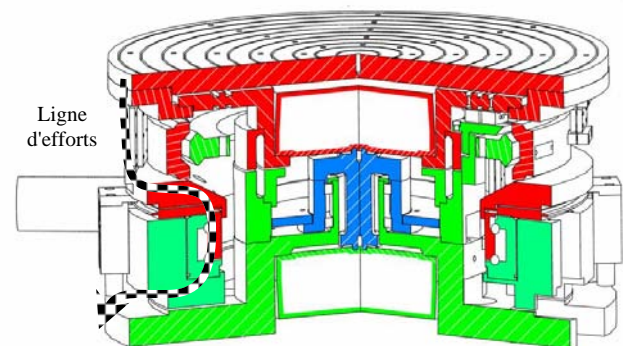


Fig. 2 : Eclaté du plateau de référence

La mesure de l'angle de rotation est assurée par deux codeurs montés en opposition permettant une grande redondance dans l'acquisition et ainsi de diviser par plus de dix les incertitudes intrinsèques de chaque codeur [4]. L'incertitude obtenue pour une opération de qualification de polygone optique est inférieure à 0,04 seconde d'angle.

Les pièces qui sont liées à la partie tournante sont en rouge, les pièces fixes sont en vert et les pièces du mécanisme d'animation permanente des deux codeurs sont en bleu. Les pièces de la structure métrologiquement sensible sont hachurées et dissociées de la structure porteuse des efforts traversée par la flèche de descente des efforts. Les liaisons entre la structure métrologique et la structure porteuse sont assurées par des liaisons de découplage isostatique par lames flexibles.

5.2 Table croisée nano métrologique

Le projet nanométrie du BNM-LNE vise à développer une machine innovante capable de mesurer des objets tridimensionnels avec des incertitudes nanométriques [2]. Cette machine associe une structure mécanique mobile et un capteur de type microscope à force atomique. Son étendue de mesure sera de 300x300 mm suivant les axes X et Y, et 50 micromètres suivant l'axe Z. Les incertitudes prévisionnelles suivant X ou Y sont de 10 nanomètres pour un déplacement de 20 mm et 30 nanomètres pour un déplacement de 300mm. L'incertitude prévisionnelle suivant l'axe Z est de l'ordre du nanomètre pour un déplacement de 50 micromètres.

Comme pour le plateau de référence, la machine est basée sur l'application du concept de structure métrologique dissociée. L'objet à mesurer est localisé par rapport à la partie supérieure de la machine par deux chaînes métrologiques. L'une d'elle assure la localisation de l'objet dans le plan XY, l'autre assure la localisation de l'objet par rapport au plan XY (mesure de l'altitude Z et des rotations de l'objet autour des axes X et Y). Le microscope à champ proche est directement lié à cette partie supérieure qui constitue la matérialisation de l'espace fixe de référence.

La mobilité de l'objet est donnée par la superposition de trois mouvements. Les grands déplacements sont donnés par une table croisée du commerce de 300mm sur 300mm, les erreurs de position entraînées par cette table sont de l'ordre de plus ou moins cinq micromètres (Fig. 3).

Ces défauts sont mesurés en permanence par les chaînes métrologiques mais doivent être physiquement corrigés afin de maintenir la position de l'objet par rapport au microscope. Cette correction active est réalisée par un dispositif construit autour de six actionneurs indépendants à quartz, disposés sous la forme d'une structure hexapode permettant d'obtenir tous les mouvements possibles avec une amplitude de l'ordre de 60 micromètres. Ce dispositif permet également de générer, sans mouvement de la table 300x300mm, de tout petit déplacement. Il a également été prévu de pouvoir générer des déplacements d'une vingtaine de millimètres, sans avoir à faire intervenir le système de

correction active, par une table croisée basée sur le principe de doubles lames flexibles emboîtées. L'objectif de ce dispositif est de permettre, avec une précision nanométrique, le balayage d'une zone de dimensions centimétriques.

La principale difficulté réside dans la stabilité thermique de la structure. Les choix des matériaux, de la forme des pièces, des écrans thermiques cherchent à répondre à cette préoccupation.

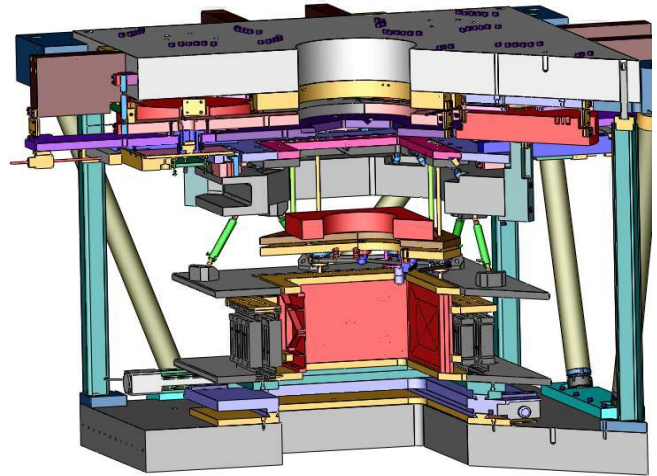


Fig. 3 : Table croisée nanométrique

6. Conclusion

La métrologie dimensionnelle des micro et nanotechnologies se trouve confrontée à un manque croissant de références. L'application des pratiques courantes de conception de machine même de précision trouve leurs limites face aux perturbations extérieures même fortement diminuées. Les concepts présentés permettent d'obtenir des instruments de très haute qualité métrologique en dissociant les structures d'efforts des structures réalisant la prise d' "information" mesure.

Références

- [1] J.M. David et T. Coorevits, "Les limites de la correction par logiciel des erreurs de géométrie des M.M.T. – Définition d'une architecture nouvelle de machines", actes du 6^{ème} congrès International de Métrologie, 1993.
- [2] S. Ducourtieux, F. Larsonnier, S. Duhem, L. Lahousse, J. Salgado, J. David, G.P. Vaillau, "Le programme de recherche et développement en nanométrie du BNM-LNE", actes du 11^{ème} congrès International de Métrologie, 2003.
- [3] S. Leleu, "Contribution à l'évaluation des angles", Thèse de doctorat ENSAM, janvier 2000.
- [4] S. Leleu, J.M.David et G.P. Vaillau, "La mesure des angles au BNM-LNE, création d'une nouvelle référence de mesure angulaire", actes du 11^{ème} congrès International de Métrologie, 2003.

Session 4

Perception et Mouvement

- Analyse-synthèse du mouvement humain
F.Multon, A.Créteil
- Avancées récentes en asservissement visuel
F.Chaumette
- Restitution et modélisation des paysages pour la production cartographique à partir d'imagerie aéroportée
H.Le Men, M.Pierrot Deseilligny

Analyse-synthèse du mouvement humain

F. Multon^{1,2}A. Cretual¹¹Laboratoire de Physiologie et Biomécanique de l'Exercice Musculaire, Univ. Rennes 2²Projet SIAMES, IRISA

Université de Rennes 2, av. Charles Tillon, 35044 Rennes

Franck.Multon@uhb.fr Armel.Cretual@uhb.fr

IRISA, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes

Résumé

Le couplage entre l'analyse et la synthèse du mouvement humain offre de nouvelles perspectives. Ce couplage permet en effet d'identifier des paramètres supposés intervenir dans le contrôle du mouvement humain. Simuler de nouveaux gestes à partir de ces modèles permet de valider ou non l'influence de ces paramètres en confrontant les trajectoires simulées à un corpus de mouvements capturés.

Mots Clef

Biomécanique, simulation, mouvement humain.

1 Introduction

Depuis J. Marrey [14], les moyens d'exploration du mouvement humain ne cessent de se perfectionner. Depuis les années 80, la simulation du mouvement humain a, elle-aussi, subi de nombreuses transformations. Les premières techniques [23] tentaient de reproduire les trajectoires couramment observées en biomécanique et, plus particulièrement, pour la locomotion humaine [1,22,17]. Toutefois, pour vérifier des contraintes liées à l'environnement dans lequel évolue le personnage simulé, il était nécessaire de modifier ces trajectoires « modèles ». Ainsi, plusieurs auteurs [5] ont utilisé des techniques issues de la robotique pour adapter le mouvement à un environnement et à une morphologie donnée. La cinématique inverse a été ensuite largement utilisée pour corriger des mouvements simulés ou capturés afin de vérifier les contraintes de l'environnement [6,9]. Cependant, ces techniques résolvent généralement le problème de manière instantanée, sans considérer la totalité du mouvement qui peut cependant s'en trouver affectée. Une alternative consiste à utiliser des contraintes spatio-temporelles et à résoudre le problème globalement sur le mouvement [7].

Toutes les approches présentées ci-dessus se basaient uniquement sur la cinématique et ne considéraient pas les aspects dynamiques du mouvement. Plusieurs auteurs [12,16] ont donc modélisé le corps humain comme un système poly-articulé mû par des actionneurs et des

contrôleurs. Cependant, le problème du réalisme du mouvement ainsi généré n'était que repoussé. En effet, tout dépendait des contrôleurs mis en place pour piloter le modèle mécanique. Ces contrôleurs pouvaient être identifiés à partir de mesures, par optimisation. Toutefois, ce contrôleur restait valide au voisinage des conditions expérimentales. D'autres techniques [19] consistaient à chercher, par optimisation, un contrôleur qui réponde au problème posé, sans se soucier du réalisme. Dans ce cas, les mouvements ainsi générés ne pouvaient pas être confrontés à des données réelles ou à des règles issues de l'analyse du mouvement. La littérature biomécanique propose très peu d'information permettant de préciser ces contrôleurs. On peut toutefois relever les nombreux travaux sur la modélisation dynamique du muscle isolé [11]. De plus, le formalisme utilisé pour modéliser des systèmes poly-articulés commandés (via des systèmes dynamiques) n'a été que très rarement utilisé en biomécanique.

La fusion entre les domaines de l'analyse et de la synthèse du mouvement s'est accéléré avec le développement récent des systèmes de capture du mouvement. En effet, plutôt que de s'intéresser directement aux contrôleurs du mouvement humain, plusieurs approches ont proposé des méthodes d'adaptation de mouvements capturés à de nouvelles situations [13,10,15]. Ces techniques cherchent indirectement à modéliser les opérateurs « naturels » permettant de modifier un mouvement tout en assurant d'en conserver le réalisme. En parallèle, dans le domaine de la biomécanique et des neurosciences, plusieurs auteurs ont identifié des fondamentaux du geste humain. Cependant, ces approches sont spécifiques à un paramètre donné comme, entre autres, la stabilisation de la tête [18], le respect d'un profile type de vitesse dans des mouvements de bras [20,21] ou la coordination des articulations du bas du corps lors de la locomotion [3].

Dans cet article, nous présentons une approche basée sur le couplage entre l'analyse et la synthèse du mouvement humain. Cette approche consiste à analyser des trajectoires capturées pour générer quasi-

automatiquement des modèles paramétrables de mouvements. L'objectif est double :

- identifier et modéliser des fondamentaux du geste à partir de données cinématiques,
- simuler de nouveaux comportements et les comparer à des trajectoires réelles pour valider ou non ces fondamentaux.

Dans une première partie, nous présentons la démarche mise en œuvre pour coupler l'analyse et la synthèse du mouvement. Nous présentons ensuite un résultat obtenu dans le cas particulier de la locomotion humaine.

2 De l'analyse à la synthèse du mouvement

Lorsqu'on s'intéresse à l'humain, il est courant de considérer un grand nombre de degrés de liberté dont certains peuvent être très complexes (c'est le cas de l'épaule, par exemple). Pour se ramener à un jeu plus réduit de paramètres, le squelette humain est simplifié en 5 segments non-rigides connectés entre eux (voir figure 1) :

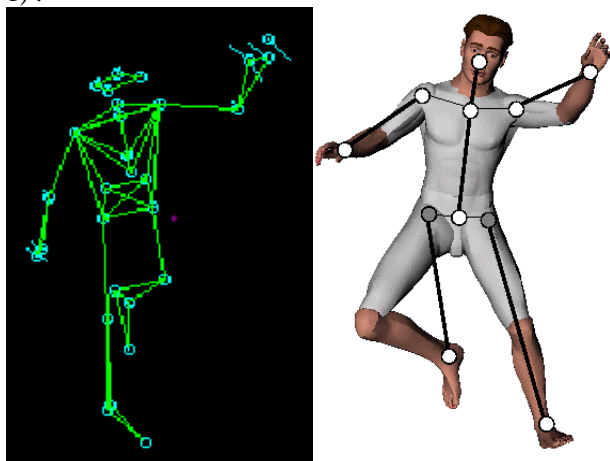


FIG. 1 : position des marqueurs externes et représentation du squelette simplifié utilisé pour générer des modèles paramétrables de mouvements.

- les jambes, donnant la position des chevilles relativement à la hanche et indiquant le plan formé par les segments cuisse et tibia,
- les bras, donnant la position des poignets relativement aux épaules et indiquant le plan formé par les segments humérus et avant-bras,
- et le tronc représenté par trois points caractéristiques et leurs tangentes (milieu des hanches, 7^{ème} cervicale et 10^{ème} thoracique) permettant de calculer une spline longeant la colonne vertébrale.

Tout mouvement peut alors être analysé avec ce paramétrage réduit.

Malgré la simplification, ce paramétrage contient intrinsèquement un grand nombre d'informations puisque les articulations non-représentées peuvent être retrouvées par cinématique inverse. D'un autre côté, travailler sur un ensemble réduit de variables permet de simplifier la recherche d'invariant dans les mouvements produits. Pour

comparer et analyser des mouvements provenant de plusieurs sujets pouvant avoir des morphologies différentes, ces données sont normalisées chacune par la taille du segment auquel elles appartiennent. Ainsi, la position du poignet, relativement à l'épaule est normalisée par la longueur du bras. On obtient ainsi des données adimensionnelles.

De même, pour chaque mouvement considéré, l'échelle de temps est normalisée par la durée du geste (liée à la détection d'un événement de début et de fin commun à toutes les mesures).

Lors d'une séance de capture du mouvement, les marqueurs externes positionnés sur le squelette sont mis en correspondance avec les différents centres articulaires qui composent notre squelette simplifié. Pour chacun d'eux, il est alors possible d'étudier la trajectoire d'un paramètre de ce squelette (par exemple la trajectoire, normalisée par la taille de la jambe, de la cheville dans le repère de la hanche, appelée aussi « poulaine »). Cette trajectoire est décomposée en splines de manière récurrente. Une première étape consiste à prendre comme points de contrôle tous les points de rebroussement de la courbe, ayant une tangente horizontale. Ces points de contrôle sont appelés primaires. Ils caractérisent des positions extrêmes dans le mouvement et ont une répercussion directe sur des contraintes géométriques de positionnement dans l'espace. On cherche ensuite des points de contrôle secondaires où la tangente est colinéaire à la droite reliant deux points de contrôle primaires (cf. figure 2). Cette opération est répétée de manière récursive jusqu'à obtenir une erreur donnée par rapport à la trajectoire acquise.

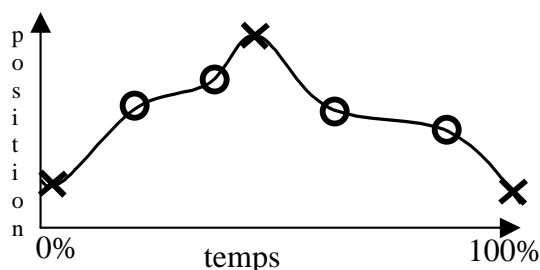


FIG. 2 : décomposition d'une trajectoire en points de contrôle primaires (croix) et secondaires (cercles).

Cette opération de décomposition est effectuée pour chaque essai capturé. Les points de contrôle sont alors soit moyennés pour tous les sujets (pour obtenir un mouvement « moyen ») soit conservés sujet par sujet. A partir de ce jeu de paramètres, il est possible de retrouver le mouvement probable d'une personne dans des conditions similaires, sans se soucier des problèmes de durée du geste et de morphologie. Toutefois, pour des mouvements s'effectuant dans des conditions légèrement différentes, il est nécessaire de définir des opérateurs. Ces opérateurs ont pour objectif de modifier les points de contrôle en fonction de la situation. Ainsi, pour une locomotion humaine, un opérateur se charge de modifier

les points de contrôle pour obtenir des pas plus ou moins longs. Ces opérateurs sont obtenus de manière statistique à partir d'un corpus de mouvements. Les modifications s'appliquent directement sur les points de contrôle primaires. Les points de contrôle secondaires subissent une modification relative aux points de contrôle primaires voisins. Dans l'exemple de la figure 3, les points de contrôle primaires 4 et 5 sont modifiés directement par un opérateur. Les points secondaires 2 et 3 subissent une transformation liée au déplacement du point 4.

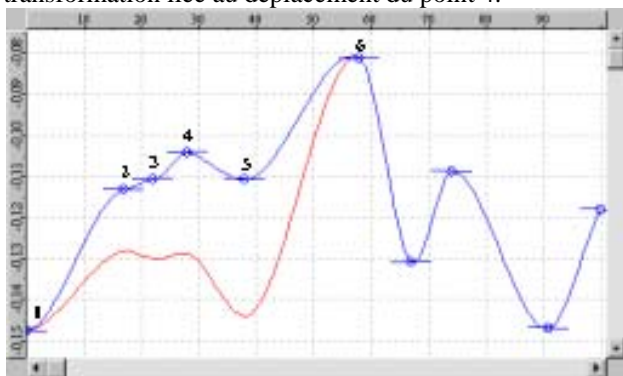


FIG. 3 : application d'un opérateur sur un ensemble de points de contrôle (courbe du haut) pour obtenir un nouveau mouvement (courbe du dessous).

Au final, l'association de la représentation par points de contrôle et des opérateurs nous fournit un modèle de mouvement. Ce modèle est de nature uniquement cinématique mais est potentiellement capable de s'adapter à tout type de situation grâce à la définition d'opérateurs pertinents. Considérons maintenant le cas particulier d'un modèle de locomotion.

3 Application à la locomotion humaine

Nous avons mené une série de captures de marches et de courses sur une population de 15 sujets. Ces sujets ont des masses et des tailles radicalement différentes. Ils marchent et courent à des vitesses imposées par un tapis roulant (0.98, 1.53, 2.08, 2.36, 2.64 m.s-1 en marche et 1.53, 2.08, 2.36, 2.92, 3.88, 4.44 m.s-1 en course) afin de garantir que les trajectoires des articulations puissent être comparées dans des conditions les plus proches possibles. Les mouvements ont été capturés via un système opto-électronique VICON370 composé de 7 caméras infrarouges cadencées à 60Hz. Les caméras étaient disposées en cercle autour du sujet. 28 marqueurs sphériques étaient placés sur des repères anatomiques classiquement utilisés en biomécanique [22] et permettant de retrouver indirectement les centres articulaires qui caractérisent notre squelette simplifié. Un cycle de locomotion est défini comme le temps s'écoulant entre deux contacts du talon sur le sol. Chaque trajectoire est donc étudiée uniquement entre deux contacts du talon gauche sur le sol. Les trajectoires sont modifiées pour assurer un cycle parfait de locomotion. Cette opération implique aussi un filtre de Butterworth du second ordre

dont la fréquence de coupure a été choisie à 6Hz (filtre classiquement utilisé en biomécanique).

Pour un mouvement aussi bien codifié que la locomotion humaine, les points de contrôle primaires calculés pour chaque trajectoire sont très proches pour tous les sujets, à une même vitesse. Il est donc possible de définir un modèle moyen de locomotion pour tous les sujets. Ceci est conforté par les travaux de H. Beaupied [2] qui ne montre aucune différence significative dans les paramètres cinématiques et cinétiques entre les locomotions de ces sujets.

Nous avons ensuite cherché à définir des opérateurs pouvant adapter le jeu de points de contrôle en fonction de la vitesse et de la longueur des pas. Ces opérateurs ont été complétés par une deuxième étude portant sur 5 des sujets précédents. Cette deuxième étude s'est effectuée dans un gymnase, avec des obstacles positionnés dans l'environnement de locomotion. Nous avons ainsi défini un opérateur permettant de tenir compte de la hauteur du prochain pas ainsi que d'un angle de virage. Le couplage de ces deux études nous donne un modèle paramétrable de locomotion capable de s'adapter à l'environnement et à une vitesse imposée de déplacement.

La figure 4 montre un exemple de données statistiques utilisées pour définir un opérateur. Une relation linéaire est trouvée entre la longueur des pas normalisée par la taille de la jambe et la position en X (sens d'avancement) de la cheville dans le repère de la hanche au moment du contact au sol. Cette relation permet donc de connaître, pour toute longueur des pas, la valeur à affecter à ce point de contrôle primaire.

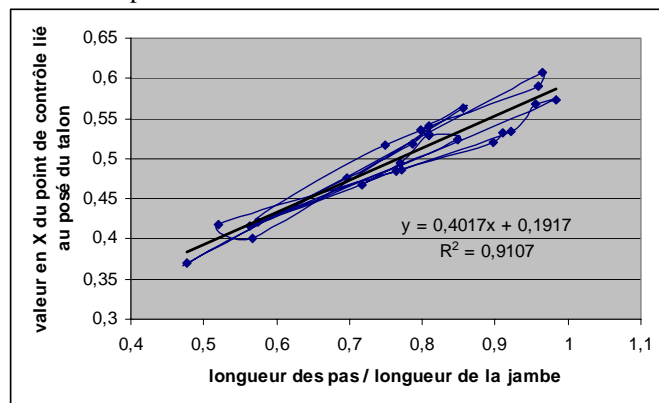


FIG. 4 : exemple de statistique permettant de définir un opérateur de modification lié à la longueur des pas (en abscisse) ; cet opérateur agit sur l'abscisse du point de contrôle lié au posé du talon sur le sol en marche.

Le même type d'opération est effectué pour tous les opérateurs que l'on cherche à définir et pour tous les points de contrôle primaires.

Plusieurs autres règles peuvent indiquer une relation entre deux points de contrôle. Ainsi, la figure 5 représente les oscillations verticales du bassin en fonction de la longueur des pas. Cette relation implique des modifications sur les points de contrôle donnant

respectivement les valeurs maximales et minimales de l'altitude du bassin.

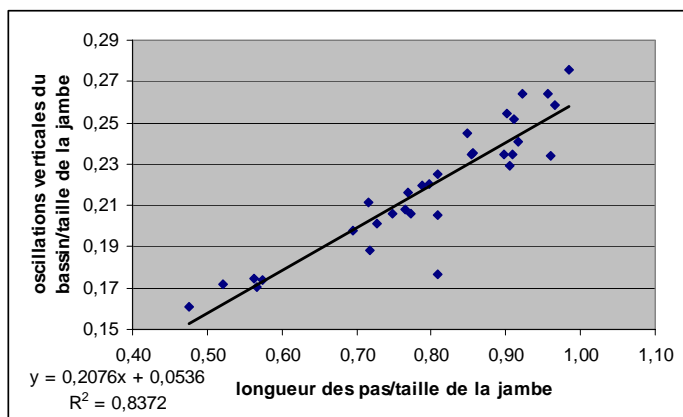


FIG. 5 : exemple de statistique donnant la relation entre deux points de contrôle pour gérer les oscillations du bassin en fonction de la longueur des pas.

Chaque règle donne lieu à un opérateur qui agit comme une fonction sur les points de contrôle. Une règle f_i comporte donc les informations suivantes :

- T_i , ensemble des trajectoires mises en jeu, pointant sur les ensembles de points de contrôle qui les caractérisent,
- P_i , ensemble des points de contrôles primaires touchés par l'opérateur,
- p_i , le paramètre à prendre en compte (longueur, fréquence, hauteur des pas...),
- formulation mathématique de l'opérateur à partir des règles statistiques observées $f(T_i, P_i, p_i)$.

Soit T l'ensemble comprenant toutes les trajectoires. Soit P_t l'ensemble des points de contrôle de la trajectoire t . Plusieurs opérateurs agissent en même temps sur T si bien que des incompatibilités peuvent survenir. Ainsi, si deux opérateurs f_1 et f_2 agissent sur le même point de contrôle $m_i \in P_t$, le résultat est une composition $(f_1 \circ f_2)(m_i)$ qui n'assure en rien que f_1 et f_2 soient correctement appliquées. Pour palier ce problème, nous interdisons, pour l'instant, que deux opérateurs s'exécutent sur le même point de contrôle.

Dans le modèle final, tous les opérateurs sont appliqués pour transformer l'ensemble des trajectoires moyennes suivant les conditions du milieu. Ce modèle a été mis en œuvre en C++ dans un environnement graphique permettant de visualiser le mouvement sur un personnage synthétique en VRML. Un module est chargé de lancer des rayons pour détecter la pose du prochain pas et ainsi paramétrer les opérateurs en fonction de l'environnement. La figure 6 montre la trajectoire verticale de la cheville dans le repère de la scène lors d'une marche sur sol plat (à gauche) et lors d'une montée (à droite).

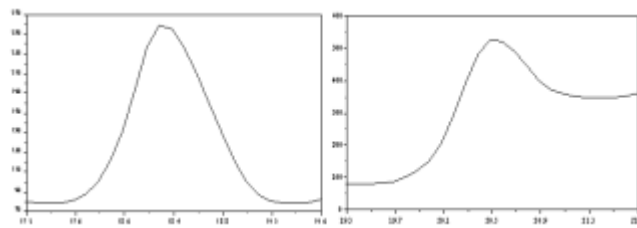


FIG. 6 : trajectoire verticale de la cheville dans le repère de la scène sur sol plat (à gauche) et sur sol comportant une montée (à droite) grâce à l'opérateur de montée/descente.

Ces résultats s'approchent tout à fait de mouvements capturés sur des sujets réels.

4 Discussion

Nous avons présenté une démarche de modélisation couplant les principes d'analyse et de synthèse du mouvement humain. La modélisation cinématique du mouvement couramment rencontrée en animation est associée à une analyse biomécanique dédiée qui permet de définir une trajectoire moyenne et un ensemble d'opérateurs. Ces trajectoires et ces opérateurs sont directement issus de la mesure. On peut donc parler d'identification de modèle cinématique de mouvement à partir d'un corpus de trajectoires. Cette technique a été appliquée à la locomotion humaine ainsi qu'à des mouvements de préhension et de lancer [8]. L'intérêt est que ce corpus peut soit provenir d'un système de capture de mouvements, soit être créé de toute pièce par d'autres modèles ou manuellement par des animateurs. La multiplication des opérateurs permet de traiter un grand nombre d'adaptations à l'environnement, à condition de rester dans le voisinage des conditions expérimentales. L'inconvénient majeur est que l'on est limité, par nature, aux opérateurs ainsi créés, à l'inverse de systèmes dynamiques qui peuvent engendrer des comportements mécaniques qu'il n'est pas nécessaire de décrire du point de vue des trajectoires. Nous travaillons actuellement sur un contrôle des opérateurs par la dynamique dans lequel un système dynamique pourrait prendre la main si des règles mécaniques étaient violées.

Un autre inconvénient à ce système est que les opérateurs doivent travailler de manière disjointe sur l'ensemble des points de contrôle. A l'avenir, il serait intéressant d'analyser comment faire cohabiter plusieurs opérateurs agissant sur le même point de contrôle. Pour cela, une approche similaire, basée sur la mesure et l'analyse des trajectoires, pourrait être envisagée. Cette analyse permettrait de définir des opérateurs de composition d'opérateurs « biomécaniquement » validés.

Pour conclure, cette approche, bien que cinématique, permet d'identifier des « règles » d'adaptation du mouvement humain via des opérateurs. De plus, une fois le modèle créé, il est possible de le tester dans de nouvelles conditions et ainsi vérifier la validité de ces

règles. C'est une approche encore peu rencontrée en biomécanique où la majorité des travaux définissent des relations entre paramètres, de manière isolée. Il est alors difficile de vérifier ces relations qui évoluent dans un système complexe, non-isolé.

De plus, par expérience, nous avons maintes fois observé des trajectoires calculées qui, statistiquement, étaient tout à fait semblables à des trajectoires réelles. Cependant, dans certains cas, la faible dissemblance sur une trajectoire suffit à engendrer un mouvement global tout à fait irréaliste. L'avantage de ce type d'approche est qu'il met à disposition un environnement de tests dans lequel il est possible de tester un ou plusieurs opérateurs et, ainsi, vérifier qu'ils produisent un comportement réaliste. Afin de tester au mieux le réalisme des modèles de mouvement ainsi générés nous avons mené une expérimentation en réalité virtuelle [4]. Les résultats montrent que le comportement d'un gardien de but face à un joueur virtuel piloté par ces modèles est identique à celui qu'il avait dans le réel. Pour améliorer ce système, il reste cependant à ajouter un aspect mécanique et dynamique à ce système afin de tester des hypothèses d'un tout autre ordre : minimum d'énergie, confort, équilibre...

Références

- [1] R.M. Alexander, *Principles of Animal Locomotion*, Princeton University Press, 1982
- [2] H. Beupied, Etude mécanique et énergétique de la marche, de la course et de la transition marche-course: influence de la spécificité athlétique. *Thèse de l'Université de Rennes 2*, mars 2003.
- [3] L. Bianchi, D. Angelini, G.P. Orani, F. Lacquaniti, Kinematic Coordination in Human Gait: Relation to Mechanical Energy Cost, *The American Physiological Society*, p 2155-2170, 1998.
- [4] B. Bideau, R. Kulpa, S. Ménardais, F. Multon, P. Delamarche, B. Arnaldi, Real handball keeper vs. virtual handball player: a case study, *Presence*, août 2003.
- [5] R. Boulic, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann, A global human walking model with real-time kinematic personification, *Visual Computer* 6(6), p 344-358, 1990.
- [6] R. Boulic, R. Mass, D. Thalmann, Complex character positioning based on a compatible flow model of multiple support, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, p 245-261.
- [7] M. Cohen, Interactive spacetime control for animation, *proceedings of ACM SIGGRAPH*, p 292-302, 1992.
- [8] L. Fradet, R. Kulpa, B. Bideau, F. Multon, P. Delamarche (2003), kinematic simulation of handball throwing, *Proceedings of European Simulation Multiconference*, 2003.
- [9] M. Gleicher, Retargetting Motion to New Characters, *Proceedings ACM SIGGRAPH*, p 33-42, Juillet 1998.
- [10] M. Gleicher, H.J. Shin, L. Kovar, A. Jepsen., Snap Together Motion: Assembling Run-Time Animation. *Symposium on Interactive 3D Graphics*. April 2003.
- [11] T.L. Hill, Theoretical formalism for the sliding filament model of contraction of striated muscle. Part I. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 28:267-340, 1974
- [12] J.K. Hodgins, W.L. Wooten, D.C. Brogan and J.F. O'Brien. animating human athletics. *Proceedings ACM SIGGRAPH*, Addison-Wesley, 71-78, 1995.
- [13] J. Lee, S.Y. Shin, A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing for Human-like Figures. *Proceedings ACM SIGGRAPH*, 39-48, Août 1999.
- [14] E.J. Marey, *Animal mechanism: A treatise on terrestrial and aerial locomotion*. New York:Appleton. Republished as Vol. XI of the International Scientific Series. 1873.
- [15] S. Ménardais, Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoïdes synthétiques, *Thèse de l'Université de Rennes 1*, janvier 2003.
- [16] F. Multon, J.L. Nougaret, B. Arnaldi, G. Hégron et L. Millet (1999) : A Software System to Carry-out Virtual Experiments on Human Motion. *Proceedings of Computer Animation*, p16-23, Genève, mai 1999.
- [17] J. Nilsson, A. Thorstensson, J. Halbertsma, Changes in leg movements and muscle activity with speed of locomotion and mode of progression in humans. *Acta Physiol. Scand.*, Vol 123, p. 457-475, 1985
- [18] T. Pozzo, A. Berthoz, L. Lefort, Head stabilization during various locomotor tasks in humans. I. Normal subjects. *Exp Brain Res* 82(1), p. 97-106, 1990
- [19] M. van de Panne, R. Kim, E. Fiume, Virtual wind-up toys for animation. *Proceedings of Graphics Interface*, p 208-215, 1994.
- [20] P. Viviani, M. Cenzato, Segmentation and coupling in complex movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 828-845, 1985.
- [21] P. Viviani, T. Flash, Minimum-jerk, two-thirds power law and isochrony: converging approaches to the study of movement planning, *Journal of Experimental Psychology: Perception and Performance*, 21: 32-53, 1995.
- [22] D.A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement. Second edition*. A Wiley-Interscience Publication, John and Sons, Inc., USA, 1990.
- [23] D. Zeltzer, Motor control techniques for figure animation, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2(9), p 53-59, 1982.

Avancées récentes en asservissement visuel

François Chaumette*
IRISA / INRIA Rennes
Campus de Beaulieu, 35 042 Rennes-cedex
Francois.Chaumette@irisa.fr

Résumé

La communauté française est très active dans le domaine de l'asservissement visuel. Cet article se propose d'en présenter les avancées récentes, aussi bien sur les aspects théoriques (modélisation d'informations visuelles et élaboration de lois de commande assurant diverses propriétés de robustesse, d'invariance, de stabilité, de découplage, etc.) que sur les nouvelles applications traitées (en robotique médicale, sur des engins volants, etc.). Les travaux en cours et problèmes encore ouverts sont également brièvement présentés.

Mots Clef

Asservissement visuel, robotique.

1 Introduction

Les techniques d'asservissement visuel consistent à utiliser les informations fournies par une ou plusieurs caméras afin de contrôler les mouvements d'un système robotique. Quelle que soit la configuration du capteur, pouvant aller d'une caméra embarquée sur l'effecteur du robot à plusieurs caméras déportées, il s'agit de sélectionner au mieux un ensemble de mesures, permettant de contrôler les degrés de liberté souhaités, et d'élaborer une loi de commande afin que ces mesures atteignent une valeur désirée ou suivent une trajectoire spécifiée. Le principe de la commande se ramène ensuite à réguler (c'est-à-dire amener et maintenir à zéro) le vecteur d'erreur entre mesure et consigne.

Avec un capteur de vision, fournissant à la base des informations 2D, la nature des mesures potentielles est extrêmement riche, puisque l'on peut considérer en asservissement visuel aussi bien des mesures 2D, telles que les coordonnées de points caractéristiques dans l'image par exemple, que des mesures 3D, fournies par un module de localisation exploitant les informations 2D extraites. De cette richesse provient la difficulté majeure de l'asservissement visuel, à savoir, parmi l'ensemble des informations potentielles, comment sélectionner, construire et combiner celles qui fourniront un comportement satisfaisant au système. Les qualités souhaitées sont nombreuses : stabilité locale voire globale, robustesse aux erreurs de mesure

*Cet article a été réalisé suite à l'envoi de contributions en provenance du Cemif d'Evry, de l'Inria Sophia Antipolis, du Laas de Toulouse, du Lasmea de Clermont-Ferrand, et du LSIIT de Strasbourg.

et aux erreurs de modélisation, absence de singularités et de minima locaux, trajectoires satisfaisantes du robot, mais aussi des informations visuelles dans l'image, découplage maximal entre les informations visuelles et les degrés de liberté commandés, etc. A ces aspects de modélisation des informations visuelles, dont les résultats récents sont décrits en Section 2, sont bien évidemment associés des travaux en commande, décrits en Section 3, afin d'atteindre les propriétés visées ou d'appréhender des systèmes robotiques complexes. Enfin, le domaine de l'asservissement visuel est porteur de nombreuses applications potentielles en et en dehors de la robotique. Celles-ci sont présentées en Section 4.

2 Modélisation

Le lecteur intéressé est tout d'abord invité à se reporter à [5] pour découvrir le cas échéant les notions de base en asservissement visuel, ainsi qu'un état de l'art des travaux dans ce domaine portant jusqu'en 2000 environ.

Depuis, une contribution majeure a consisté à proposer une classe de schémas d'asservissement visuel hybride (appelé encore 2D 1/2), qui consiste à sélectionner des informations visuelles issues d'une phase de localisation projective [13]. Les avantages apportés sont nombreux et significatifs : d'une part, il n'est plus nécessaire de connaître le modèle 3D des objets considérés, la localisation s'effectuant à partir de la mise en correspondance entre l'image courante et l'image désirée. D'autre part, le comportement du système est assez satisfaisant grâce au découplage apporté entre les degrés de liberté en translation et ceux en rotation. Ce découplage a permis en outre d'analyser la stabilité du système en présence d'erreurs de calibration et d'établir des conditions analytiques sur les erreurs des paramètres intrinsèques et extrinsèques du capteur de vision pour assurer cette stabilité. Cette approche, valable à l'origine pour des scènes constituées de points et de droites, a récemment été étendue au cas d'objets plans de forme inconnue et complexe (voir Figure 1.a) [16]. De même, ce type de schéma hybride a été appliqué à des objets texturés (voir Figure 1.b) en utilisant les paramètres affines du mouvement 2D pour estimer l'orientation du plan de l'objet [1]. Des travaux sont actuellement en cours pour tenter d'obtenir des lois de commande ayant les mêmes bonnes propriétés, mais en utilisant des informations visuelles extraites directement de l'image courante. Un tel type d'as-

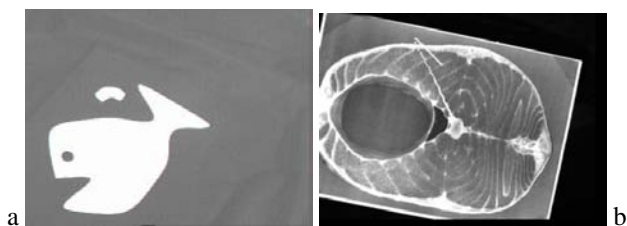


FIG. 1 – Exemples d’écologie de forme complexe qu’il est à présent possible d’appréhender par asservissement visuel

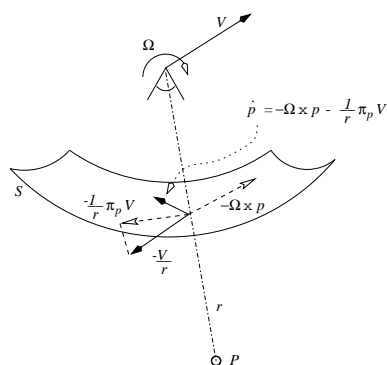


FIG. 2 – Modèle de projection sphérique

servissement visuel 2D permet d’éviter les phases de mise en correspondance et de localisation projective. Pour cela, les travaux décrits dans [23] utilisent les moments d’un objet dans l’image. Ceux-ci sont facilement mesurables à partir d’une segmentation spatiale et permettent de représenter de manière générique des objets de forme complexe et inconnue (voir Figure 1.a). Ils peuvent également se calculer à partir d’un ensemble de points d’intérêt. En utilisant les propriétés d’invariance de certaines combinaisons de moments, il est possible de sélectionner des combinaisons telles que, lorsque l’objet est parallèle au plan image, la matrice d’interaction associée est triangulaire (cette matrice jouant le rôle fondamental équivalent au jacobien d’un robot). Le découplage, l’agrandissement du domaine de convergence ainsi qu’un bon comportement du système sont alors atteints. Ces résultats ont été généralisés très récemment au cas où l’objet n’est pas parallèle au plan image.

Dans le même ordre d’idée, des informations visuelles dotées de la propriété de passivité structurelle ont été déterminées dans [11]. Cette notion de passivité s’apparente au découplage entre degrés de liberté de rotation et de translation. Elle a été obtenue pour des points en considérant un modèle de projection sphérique (voir Figure 2), plutôt que le classique modèle de projection perspective, et pour des droites avec leurs coordonnées de Plücker binormées. Comme nous le verrons en Section 3, ces informations visuelles ont permis l’élaboration de lois de commande pour un drone sous-actionné.

Une autre contribution importante en asservissement visuel 2D a porté sur la mise en œuvre d’une méthode in-

variante aux paramètres intrinsèques de la caméra [17]. Il devient alors possible d’utiliser une caméra avec un zoom variable sans connaître la valeur exacte du zoom, ou d’utiliser une caméra pour apprendre l’image à atteindre et une caméra différente pour réaliser l’asservissement tout en étant assuré que le robot atteigne sa vraie position désirée. La méthode, valide à l’origine pour un nuage de points non coplanaires, a été généralisée au cas de droites non coplanaires [14], et, dans certains cas, à des amers planaires [4]. La méthode repose sur la détermination et l’application d’une transformation projective rendant les informations visuelles invariantes aux paramètres de la caméra. On peut par ailleurs signaler quelques études pour l’instant plus ponctuelles : dans [7], un poids est attribué à chaque information visuelle afin d’éliminer les effets d’erreurs potentielles d’appariement ou de traitement d’images. Ces poids sont calculés à partir de M-estimateurs statistiques robustes aux données erronées et aberrantes. Cette technique est valide dans les schémas d’asservissement visuel utilisant des informations visuelles redondantes. Dans [15], une analyse de la stabilité de l’asservissement visuel 2D en présence d’erreurs dans la profondeur des points considérés montre une faible robustesse par rapport à ces erreurs quand une estimation de la profondeur est injectée dans la loi de commande. Enfin, dans [22], la méthode du Simplexe a été utilisée directement pour minimiser l’erreur dans l’image. Cette méthode générique ne fait aucune hypothèse concernant la géométrie du robot ou les paramètres de la caméra. Elle permet de plus la prise en compte de contraintes dans l’espace articulaire et dans l’espace opérationnel.

Finalement, quelques travaux ont également été réalisés récemment en asservissement visuel 3D (qui consiste à utiliser des informations visuelles issues d’une reconstruction ou d’une localisation 3D de l’objet d’intérêt). Dans [24], un schéma construit à partir de la pose 3D a été proposé afin d’assurer autant que possible la visibilité de l’objet d’intérêt au cours de l’asservissement. Dans [19], un système stéréoscopique a été considéré et une étude des informations visuelles les plus pertinentes a été réalisée (coordonnées redondantes des points dans les deux images ou coordonnées du point 3D reconstruit). Les applications envisagées portent sur le contournement et la navigation autour d’objets complexes.

3 Commande

Sur les aspects proches de la commande, des développements importants ont été réalisés ces dernières années sur le couplage entre planification de trajectoires et asservissement visuel. Ces travaux sont intéressants puisqu’ils permettent d’appréhender de grands déplacements à réaliser entre la position initiale et la position désirée. Ils permettent aussi d’accroître sensiblement la robustesse du système vis-à-vis des erreurs de modélisation et de calibration par la poursuite de ces trajectoires par asservissement visuel.

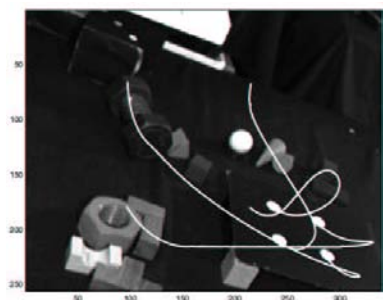


FIG. 3 – Planification de trajectoires dans l’image assurant la convergence et la visibilité de l’objet d’intérêt



FIG. 4 – Asservissement visuel à partir d’une base de données image pour des déplacements très importants

La première méthode présentée dans [20] est basée sur l’approche des fonctions de potentiels. Elle permet de considérer aussi bien des contraintes sur la trajectoire 3D du robot (la plus proche possible d’une ligne droite) que des contraintes supplémentaires telles l’évitement des butées articulaires, l’évitement d’occultations de parties de l’objet sur lui-même, ainsi que l’assurance que l’objet reste dans le champ de vision du capteur (voir Figure 3). Même si l’absence de minima locaux n’a pas été démontrée, cette méthode semble donner des résultats satisfaisants en pratique. Une deuxième méthode présentée dans [21] est basée sur la commande optimale. Elle permet de calculer la forme analytiques des trajectoires de points dans l’image correspondant à un déplacement optimal de la caméra (translation en ligne droite, rotation selon une géodésique). Ces trajectoires sont indépendantes des paramètres de la caméra, et comme la méthode précédente, s’applique à des objets dont le modèle 3D n’est pas connu. Malheureusement, il semble impossible de déterminer des formes analytiques dès que des contraintes (telle la conservation de la visibilité de l’objet) sont ajoutées au système. Ces méthodes sont actuellement reconsidérées afin de considérer des asservissements visuels à partir d’une base d’images indexées (voir Figure 4).

Des travaux complémentaires sont présentés dans [25]. Tout d’abord, un schéma de planification assurant à tout coup la visibilité de l’objet a été proposé, et ce même en présence d’erreurs de calibration de la caméra. Cette méthode de planification ne permet toutefois pas encore de prendre en compte d’autres contraintes telles l’évitement

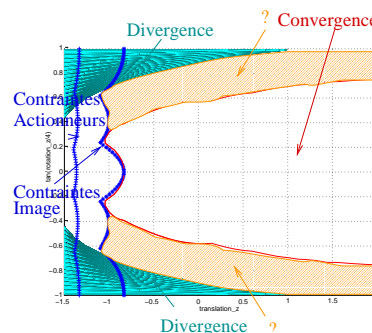


FIG. 5 – Détermination des domaines de convergence et de divergence d’un asservissement visuel à l’aide des techniques LMI

des butées du robot. Par ailleurs, une technique de réglage automatique des gains de l’asservissement et de la vitesse de parcours de la trajectoire permet d’assurer la bornitude de l’erreur de poursuite, connaissant des bornes sur les effets des erreurs de modélisation.

Sur les aspects commande, on peut aussi noter les travaux décrits dans [3] qui portent sur la synthèse et l’analyse de lois de commande par asservissement visuel à base d’inégalités linéaires matricielles (LMIs). Sur les aspects de synthèse il s’agit de garantir a priori certaines propriétés telles que la convergence, la non-saturation des actionneurs, la visibilité de l’objet, la satisfaction de contraintes 3D pendant le déplacement, etc. Les résultats obtenus pour l’instant semblent assez conservatifs. Sur les aspects d’analyse, ces techniques permettent de caractériser la région dans laquelle une commande donnée permet la convergence (voir Figure 5), ou d’évaluer les gammes de valeurs de certaines quantités, ou encore d’étudier la sensibilité à divers types d’incertitudes.

La modélisation dynamique complète d’une boucle d’asservissement visuel a par ailleurs été réalisée dans [9]. La boucle comprend un robot manipulateur, une caméra et un système d’acquisition et de traitement d’images. Le modèle multivariable obtenu correspond à une linéarisation autour d’une configuration donnée du robot. Il tient compte à la fois des dynamiques du manipulateur et du système d’acquisition d’images. Pour contrôler cette boucle, les techniques de commande prédictive généralisée (GPC) ont été employées. Elles permettent de garantir l’optimalité de la réponse pour chaque configuration du robot grâce à une technique de séquençement de gain. Deux tâches robotiques différentes ont permis de valider ce modèle : d’une part, le suivi rapide de cible avec une caméra rapide (240 images/sec.) et, d’autre part, un suivi de profilé [9]. Cette technique a été également appliquée récemment pour la compensation de mouvement périodique et a permis de réaliser un asservissement visuel à 500 Hz sur un robot médical [10].

Enfin, des travaux ont été réalisés pour prendre en compte la dynamique d’un robot pour un bras avec transmission

flexible, à l'aide de méthodes issues de la commande robuste H_∞ et de la commande linéaire à paramètres variants (LPV) [8].

Finalement, l'application des techniques d'asservissement visuel au difficile contrôle de drones aériens a connu ses premiers développements ces toutes dernières années. Pour un dirigeable et pour des tâches de stabilisation au point fixe, d'atterrissage, et de suivi de structures linéiques (routes, lignes électriques,...), une loi de commande unique synthétisée à partir du modèle linéarisé a tout d'abord été testée pour en étudier les limites de validité [2]. La synthèse d'un contrôleur LQR est actuellement en cours d'intégration. Pour un hélicoptère, et comme cela a déjà été évoqué, des techniques de "backstepping" ont pu être mises en œuvre sur des informations visuelles spécifiques disposant de la propriété de passivité structurelle [11].

4 Applications

Nous n'abordons pas ici les domaines d'applications anciens utilisant des robots manipulateurs ou des robots mobiles. En sus du contrôle d'engins aériens, le nouveau domaine d'applications le plus spectaculaire des techniques d'asservissement visuel est sans aucun doute celui de la robotique médicale qui a connu ces dernières années des développements et succès importants. On présente également dans cette section deux domaines d'applications en dehors de celui classique de la robotique, à savoir en réalité virtuelle et en réalité augmentée.

4.1 Robotique médicale

La première application significative réalisée porte sur l'aide au geste chirurgical par asservissement visuel en chirurgie laparoscopique robotisée [12]. Dans ce cadre, les instruments de chirurgie et l'endoscope sont tenus par des bras robotiques esclaves. Les difficultés principales résidaient dans le fait que l'environnement est peu structuré et que la détection d'indices visuels pertinents est très difficile à réaliser de manière robuste. Par ailleurs, le passage d'outils par un point d'incision contraint les mouvements des robots à 4 ddl, ce qui a nécessité la prise en compte de cette contrainte dans la modélisation des informations visuelles. Le système qui a été développé est constitué d'un pointage laser équipé d'amers et attaché à l'instrument (voir Figure 6). Il permet de conserver l'instrument dans le champ visuel du chirurgien par asservissement visuel sur l'image endoscopique, ceci afin d'éviter tout danger de télé-manipulation. Il permet également de positionner automatiquement l'instrument à une distance prédéfinie par le chirurgien d'un point caractéristique dans la cavité abdominale. Dans le même domaine, des travaux sont actuellement en cours pour l'aide à la suture, geste le plus difficile à réaliser que ce soit manuellement ou avec un système robotique. L'approche explorée est également fondée sur l'asservissement visuel des bras porte-instruments à partir de l'image endoscopique (voir Figure 7).

Par ailleurs, une autre application consiste à compenser les



FIG. 6 – Contrôle des mouvements d'instruments en chirurgie laparoscopique par asservissement visuel sur l'image endoscopique

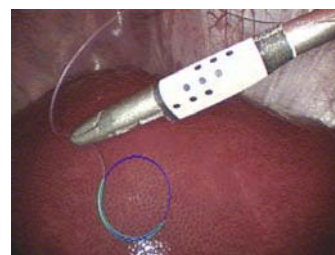


FIG. 7 – Aide à la suture en chirurgie laparoscopique

mouvements des organes induits par la respiration et par les battements cardiaques. Pour cela et comme cela a déjà été évoqué, un asservissement visuel GPC a été développé afin que le système robotique se déplace avec le mouvement des organes, de manière à rendre ces mouvements transparents pour le chirurgien qui le télé-manipule [10].

Enfin, plus récemment, des travaux ont été entrepris pour la réalisation de procédures percutanées en radiologie interventionnelle par imagerie scanner. Une application typique consiste à enfoncer une aiguille dans des minitumeurs du foie (quelques mm) qui ne sont visibles qu'à l'imagerie scanner, afin de les détruire ensuite par radiofréquence. Cette procédure est réalisée aujourd'hui manuellement avec une précision de l'ordre du cm tout en exposant le médecin au rayonnement X. L'objectif de ce travail, effectué dans le cadre du projet Robea Insertion Robotisée d'Aiguille Sous Imagerie Scanner, est de développer un système télé-opéré permettant d'enfoncer une aiguille à distance avec retour d'effort et asservissement visuel sur l'image scanner (voir Figure 8).



FIG. 8 – Insertion d'aiguille sous imagerie scanner

4.2 Réalité virtuelle

Les techniques d'asservissement visuel s'appliquent assez directement au domaine de la réalité virtuelle, par exemple pour le contrôle du regard d'un humanoïde virtuel (voir Figure 9.a). Il est également possible de générer par asservissement visuel des mouvements spécialisés de type cinématographie pour la caméra virtuelle de restitution visuelle, ou encore de contrôler les mouvements de cette caméra en évitant les obstacles et les occultations (par exemple pour l'application classique de visite de musée virtuel- voir Figure 9.b) [18].

4.3 Réalité augmentée

L'application de l'asservissement visuel au domaine de la réalité augmentée et du suivi 3D semble également assez prometteuse. Il s'agit alors de contrôler les mouvements d'une caméra virtuelle afin de minimiser l'erreur entre l'image observée par la caméra réelle et la projection du modèle CAO des objets sur la vue de la caméra virtuelle. La position de la caméra virtuelle minimisant cette erreur, obtenue à la convergence de l'asservissement visuel "virtuel", fournit la pose de la caméra réelle. L'application au suivi 3D et à la réalité augmentée est alors immédiate (voir Figure 10). L'originalité des travaux décrits dans [6] porte notamment sur la prise en compte dans la loi de commande d'estimateurs robustes pour appréhender des objets complexes et des occultations potentielles, ce qui élargit au passage le champ d'applications des techniques classiques d'asservissement visuel en robotique.



FIG. 9 – Applications de l'asservissement visuel en réalité virtuelle : (a) contrôle du regard d'un humanoïde, (b) visite d'un musée virtuel

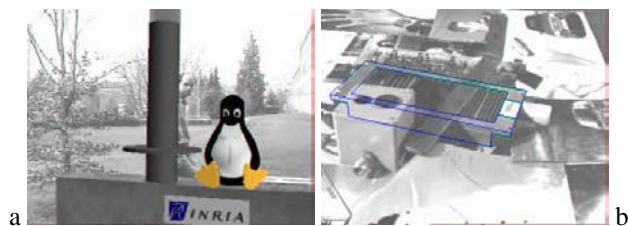


FIG. 10 – Application de l'asservissement visuel en réalité augmentée (a) et en suivi 3D (b)

5 Conclusion et perspectives

Comme on l'a vu, les travaux en asservissement visuel sont fructueux au sein de la communauté française. Ils devraient l'être encore à l'avenir tant les travaux en cours et les perspectives sont nombreux.

Sur les aspects de modélisation, outre la recherche du Graal d'informations visuelles idéales, on voit apparaître l'utilisation en asservissement visuel de nouveaux systèmes d'imagerie : projection sphérique, imagerie scanner, comme cela a déjà été évoqué, mais aussi vision omni-directionnelle et imagerie échographique (dans le cadre respectivement des projets Robea Omnibot et Gabie). Ces nouveaux types d'imagerie nécessitent de modéliser les informations visuelles associées, le modèle de projection perspective classique ne s'appliquant plus, et d'en étudier le comportement. De même, l'utilisation de la lumière structurée pour simplifier la perception d'environnements complexes (en médical ou en agro-alimentaire) va connaître un regain d'attention et de nouveaux travaux en modélisation et analyse.

Des progrès sont également évidemment attendus en synthèse et analyse des lois de commande par asservissement visuel.

Par ailleurs, les techniques d'asservissement visuel sont à la base des techniques de commande "bas-niveau" qu'il faut intégrer dans des systèmes plus complets pour en assurer une véritable diffusion. Ce travail important va de la conception d'IHM à l'introduction de systèmes de reconnaissance d'objets, en passant par la robustification des algorithmes de traitements d'images. Pour traiter des applications de haut niveau, il passe également par l'étude d'enchaînement de tâches (comme cela est considéré dans le projet Robea Enchaînement Dynamique de Tâches Référencées Multi-Capteurs) et par la prise en compte de plusieurs capteurs (couplage vision/force, vision/télé-mètre, systèmes multi-caméras, etc.)

Comme on l'a déjà dit, l'utilisation de l'asservissement visuel en robotique médicale est en plein essor, de même que pour le contrôle d'engins aériens (par exemple dans le cadre du projet Robea Robvolint). Il en sera de même dans le domaine de la robotique mobile, notamment pour l'aide à la navigation et au pilotage automatique de véhicules dans des environnements dont la taille et la complexité n'ont rien à voir avec ceux traités habituellement (on peut citer à ce propos le projet Robea Bodega notamment).

Enfin, pour terminer sur un point technique, les problèmes liés aux retards, dus à une extraction coûteuse des informations visuelles ou à la transmission des images pour des systèmes télé-déportés, peuvent être une source non négligeable de déstabilisation lorsque la dynamique est importante (pour les engins volants par exemple). Ils devront donc être étudiés à l'avenir.

Remerciements à tous les "contributeurs" ayant permis la réalisation de ce survol.

Références

- [1] A. Alhaj, C. Collewet, F. Chaumette : Visual servoing based on dynamic vision, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, Taïpeh, Taïwan, Septembre 2003.
- [2] J. Azinheira, P. Rives, J. Carvalho, G. Silveira, E. Pava, S. Bueno : Visual servo control for the hovering of an outdoor robotic airship. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'02*, pages 2287–2793, Washington D.C., USA, Mai 2002.
- [3] D. Bellot, P. Danès : Handling visual servoing schemes through rational systems and LMIs. *40th IEEE Conf. on Decision and Control, CDC'01*, pages 3601–3606, Orlando, Floride, Décembre 2001.
- [4] S. Benhimane, E. Malis : Vision-based control with respect to planar and non-planar objects using a zooming camera *IEEE International Conference on Advanced Robotics, ICRA'03*, Coimbra, Portugal, Juillet 2003.
- [5] F. Chaumette : Asservissement visuel. *Commande des robots manipulateurs*, W. Khalil éd., Chap. 3, p. 103-150, Traité IC2, Hermès, 2002.
- [6] A. Comport, E. Marchand, F. Chaumette : A real-time tracker for markerless augmented reality, *ACM/IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'03*, Tokyo, Japon, Octobre 2003.
- [7] A. Comport, M. Pressigout, E. Marchand, F. Chaumette : A visual servoing control law that is robust to image outliers. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'03*, Las Vegas, Nevada, Octobre 2003.
- [8] L. Cuvillon, E. Laroche, J. Gangloff, M. de Mathelin : A gain scheduled control for visual servoing for a flexible arm. *IFAC Symposium on Robust Control Design, ROCOND'03*, Milan, Italie, Juin 2003.
- [9] J. Gangloff, M. de Mathelin : Visual servoing of a 6 DOF manipulator for unknown 3D profile following. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):511-520, Août 2002.
- [10] R. Ginhoux, J. Gangloff, M. de Mathelin, L. Soler, J. Leroy, J. Marescaux : Model predictive control for tracking of repetitive organ motions during teleoperated laparoscopic interventions. *European Conf. on Control, ECC'03*, Cambridge, Royaume-Uni, Septembre 2003.
- [11] T. Hamel, R. Mahony : Visual servoing of an underactuated dynamic rigid-body system: An image based approach. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(2):187-198, Avril 2002.
- [12] A. Kruppa, J. Gangloff, C. Doignon, M. de Mathelin, G. Morel, L. Soler, J. Leroy, J. Marescaux : Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic using visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Special Issue on Medical Robotics, Octobre 2003.
- [13] E. Malis, F. Chaumette : Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(2):176–186, Avril 2002.
- [14] E. Malis, J.-J. Borelly, P. Rives : Intrinsic-free visual servoing with respect to straight lines. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'02*, Lausanne, Suisse, Octobre 2002.
- [15] E. Malis, P. Rives : Robustness of image-based visual servoing with respect to depth distribution errors. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, Taïpeh, Taïwan, Mai 2003.
- [16] E. Malis, G. Chesi, R. Cipolla : 2 1/2 d visual servoing with respect to planar contours having complex and unknown shapes. *Int. Journal of Robotics Research*, Special Issue on Visual Servoing, 2003.
- [17] E. Malis : Visual servoing invariant to changes in camera intrinsic parameters. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003.
- [18] E. Marchand, N. Courty : Controlling a camera in a virtual environment, *The Visual Computer Journal*, 18(1):1-19, Février 2002.
- [19] P. Martinet, E. Cervera : Image-based stereo visual servoing: 2D vs 3D features. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'02*, Washington D.C., USA, Mai 2002.
- [20] Y. Mezouar, F. Chaumette : Path planning for robust image-based control, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):534-549, Août 2002.
- [21] Y. Mezouar, F. Chaumette : Optimal camera trajectory with image-based control, *Int. Journal of Robotics Research*, Special Issue on Visual Servoing, 2003.
- [22] K. Miura, J. Gangloff, M. de Mathelin : Robust and uncalibrated visual servoing without jacobian using a simplex method. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS02*, Lausanne, Suisse, Octobre 2002.
- [23] O. Tahri, F. Chaumette : Application of moment invariants to visual servoing, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, Taïpeh, Taïwan, Septembre 2003.
- [24] B. Thuilot, P. Martinet, L. Cordesses, J. Gallice : Position-based visual servoing: keeping the object in the field of vision. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA02*, Washington DC, USA, May 2002.
- [25] P. Zanne, G. Morel, F. Plestan : A robust 3D vision-based control and planning. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, Taïpeh, Taïwan, Mai 2003.

Restitution et modélisation des paysages pour la production cartographique à partir d'imagerie aéroportée.

H Le Men.¹M. Pierrot Deseilligny¹¹Institut Géographique NationalHervé.Le-Men@ign.fr
Marc.Pierrot-Deseilligny@ign.fr

Résumé

Cet article présente l'état de l'art et les perspectives des méthodes et techniques utilisées pour la modélisation cartographique des paysages à partir de données aéroportées et spatiales. Une caractéristique générale de la restitution automatique en contexte de production cartographique est le rôle fondamental joué, d'une part, par les connaissances a priori sur les paysages et, d'autre part, par les spécifications sur le degré de généralisation souhaité dans le produit final. On détaille plus particulièrement les problèmes de modélisation géométrique des environnements urbains (restitution tridimensionnelle par vision stéréoscopique ou système laser actif, notamment création automatique de modèle polyédrique des bâtiments) et les problèmes d'interprétation du sol pour les paysages agraires (télé-détection par imagerie satellite ou caméras numériques aériennes).

Mots Clef

Cartographie, modélisation, paysages, modèles 3D urbains, occupation du sol.

1 Introduction

Une caractéristique générale de la représentation des paysages en cartographie est que le plus précis ou le plus détaillé, n'est généralement pas le meilleur. Pour représenter l'information disponible sur un territoire de manière lisible à une échelle donnée il est nécessaire de simplifier, synthétiser, symboliser, caricaturer etc... l'information disponible. Ce travail de synthèse graphique d'information, à une échelle donnée, est appelé généralisation cartographique.

En cartographie numérique, lorsque l'on veut automatiser même partiellement ce travail de synthèse et de généralisation il faut d'abord modéliser les paysages et les objets qu'ils contiennent. Cette modélisation est nécessaire pour faciliter la reconnaissance : de manière classique en reconnaissance de formes, pour limiter les interprétations possibles, on ne cherche dans l'image que des instances des modèles qui nous intéressent. Ce qui est plus spécifique au contexte cartographique est que cette modélisation fait partie des spécifications du problème :

la carte (ou aujourd'hui la base de données) est un langage graphique extrêmement codifié et on ne saurait que faire des objets reconnus en dehors du modèle.

Un élément facilitant du cadre cartographique (par rapport par exemple à la vision en robotique) est que l'on travaille dans un domaine contextuel précis, souvent thème par thème. Par exemple : le bâti, le réseau routier, l'interprétation du sol, le relief etc... C'est à l'intérieur de chaque thématique que l'on va définir un modèle spécifique au type d'objets; certes, il est un peu restrictif de négliger les interactions entre thèmes et il y a eu aussi beaucoup de travaux sur l'interprétation de scènes; cependant, indépendamment de leur intérêt fondamental, ces approches globales sont encore aujourd'hui à l'état de recherches et les résultats sont rarement utilisables en production.

Les développements plus récents conduisent à utiliser de plus en plus d'informations a priori dans le traitement d'interprétation des images aériennes ou spatiales. L'image devient alors plutôt une contrainte que doit satisfaire le modèle: elle est intégratrice de nombreux phénomènes, et le modèle restitué doit être compatible avec l'existence de l'image. Ces informations a priori peuvent être de différentes formes, soit en extension (bases de données) soit sous forme de modèles statistiques, déterministes ou fonctionnels

Un élément de contexte, assez spécifique au contexte cartographique est la taille des images. Typiquement, les images argentiques numérisées ont une taille de 16000x16000 pixels (cliché de 24cm numérisé à 15 microns) ; les images numériques ont aujourd'hui une taille plus réduite (couramment 4000x4000). Un autre élément, général au contexte de production de données, est que l'on a très peu de contraintes de temps mais de très fortes contraintes de qualités.

Nous allons maintenant détailler, sur le thème du bâti et celui de l'occupation du sol, quelques approches utilisées pour la reconnaissance d'objets en cartographie.

2 Modélisation tridimensionnelle d'environnements urbains

Pour les applications de modélisation tridimensionnelle et de vision stéréoscopique, on peut considérer que les

problèmes d'étalonnage intrinsèques des capteurs (focale, distorsion etc...) et d'orientation des images (aéro-triangulation) sont pour l'essentiel bien maîtrisés. Tous les travaux décrits ici raisonnent sur des images orientées et calibrées.

2.1 Approche maillée

La restitution automatique du relief terrestre par vision stéréoscopique sur image aérienne est un thème de recherche actif depuis plusieurs décennies dans la communauté télédétection/photogrammétrie et, pour le contexte "zone rurale/grande ou moyenne échelle" ces techniques, bien que perfectibles, sont couramment utilisées en production [8]. Depuis les années 90, la communauté s'est intéressée plus particulièrement à la restitution du relief en zone urbaine à grande échelle, qui correspond à un besoin fort des utilisateurs mais pose des problèmes spécifiques difficiles à cause notamment des discontinuités (façades) et de la non dérivabilité (arêtes) du relief à restituer.

Pour la restitution en zone urbaine les équipes se sont orientées au départ vers des adaptations des approches en mode maillé [1] qui fonctionnaient en zone rurale; ces approches donnent des résultats satisfaisants en terme de précision géométrique absolue qui permettent de les utiliser pour les applications d'inter-visibilité. La Figure 1 représente un extrait de scène urbaine, avec 3 (parmi 6 utilisées) des vues du même bâtiment et les modèles numériques d'élévation maillés obtenu par multi-stéréoscopie et levé laser aéroporté. La précision géométrique en Z de tels modèles est de 50 centimètres pour les modèles photogrammétrique et de 20 centimètres pour les modèles laser.

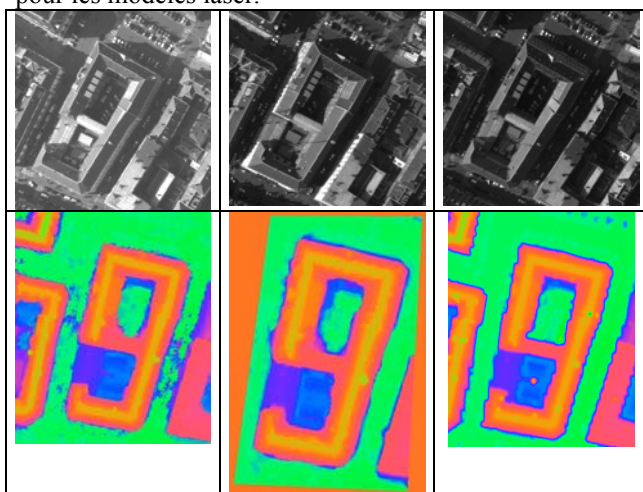


Figure 1 Extrait de scène urbaine. 3 images correspondant à 3 points de vue différents et modèles numériques d'élévation calculés, de gauche à droite : par fusion de différents modèles stéréoscopiques, par multi-vue et modèle obtenu par laser aéroporté..

Il est apparu rapidement que, même avec une excellente précision, ces représentations étaient peu utilisables pour beaucoup d'applications qui ont besoin de modèles compacts (réalité virtuelle), avec des pentes explicitement

décrites (simulation de propagation et réflexions d'onde sonore ou électromagnétique) et avec une bonne qualité cartographique (constitution de bases de données pour intégration dans les systèmes d'informations géographiques).

Beaucoup de travaux récents sur la restitution de scènes urbaines ou péri-urbaines, se sont donc concentrés sur l'extraction du bâti avec des modèles de description de forme adaptés à ce thème. La démarche générale suivie consiste souvent à séparer le travail en une étape de détection initiale, où l'on extrait sur Modèle Numérique d'Élévation (MNE) des zones possibles de bâtiment puis à lancer des extracteurs spécialisés sur chaque zone de focalisation.

2.2 Modèles paramétriques

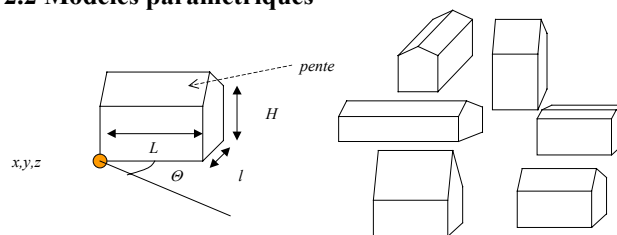


Figure 2 Modèle paramétrique du toit à deux pans avec ses 8 paramètres, quelques instanciations de ce modèle;

Pour l'extraction, une approche retenue par beaucoup d'auteurs consiste à aller reconnaître dans les zones de focalisation une instance d'un des éléments d'un catalogue prédéfini de formes paramétriques (par ex [4] ou [6]). chaque modèle paramétrique représente une forme générique et est instancié en fixant un nombre de paramètres égal au degré de liberté du modèle; le catalogue contient rarement plus d'une dizaine de modèles; la Figure 3 donne quelques exemples de modèles paramétriques parmi les plus simples.

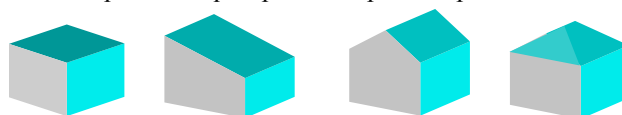
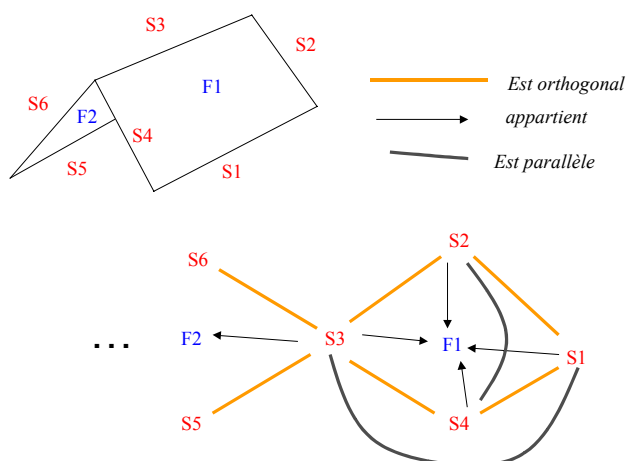


Figure 3 Exemple de modèles paramétriques simples de bâtiments.

Dans sa thèse [4], Fuchs développe une méthode complète de restitution de scène urbaine par recherche automatique d'instances de modèles paramétriques dans une scène urbaine. Dans son approche, chaque modèle paramétrique de bâtiment est décrit par un graphe modèle où les nœuds du graphe représentent les primitives images (segment, facette) et les arêtes du graphe les relations entre les primitives.



La figure représente un exemple (simplifié) de graphe modèle pour le toit à deux pans. L'intérêt de cette modélisation par graphe relationnel est qu'elle isole la partie qui est indépendante des paramètres du modèle puisque seules les relations géométriques (parallélisme, appartenance etc ...) invariantes aux différentes transformations du modèle y sont représentées. Pour effectuer la reconnaissance dans les images, on peut alors décomposer le travail en deux étapes : l'une de reconnaissance, invariante aux paramètres, et l'autre permettant de déterminer les grandeurs géométriques.

Fuchs propose alors la démarche suivante :

- Extraction dans les images des primitives et des relations entre ces primitives (par exemple calcul de segments de droites, calcul des segments parallèles, orthogonaux etc...) on obtient des graphes images;
- Reconnaissance des formes: on recherche dans le graphe image, des sous-graphe "proches" des graphes modèles (par des techniques d'isomorphisme de sous graphes avec tolérance d'erreurs);
- Pour une hypothèse de reconnaissance donnée, calcul des paramètres du modèle en résolvant un système d'équations (en général sur-déterminé) reliant paramètres et primitives.

L'intérêt des modélisations paramétriques est que par construction on est certain d'obtenir une restitution ne contenant que des modèles cartographiquement acceptables. Leur limitation principale est qu'il faut un très grand nombre de modèles différents pour modéliser correctement la réalité. En fait, en dehors de travaux amont telle que ceux décrit précédemment, elles sont surtout utilisées aujourd'hui dans des approches semi-automatiques où c'est l'opérateur humain qui se charge de l'aspect reconnaissance de formes.

2.3 Utilisation de bases de données

Une autre approche, couramment développée consiste à tirer parti des données existantes correspondant déjà à une modélisation partielle de la scène. Pour le thème bâti et pour les pays développés, il existe presque partout des données cadastrales qui contiennent une représentation en 2 dimensions, cartographiquement pertinente, des bâtiments.



Figure 4 Données utilisés en entrée de l'approche développée par Jibrini : couple d'images et cadastre vectorisé.

Dans sa thèse [7], Jibrini part d'un couple stéréo et d'un cadastre vectorisé pour extraire automatiquement une modélisation 3D de scènes urbaines. La Figure 4 représente sur un îlot de bâtiment les entrées du système développé pendant sa thèse. L'intérêt de disposer d'une base de données 2D pour arriver à l'extraction de modèle 3D de bâtiment est multiple :

1. Focalisation : on ne va chercher à extraire des modèles des bâtiments que là où il y en a;
2. Segmentation : la recherche d'un modèle 3D global de la scène est décomposée de manière pertinente en une multitude de "petits" problèmes de reconstruction 3D, il s'agit évidemment de l'apport essentiel de la donnée cadastrale car elle permet de changer d'ordre de grandeur de la combinatoire du problème; de plus cette segmentation est pertinente au sens où, dans la grande majorité des cas la surface à reconstruire à l'intérieur d'un bâtiment est continue; on peut donc modéliser la surface à l'intérieur de chaque ligne cadastrale comme une surface continue affine par morceaux;
3. Information a priori sur le 3D : le contour planimétrique du bâtiment donne une information sur les plans constituant le toit du bâtiment, on peut contraindre les plans définissant le toit du bâtiment à avoir une de ces directions planimétriques comme intersection avec le plan horizontal; cet apport n'est pas fondamental et il n'est utilisé que de manière optionnelle dans le système.

Pour tenter de conserver l'avantage des modèles paramétriques en terme de qualité cartographique, sans en avoir les limitations en terme de pouvoir de description de formes, nous pouvons nous demander en quoi, de manière générique, ces modèles sont cartographiquement satisfaisants et utiliser ensuite cette caractérisation comme un critère de qualité dans une méthode globale d'optimisation. Parmi les éléments de réponse qui font que ces formes des modèles paramétriques sont simples, on peut citer :

- elles contiennent un nombre limité de faces de plans;
- elles contiennent peu d'arêtes;
- elles contiennent de nombreuses symétries;
- elles contiennent beaucoup d'angles droits.

Le critère des angles droits est relatif à la planimétrie et nous avons peu de contrôle dessus (puisqu'elle est déjà

donnée par le cadastre). Celui sur les symétries est un peu plus flou et difficile à utiliser. Les critères sur le nombre de faces et les nombres d'arêtes semblent donc a priori les plus pertinents. Ces deux critères sont d'ailleurs corrélés (via la formule d'Euler pour un graphe planaire) et donc assez équivalents; c'est donc finalement sur la détection de plan (qui conduit à des détections initiales plus robustes que les arêtes) qu'est bâtie la stratégie de [7].

A partir de cette modélisation des bâtiments, Jibrini a développé une méthode originale dont le principe est de calculer une surface polyédrique optimale. Le critère optimisé intègre classiquement un terme d'attache au données (ici donné par la corrélation à partir du couple stéréoscopique) et un critère de simplicité de forme (celui retenu est le nombre de plans). La Figure 5 représente sur la même zone que la Figure 4 les résultats obtenus par cette approche.

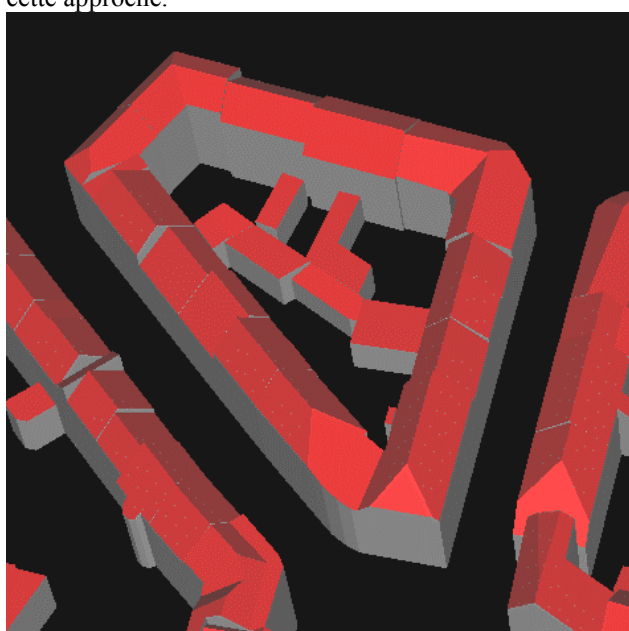


Figure 5 exemple de résultat ici la thèse de Jibrini (modélisation des toits de bâtiments par des surfaces polyédriques continues optimales).

3 Occupation du sol et paysage.

Les photographies aériennes puis les images de satellites sont depuis très longtemps utilisées pour la cartographie d'occupation et d'usage des sols et pour les études de paysages. Dès le début de l'imagerie spatiale numérique, dans les années 1970, des méthodes d'interprétation automatique à base de classification avec apprentissage ont été développées.

3.1 modèles statistiques/ déterministes.

L'introduction d'un raisonnement, ou d'un conditionnement, sur les objets géographiques rend d'autant plus nécessaire l'utilisation de méthodes efficaces de segmentation, pour introduire des objets sur lesquels on peut appliquer des contraintes, issues de connaissances géographiques. Les premiers essais de systèmes experts d'interprétation qui utilisaient les pixels comme objets [2] ont en effet rapidement montré l'insuffisance du pixel

comme objet support du raisonnement spatial. La difficulté d'une bonne segmentation provient largement du caractère "multi-échelle" des phénomènes, intrinsèquement bien sûr mais surtout vis à vis d'une thématique utilisateur [5]. Ainsi, il n'existe pas une segmentation pertinente unique, mais une hiérarchie de segmentations que l'on peut avoir à manipuler simultanément, car les connaissances à utiliser peuvent faire appel à des objets situés à des niveaux d'échelle différents. Par exemple, on pourra simultanément s'intéresser aux objets du type "maison" et aux objets du type "village", les méthodes de raisonnement relevant alors de l'analyse spatiale [11].

Un exemple démonstratif de ce genre d'approche est celui des détections de changement dans l'occupation du sol où l'on dispose d'un état et d'une image anciens, d'une image récente, et de statistiques d'évolution. Un simple conditionnement bayésien permet alors de calculer des probabilités de changements, sous réserve qu'on ait pu s'affranchir des variations des conditions de prise de vue. Chaque "objet" (région issue d'une segmentation) est caractérisé par des paramètres image (du type intensité, teinte, saturation, forme, texture...) et par un état antérieur. L'apprentissage se fait sur l'état ancien, les changements étant assez peu nombreux pour se comporter comme du bruit dans l'apprentissage. Le voisinage est pris en compte (relaxation markovienne), pour tenir compte des phénomènes de changement par extension (croissance urbaine par exemple).

	bâti	parkingroute	carrière	prairieculture	vigneverger	bois	lande	plage	rocher	marais	marais-salants	eau	glaciers
bâti	86,3	2,0	0,3	9,2	0,3	0,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
parking, route	6,7	75,3	0,6	15,6	0,0	0,8	0,7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
carrière	4,2	3,1	67,0	14,2	0,2	3,7	3,8	0,1	0,5	0,0	0,0	3,2	0,0
prairie, culture	0,7	0,2	0,1	96,3	0,6	1,0	0,9	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0
vigne, verger	0,8	0,1	0,1	18,8	78,7	0,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
bois	0,2	0,0	0,1	2,5	0,1	96,0	0,9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
lande	0,6	0,2	0,2	13,1	0,5	13,0	70,9	0,0	0,9	0,2	0,0	0,2	0,0
plage	0,4	1,0	1,0	5,1	0,0	2,4	0,3	75,3	1,0	1,8	0,3	11,3	0,0
rocher	0,0	0,0	0,1	1,6	0,0	1,7	2,3	0,0	93,9	0,0	0,0	0,2	0,0
marais	0,7	0,3	0,3	11,8	0,1	4,0	2,2	0,0	0,0	77,0	0,4	3,2	0,0
marais-salant	0,2	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	5,0	92,7	1,4	0,0
eau	0,1	0,1	0,3	3,1	0,1	1,2	0,4	0,0	0,1	1,2	0,1	93,1	0,0
glacier	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,2	0,0	0,0	96,0

Tableau 1- Conditionnement d'évolution issu des statistiques Ter-Uti

Malgré tout, les résultats restent statistiques ce qui est insuffisant pour une cartographie complètement automatique, mais utilisés comme une alerte correctement calibrée, on peut atteindre une fiabilité (non détection

d'un changement significatif réel) atteignant 1%, ce qui est normalement suffisant.

Le type de règles ou de contraintes qui seront utilisées dépendent évidemment de la région à analyser. Ainsi, dans une cartographie de l'occupation du sol en montagne, les formes des objets sont de peu d'utilité. Les principales contraintes proviennent du relief (altitude, pente et exposition) qui contraint la végétation selon des modèles qualitativement bien connus et même quantitativement déterminés [3].

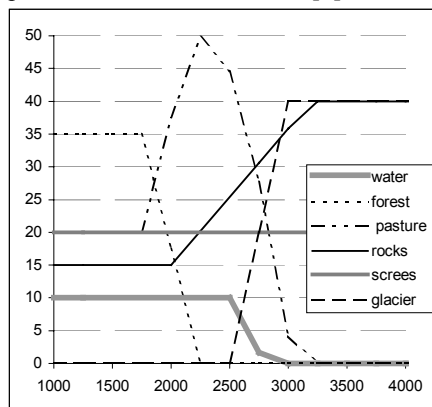


FIG. 1 – Probabilité a priori sachant l'altitude utilisée dans [10]

Dans ce type de milieu de montagne, les contraintes sont probabilistes mais sans exception car elles sont d'origine physique. La difficulté dans ce type de milieu est une modélisation correcte des effets d'éclairage qui ont un impact dominant sur l'image: le signal à interpréter est d'ordre 1 par rapport aux variations d'éclairage d'ordre 0.

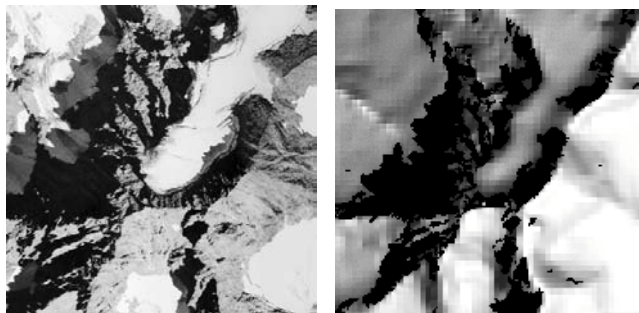


Figure 2 Photo aérienne et éclairage total calculé.

3.2 Modèles fonctionnels.

Dans d'autres travaux, les modèles utilisés peuvent être des modèles fonctionnels complexes, où les pratiques agricoles induisent un schéma de répartition de l'usage des terres selon les positions par rapport au village, entre elles et par rapport aux sommets..

Dans un tel milieu agricole les formes des objets (parcellaire) sont indispensables pour les caractériser. Après seulement, il est possible d'utiliser des règles d'usage (du type: en bordure d'un bois on rencontre fréquemment un pâturage et très rarement un champ de maïs). La difficulté vient alors de la représentation

d'information localement incertaine (il existe toujours de nombreuses exceptions à un modèle rationnel du comportement social). Assez naturellement des approches multi-agents modélisant le comportement des agriculteurs (ou plus généralement des acteurs du paysage) dans un milieu contraint ont été utilisées dans ce genre de cas.

L'image devient alors seulement un outil de contrôle/calibration du modèle qui est lui-même utilisé à des fins de simulation-prédiction d'évolution.

4 Conclusion

Cet article a présenté quelques approches de recherche sur la restitution et modélisation des paysages pour la production cartographique à partir d'imagerie aéroportée en prenant l'exemple de deux thématiques liées à des types de paysages différents: reconstruction tridimensionnelle des bâtiments (milieu urbain) et calcul de l'occupation du sol (milieu rural).

Un des traits communs à l'ensemble des recherches de la communauté depuis la dernière décennie est l'usage croissant de sources d'information multiples pour contourner les difficultés de l'interprétation automatique des images.

Il est probable que dans les prochaines années, avec l'arrivée des satellites haute résolution (Ikonos, Quick bird, bientôt Pléiades) et le volume d'images disponible, on verra de plus en plus de travaux utilisant les bases de données existantes comme guide de lecture permettant de progresser dans l'interprétation automatique des images aériennes et satellite.

Références

- [1] C Baillard, O Dissard, O Jamet and H Maitre "Extraction and Characterization of Above Ground Areas in a Peri-Urban Context", in Proceeding of IAPR TC-7 Workshop "Remote Sensing and Mapping pp 154-174, Graz, Austria, September 1996.
- [2] D. Blamont, C. Mering CIME un système expert de cartographie par télédétection en région de montagne. Bulletin SFPT 115. Paris 1989.
- [3] H. Elhaï Biogéographie. Armand Colin Paris 1968.
- [4] F Fuchs "Contribution à la reconstruction du bâti en milieu urbain, à l'aide d'images aériennes stéréoscopiques à grande échelle, étude d'une approche structurale", Thèse de doctorat de l'université Paris V-René Descartes.
- [5] L. Guigues, Hervé Le Men, J.P. Coquerez Scale-sets image analysis, Grets 2003.
- [6] E Gulch, H Muller, T Läbe L Ragia "On the performance of Semi Automatic Building Extraction" in : Pro ISPRS Symposium, Comm III, Vol 32, part 3/1, 1998.
- [7] H. Jibrini "Reconstruction automatique des bâtiments en modèles polyédriques 3D à partir de données cadastrales vectorisées et d'un couple d'images aériennes à haute résolution" Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunication, Paris, France, April 2002.
- [8] P Julien "Principle of Digital Matching" in Proceedings of OEEPE Workshop on Automation in

Digital Photogrammetric Production, Juin 99, Marne la Vallée, pp 161-172.

[9] F. Le Ber Représentation de connaissances et raisonnements sur l'espace. Application au domaine agronomique. Mémoire HdR. Avril 2003. Université de Nancy.

[10] H. Le Men, J. Trévisan, D. Boldo. Automatic extraction of landcover themes on digital orthophotos in mountainous area for mapping at 1/25k. ISPRS Comm. II. Xian 2002.

[11] L. Sanders. *Modèles en analyse spatiale*. Hermès. Paris 2001.

Session 5

Apprentissage

- Quelques jalons historiques et quelques réflexions sur l'apprentissage
M.Milgram
- L'approche animat et la robotique évolutionniste
S.Doncieux, J.A.Meyer
- Comportement et cognition : ce que nous apprend un mini-cerveau
M. Giurfa

Quelques jalons historiques et quelques réflexions sur l'apprentissage

Maurice Milgram¹

¹LISIF-Univ. Paris VI

BC164, 4 place Jussieu, 75005 Paris
maum@ccr.jussieu.fr

Résumé

Mon objectif est ici d'examiner quelques éléments historiques et techniques pour tenter d'éclairer cette désillusion. Je ferai un rappel sur l'agitation cybernétique des années 40 et 50 en particulier les conférences Macy (éditées par Von Foerster). Ensuite, je présente un examen de quelques questions liées à l'apprentissage : statut de l'erreur, mémorisation vs apprentissage, apprentissage distribué.

Mots Clef

Apprentissage automatique, Cybernétique, Erreur, Complexité, Apprentissage distribué.

1 Introduction

Le regain d'intérêt récent pour les sciences cognitives, y compris dans les sciences de l'ingénieur, a permis un nouveau brassage des idées qui s'inscrit dans la tradition des transferts de concepts entre les différentes communautés. Les idées circulent de la biologie vers la robotique (adaptation, apprentissage, réseaux neuronaux, algorithmes génétiques) et inversement (feed-back, homéostasie, etc.).

La première cybernétique (Wiener, Ruyer, Couffignal, Ashby, von Neumann) a été un nom fédérateur plus qu'une discipline au sens strict et ce nom est aujourd'hui entaché d'archaïsme.

La « seconde cybernétique » (autonomie, auto-organisation) a certainement eu plus d'impact sur la robotique actuelle qui parle de systèmes « bio-inspirés » même si plus aucune équipe de recherche ne brandit le

drapeau cybernéticien. Cela traduit une évolution et aussi une désillusion.

Mon objectif est ici d'examiner quelques éléments historiques et techniques pour tenter d'éclairer cette désillusion :

- Un rappel sur l'agitation cybernétique des années 40 et 50 en particulier les conférences Macy (éditées par Von Foerster)
- Un examen de quelques questions liées à l'apprentissage

2 L'agitation de la première cybernétique

Pour de La Mettrie [1] en 1747, « l'homme est une machine ». Pour N.Wiener deux siècles plus tard, « la cybernétique se présente comme la science des analogies maîtrisées entre organismes et machines ».

Les organismes vivants apprennent, si nous arrivions à maîtriser l'analogie...les machines devraient pouvoir apprendre. La question : « qu'est ce que l'apprentissage pour les systèmes vivants ? » pose autant le problème de sa fonction que celui de ses moyens. Il y a les fonctions « cognitives » (langage, raisonnement) mais aussi les fonctions « physiologiques externes » (locomotion) ou internes (système immunitaire).

La vieille question inné vs acquis, les problèmes de plasticité neuronale, la nature des supports de la mémoire, etc. Quand on sait que dans la même espèce d'oiseaux, deux « cousins » diffèrent sur le caractère inné ou acquis du chant, on voit que le chemin sera long.

Durant les 10 conférences Macy [2], de 1946 à 1953, des mathématiciens, ingénieurs, neurophysiologistes, psychologues et économistes parmi les plus brillants de l'époque, se sont réunis pour tenter de fonder « une nouvelle science de l'esprit ». Wiener, Shannon, Von Neumann [3], McCulloch, Pitts. Il semble à tous les critiques sérieux qu'ils ont échoué dans cette entreprise mais que cette démarche a produit beaucoup.

Frank Rosenblatt [4], de 1957 à 1961, a poursuivi une série de recherches à l'université Cornell, aboutissant au mythique « Perceptron », admiré, critiqué (par Minsky), utilisé (industriellement, métaphoriquement), généralisé (les MLP et avatars) : bref, un monument, un vrai jalon. Un système électronique peut apprendre à partir d'exemples à classer des formes et sera capable de généraliser (avec un certain succès et certaines limites bien connues depuis 1972). Concrètement : il s'agit d'une simple descente de gradient pour trouver les paramètres optimaux d'un « filtre » non linéaire (avec un critère mal choisi comme on l'a vu plus tard : pas toujours dérivable, traquant uniquement ses erreurs sans prendre en compte les succès). Hebb avait en 1949 proposé une autre règle plus biologique et moins féconde mais qui a été explorée jusqu'aux années 90.

Dans un autre camp (adverse ?), appelé « cognitiviste » plus tard, on travaille sur une autre forme d'apprentissage : l'apprentissage symbolique. Cette approche a aussi ses grands succès et ses grands détracteurs (Dreyfus, Hofstadter). Sa langue, c'est la logique (en fait toutes les structures finies) et ses moteurs la récursivité et l'exploration. Dans un article intitulé « Se réveiller du rêve booléen », Doug Hofstadter [6] tente de montrer que « tout se passe dans les 100 premières millisecondes » (pour la perception) et

Pour les cybernéticiens, apprendre, c'est finalement extrapoler (au sens numérique) à partir d'exemples, pour l'IA, apprendre c'est généraliser et combiner (la notion de modularité est très importante). C'est trouver une formule, une expression formelle, un programme qui se comporte comme tous les cas particuliers (instances, exemples, prototypes) dont on dispose. Des arguments et des stratégies variées sont mis en œuvre dans cette compétition selon D. Memmi [5]:

- Ségrégation (domaines de pertinence disjoints)
- Compilation (les réseaux réalisent le bas niveau, le langage machine)
- Hybridation
- Inclusion (comme la Relativité inclus la mécanique de Newton)

Un autre courant (que l'on peut qualifier de probabiliste et d'ailleurs Savage, l'un des pères des théories de l'induction a participé aux conférences Macy), initié par M.L. Tsetlin sous le vocable de « learning automata » s'hybride plus facilement avec l'approche symbolique. Ce courant est basé sur une approche probabiliste (Markov) et discrète pour modéliser l'environnement (ce qui doit être appris) et le comportement (par exemple d'un robot). Ce courant a beaucoup évolué et reste très actif, particulièrement dans le monde des systèmes intelligents et des robots. Identifier (ou apprendre) des probabilités au lieu de poids synaptique, c'est ce que font les HMM (Hidden Markov Models) en compétition avec les MLP

(Multi Layers Perceptrons) dans certaines tâches de classification (parole, écriture).

Dans l'âge d'or de la Reconnaissance de Formes structurelle, une branche très active du domaine était consacrée à l'apprentissage automatique de « règles de grammaires ». Ce problème connu sous le nom d'inférence automatique consiste à chercher, parmi une vaste collection de grammaires formelles (en gros, chacune comporte un ensemble de règles de réécriture et des symboles qui décrivent des formes élémentaires, les règles servant à les assembler pour construire des formes complexes), la grammaire qui colle le mieux avec les exemples et les contre-exemples dont on dispose. Après plusieurs décennies de recherches acharnées, on constate que cette approche est quasiment en extinction. Le bruit a triomphé car, malgré une injection de probabilités et autres automates tolérants, l'approche syntaxique a été asphyxiée par le bruit comme de subtils mécanismes par des grains de sable.

Enfin, je crois qu'il ne faut pas perdre de vue le nouveau courant computationnel qui tente de dépasser la « machine de Turing » (A. Sloman [7]). Si on admet que finalement l'apprentissage est une forme de calcul (on l'a admis pour la pensée en général), la nouvelle génération de théoriciens du calcul tente d'établir un lien plus fécond entre la pratique des chercheurs en IA par exemple et les fondations logique et épistémologique de la théorie du calcul.

3. Le statut de l'erreur et du bruit

L'erreur, c'est une différence entre ce qui est produit par le système artificiel (robot, classifieur) et ce que l'on (le maître) attend. Abraham Moles a défini jadis l'information comme « une différence qui provoque une différence ». Il s'ensuit que l'erreur peut être considérée comme une information, elle est d'ailleurs appelée innovation dans certains filtres. Le bruit, c'est en général ce que l'on modélise comme la partie non utile du signal. Pour un robot muni d'un télémètre, les mesures sont entachées de bruit. La détermination des obstacles à partir de ces mesures bruitées peut conduire à des erreurs. Toute l'interprétation des données conduit à utiliser des modèles, donc à introduire un biais (ce qui est représentable, ce n'est pas tout ce qui est possible) pour combattre la variance (due au bruit). L'erreur peut servir dans des boucles d'asservissement, dans des algorithmes d'apprentissage (rétropropagation de l'erreur), ce sont des systèmes continus vis à vis de l'erreur.

Dans l'apprentissage symbolique, l'erreur conduit à remettre en cause le modèle : exemple célèbre des modèles d'« arches » de Winston. Ces systèmes sont discontinus vis à vis de l'erreur et vont même jusqu'à rebrousser chemin (backtracking).

Un cas moins évident est le problème de l'apprentissage d'une commande à partir d'exemples de réponses partiellement erronnées fournies par un expert. Soit une variable de commande u et un résultat $F(u,x,a)$ où x modélise la partie connue de l'état et a modélise les aléas non observables. Supposons que la consigne soit $F=0$ et qu'on dispose d'une base formée de couples (u,x) et de la valeur $F(u,x,a)$ prise par le système après application de la commande. On serait tenté d'écarter les commandes qui ont produit des effets incorrects (F élevé) du processus d'apprentissage pour ne retenir que les « bonnes » commandes. L'expérience montre que ceci n'est pas efficace car les situations difficiles où la bonne commande n'a pas été proposée ne seront pas du tout examinées (encore moins apprises). D'autre part, apprendre les erreurs ne semble pas très judicieux. On constate qu'une bonne solution consiste à « corriger » heuristiquement les commandes erronées et à les apprendre. Si la relation $u \rightarrow F(u,..)$ est monotone, on se contentera d'ajuster u dans le bon sens, le module étant déterminé par optimisation.

Ici, la base d'apprentissage était partiellement erronée mais on ne pouvait s'en tirer par un simple filtrage des erreurs, les points erronés s'accumulant dans les zones sensibles. Mieux valait apprendre une commande non-optimale que rien du tout.

4. Apprendre ou mémoriser

Partons d'un cas « concret » : un robot peut-il se localiser en mémorisant simplement un très grand nombre d'images prises un peu partout dans son espace d'intervention puis se décider en comparant l'image de ce qui est autour de lui à cette base de donnée ?

La réponse ne peut être positive que dans des cas simplifiés (absence de variations importantes d'éclairage, peu d'objets mobiles, rigidité de l'environnement). Nous sentons qu'il existe dans le flux de données issu des capteurs du robot une certaine hiérarchie : il y a des données importantes (pour la localisation) et d'autres non. Les données importantes caractérisent les objets stables (spatialement et radiométriquement) et singuliers (apport d'information). Ici, le bruit, c'est ce qui est mobile ou d'apparence instable.

Tout mémoriser revient à mémoriser surtout du bruit. Si on dispose d'une base de 100 vecteurs à 2 composantes représentant 2 types d'objets (obstacles et non-obstacles) et que notre algorithme de classification pour un vecteur de classe inconnue soit la règle du plus proche voisin avec un taux d'erreur de 2% . Ajoutons à chaque vecteur un grand nombre de composantes (200 par exemple) inutiles (des nombres aléatoires uniformément distribués). La même règle aboutit alors à environ 20% d'erreurs. Nous n'avons pas bruité les données utiles, nous les avons noyées dans 99% d'inutiles.

Un bon système doit donc être capable de limiter les données inutiles (en plus de filtrer le bruit) mais cela n'est pas suffisant. L'information utile peut ne pas figurer directement dans la base mais résulter de calculs : c'est le cas des systèmes à base de connaissance utilisant des méthodes de chaînage (systèmes experts par exemple). Le calcul est ici de type « logique ». Dans les bases de données « numériques », le calcul est en général réalisé par des outils statistiques, neuronaux ou par des algorithmes d'interpolation. Pour ces types de données, il faut prévoir une phase de « compilation » : apprendre un MLP ou une distribution statistique, c'est extraire des données la partie utile et en diminuer le bruit ; ceci est accompli au prix d'un biais (la restriction imposée par la classe de modèles) visant à diminuer la variance (due aux bruits entachant les données). Le succès de ces outils provient sans doute de leur capacité à compiler de manière générique toute sorte de données alors que les approches symboliques nécessitent de subtiles adaptations et même parfois l'intervention d'experts du domaine.

La théorie de la complexité algorithmique [8] (donc non probabiliste) envisage 2 mesures : la première décrit le caractère compressible d'un message (programme, données) par la longueur du programme minimal qui engendre ce message. Les résultats du loto sont donc complexes car pas du tout compressibles, le programme qui les engendre est du type « print x y z ». Les décimales du nombre π peuvent être engendrées par un programme très court, même si elles présentent toutes les autres caractéristiques statistiques (normalité de Borel) des séquences aléatoires.

La seconde mesure appelée profondeur est basée sur le nombre minimum d'instructions exécutées par un programme qui engendre le message. Une séquence aléatoire est donc peu profonde même si la taille de son programme est grande, ce programme est simplement constitué d'une instruction. C'est l'inverse pour les décimales de π qui sont obtenues par itérations.

Mémoriser en apprenant par cœur, c'est utiliser un programme ayant la même longueur que les données mais simple. Entraîner un réseau de neurones, c'est effectuer à l'aide d'un programme court (en taille) de gros calculs, c'est donc être profond.

5. Apprentissage collectif

L'approche multi-agents est maintenant largement utilisée dans différents domaines de la robotique. Il est intéressant d'examiner l'intersection entre cette approche et l'apprentissage automatique [9].

Les agents sont censés apprendre collectivement des règles ou des données (ou une organisation, une stratégie) du fait de leur interaction. Il y a donc

apprentissage automatique au niveau individuel et au niveau collectif. L'observation de l'échec ou du succès de l'action d'un agent par un autre agent en est un exemple, pas forcément le plus simple à mettre en œuvre.

Se pose aussi la question du « credit assignment », c'est à dire la pondération à appliquer aux différentes actions des différents agents des résultats globaux de ces actions (écart à une consigne par exemple), question cruciale pour implémenter un bon système de renforcement.

Un point qui est aussi totalement nouveau en matière d'apprentissage dans le contexte distribué est la création, la suppression, la fusion ou la coalition d'agents. Cet aspect de l'apprentissage touche à la topologie du système. Un cas élémentaire est la reconfiguration des réseaux de processeurs en cas de panne ou pour optimiser une performance sur une tâche nouvelle.

Une récente comparaison avec le Q-learning [10] a montré que dans certains problèmes (ici évacuation de personnes vers des abris) une stratégie qui ne faisait pas d'hypothèse markovienne était encore possible et même efficace. Cette stratégie (PSP : Profit Sharing Plan) semble résister à un environnement aléatoire difficile à modéliser et même à des confusions perceptives des agents. Ces travaux ont été menés via des simulations uniquement.

6. Conclusion

J'ai essayé d'aborder quelques thèmes de l'apprentissage automatique concernant les aspects historiques et certains paradigmes comme le statut de l'erreur, la complexité algorithmique, la mémorisation et l'apprentissage collectif.

Il me semble qu'on gagne souvent à comprendre l'histoire (au moins récente) d'une discipline, même si cet exercice n'est pas évident en raison du manque de recul ou même parfois d'informations. Les mots ont leur parfum et il arrive que des communautés se mettent à ne plus pouvoir « sentir » certains mots, le mot cybernétique en est un bon exemple. On sait que le mot « chien » ne mord pas, il est probable que le mot « cybernétique » n'est pas un sésame et a suscité trop de fantasmes, provoqué trop de désillusions. Profiter des analyses de cette période 40-50 déjà disponibles devrait nous faire gagner du temps.

Parmi les autres thèmes que j'ai abordés, le dernier, sûrement celui que je connais le moins bien, me semble mériter une attention particulière dans ce monde forcément distribué qu'est la robotique.

Références

- [1] Julien Jean Offray de La Mettrie : *L'Homme Machine*, (1747) Edition Folio, 1999
- [2] Jean Pierre Dupuy : *Aux origines des sciences cognitives*, Editions La Découverte, 1994
- [3] Steve Heims *The Cybernetics Group*, MIT Press, 1991
- [4] Frank Rosenblatt, *Principles of Neurodynamics. Perceptron and the theory of brain mechanisms*, Spartan Books, 1962
- [5] Daniel Memmi, *Connexionnisme, Intelligence Artificielle et modélisation cognitive*, Intellectica, n°9-10, 1990
- [6] Douglas Hofstadter, *Waking up from the Boolean Dream or Subcognition as Computation* pp 631-665 in *Metamagical Themas*, Penguin Books, 1985
- [7] Aaron Sloman, *The irrelevance of Turing machines to Artificial Intelligence*, in *Computationalism*, New Directions edited by M.Scheutz, The MIT Press, 2002
- [8] Jean Paul Delahaye : *Information, complexité et hasard* (2° Ed.), Hermès, 1999
- [9] Gerhard Weiss : *Some Studies in Distributed Machine Learning and Organizational Design* Technical Report (Forschungsberichte Künstliche Intelligenz), 1994
- [10] S.Arai, K.Sycara, T.Payne: *Experience-based Reinforcement Learning to Acquire Effective Behavior in a Multi-agent Domain*, Proc. 6th Pacific Int. Conf. On Artificial Intelligence

L'approche animat et la robotique évolutionniste

Stéphane Doncieux

Jean-Arcady Meyer

AnimatLab/LIP6
8 rue du capitaine Scott
75015 Paris

[stephane.doncieux,jean-arcady.meyer]@lip6.fr

Résumé

De nombreuses recherches puisent dans les lois de la génétique et dans les mécanismes de la sélection naturelle l'idée de coder le phénotype d'un robot dans son génotype puis de soumettre ce phénotype à un processus de sélection artificielle, de façon à ce que les performances de ce robot s'améliorent au cours de générations successives. Il arrive que soient ainsi automatiquement produits des artefacts plus performants que des robots conçus par l'homme. Cet article évoque comment une telle robotique évolutionniste est mise en œuvre, à quelles réalisations elle a conduit, à quelles difficultés elle se heurte.

Mots Clefs

Animat, robot, autonomie, adaptation, évolution.

1. L'approche animat

Dans de nombreux domaines d'application, le besoin d'utiliser des agents autonomes capables d'adapter leur comportement à des circonstances changeantes se fait sentir. Pour pouvoir accomplir une mission donnée dans un environnement plus ou moins prévisible - lorsqu'il s'agit, par exemple, de partir à la recherche d'une certaine information sur le réseau Internet - ou dans un environnement plus ou moins menaçant - lorsqu'il s'agit, par exemple, d'aller explorer une planète lointaine - il est en effet indispensable que de tels agents soient capables d'adapter leur comportement aux circonstances imprévues, et ce sans aucune intervention humaine. En d'autres termes, le succès de leur mission dépend de l'aptitude de ces agents à exhiber des comportements adaptatifs.

Alors que les animaux sont des exemples vivants de tels agents, capables de survivre dans une très large variété de circonstances et d'environnements, il est malheureusement évident qu'aucun agent artificiel ne peut encore rivaliser de ce point de vue avec le moindre animal, aussi simple et primitif soit-il. Cependant, l'apparition de nouveaux paradigmes en informatique - réseaux de neurones, systèmes de classeurs, algorithmes

génétiques, par exemple - ainsi que les gains considérables en temps de calcul offerts par les ordinateurs modernes, ont récemment conduit à quelques progrès notables dans cette direction. En particulier, depuis une dizaine d'années, de nombreux chercheurs s'attachent à concevoir des *animats* - c'est-à-dire des agents simulés sur ordinateur ou des robots réels - dont les lois de fonctionnement sont plus ou moins étroitement inspirées de mécanismes naturels, et dont les comportements exhibent certaines des caractéristiques d'autonomie et d'adaptation dont les animaux sont capables [33][32][3][27][39][29][14].

Un animat est généralement équipé de senseurs, d'actionneurs, et d'une architecture de contrôle qui relie ses perceptions à ses actions (Fig. 1). Une telle organisation lui permet d'assumer une certaine mission dans son environnement ou d'apprendre à réaliser le mieux possible une certaine tâche, tout en réussissant à *survivre* le plus longtemps possible.

Dans un tel contexte, la survie de l'animat dépend d'un certain nombre de variables essentielles dont les évolutions temporelles doivent être maintenues dans une *zone de viabilité* idoine [1], un objectif qui peut être facilité si l'animat est capable de tirer bénéfice des récompenses ou punitions que lui valent ses actions.

L'architecture de contrôle d'un animat peut être innée - au sens où elle a été programmée ou câblée par un humain - ou acquise - au sens où elle résulte d'un apprentissage survenu au cours de la vie individuelle de l'animat ou au cours de générations successives.

Cet article traite de cette dernière approche, appliquée à la conception de robots réels, dans le cadre de ce qu'on appelle communément *la robotique évolutionniste* [11][18][31][36][40].

2. La robotique évolutionniste

La robotique évolutionniste repose sur la distinction, classique en biologie, entre *génotype* et *phénotype*. Le

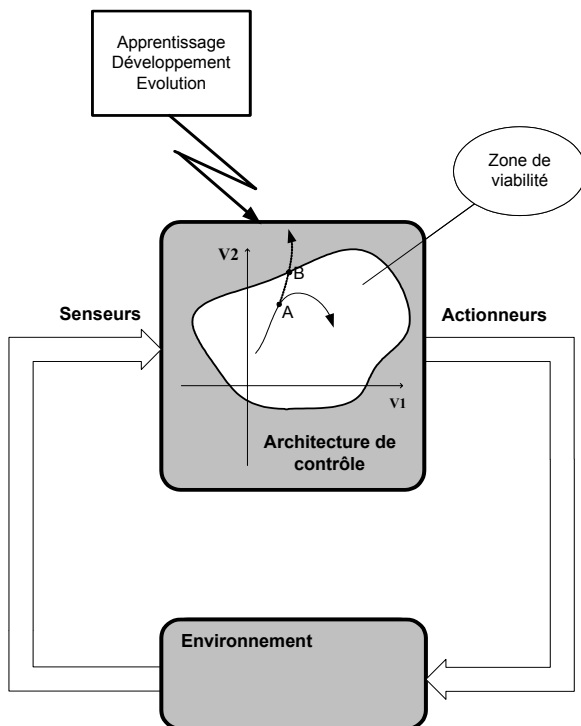


FIG. 1. Le comportement d'un animat peut être qualifié d'adaptatif tant que son architecture de contrôle permet de maintenir ses variables essentielles (par exemple, V_1 et V_2) dans leur zone de viabilité. Ici, une action correctrice a été accomplie au point A, de façon à éviter de quitter la zone de viabilité au point B. Dans la mesure où cette architecture de contrôle sert aussi à choisir les buts successifs que l'animat cherche à atteindre ou à arbitrer entre des buts conflictuels, elle joue le rôle d'un système motivationnel.

L'organisation de l'architecture de contrôle peut être modifiée par des processus de développement, d'apprentissage ou d'évolution.

génotype est une description codée du phénotype d'un robot, description susceptible d'être transmise de génération en génération. Le phénotype est à la fois son organisation matérielle - par exemple sa forme ou la nature de ses senseurs et actionneurs - et son système de contrôle. La performance de ce phénotype dans l'accomplissement d'une tâche donnée est quantifiée par une valeur appelée *valeur sélective* ou *fitness*. Dans une expérience de robotique évolutionniste, c'est l'expérimentateur humain qui décide de la façon dont le génotype d'un robot va coder son phénotype et de la façon dont la fitness va permettre d'évaluer les robots obtenus. En revanche, c'est un processus d'évolution artificielle - donc automatique - qui, à partir d'une population initiale de génotypes, va faire évoluer ces génotypes de façon à ce que les phénotypes qu'ils décrivent obtiennent des notes de fitness de plus en plus élevées et correspondent donc à des robots de plus en plus performants. Les algorithmes évolutionnistes les plus usités pour ce faire sont les *algorithmes génétiques* [16][10], les *stratégies évolutionnistes* [41] et la *programmation génétique* [24]. Quant aux mesures de fitness, elles peuvent être faites directement sur un robot

ou à partir d'une simulation du comportement de ce robot. Dans ce dernier cas, il faut que cette simulation soit suffisamment fidèle à la réalité pour que le transfert sur robot réel des solutions performantes ainsi obtenues s'opère correctement. Il existe certaines procédures qui ont vocation à faciliter ce transfert [20].

2.1 Evolution du comportement

A ce jour, une large majorité d'applications de la robotique évolutionniste a porté sur des robots simples et, notamment, sur des robots mobiles Khepera [34]. Dans la mesure où plusieurs centaines de laboratoires utilisent ces robots dans le monde, l'évolution de contrôleurs connectés à la fois aux senseurs et aux moteurs d'un Khepera en vue de générer des comportements d'exploration, d'évitement d'obstacle, de suivi de mur ou de recherche d'objet est une opération courante. Si la plupart de ces contrôleurs sont instanciés sous forme de réseaux de neurones [28], des programmes informatiques plus généraux peuvent être soumis à évolution [4][12][21][37]. En particulier, il a été possible de faire évoluer des programmes permettant à deux robots Khepera équipés d'une caméra de jouer l'un contre l'autre dans un jeu de football simplifié [38]. Ces programmes étaient organisés en modules hiérarchisés tels que certains de ces modules assuraient des comportements basiques - comme tourner autour de la balle ou se diriger vers le but adverse - tandis que d'autres décidaient de l'ordre dans lequel ces comportements devaient être exécutés. Un robot contrôlé par un tel programme a participé à un championnat de robot-football, au cours duquel il a souvent défait des robots contrôlés par des programmes conçus par des humains.

D'autres robots simples ont été utilisés dans le cadre d'une expérience destinée à faire évoluer les comportements d'une collectivité de huit robots [43]. Le dispositif expérimental correspondant comprenait une arène carrée au centre de laquelle une source lumineuse était disposée. Le plancher de l'arène était électrifié de façon à assurer l'autonomie énergétique de chaque robot, lequel était équipé de senseurs détectant la lumière et de moteurs agissant sur ses deux roues. La tâche de chaque robot était de rejoindre la source de lumière à partir de la périphérie de l'arène et, lorsqu'un tel événement se produisait, sa fitness était remontée à son niveau maximum. Cependant des routines de bas niveau forçaient ensuite ce robot à retourner à la périphérie, d'où il devait à nouveau rejoindre la lumière. Tout au long de ce parcours, le robot perdait des points de fitness et ce d'autant plus que le temps mis pour rejoindre la lumière était plus long. La trajectoire suivie par le robot dépendait d'un réseau de neurones à architecture fixe dont les poids étaient soumis à évolution. Dans ces conditions, lorsqu'un robot s'approchait d'un autre, il pouvait, grâce à un dispositif de communication à infra-rouges additionnel,

lui transmettre l'un de ses gènes avec une probabilité d'autant plus élevée que sa fitness était plus grande. Ce gène - c'est-à-dire la description codée d'un poids dans le réseau de neurones du « donneur » - remplaçait alors le gène équivalent du robot « accepteur » et changeait en conséquence son contrôleur neuronal et, donc, son comportement. Au sortir de cette « reproduction », la fitness du robot donneur était diminuée d'une quantité fixe, tandis que celle du robot accepteur n'était pas modifiée.

Ainsi, une telle expérience simulait un écosystème artificiel dans lequel ni la fitness des robots, ni leur chance de se reproduire avec tel partenaire plutôt qu'avec tel autre, n'étaient déterminés à l'avance par l'expérimentateur. Néanmoins, des contrôleurs neuronaux plus performants que ceux qu'un humain avait été capable de concevoir - c'est-à-dire des contrôleurs assurant à l'ensemble de la population un taux moyen de rencontres avec la source lumineuse plus élevé - ont ainsi été obtenus.

Des robots plus sophistiqués ont été utilisés dans d'autres expériences de robotique évolutionniste. Ainsi, il s'est avéré possible de faire évoluer les paramètres de contrôle du module de locomotion du chien Aibo [17]. Au lieu de procéder d'abord par simulation puis sur le robot réel, les évolutions correspondantes ont été conduites directement sur le robot. Celui-ci perdait donc souvent l'équilibre au cours de ces expériences - surtout lorsque des contrôleurs de premières générations étaient testés. Il s'en est suivi un coût de maintenance élevé : en une journée d'expérience, la carte du microprocesseur a été changée deux fois, le cou du robot a été réparé trois fois et ses pieds ont été remplacés une douzaine de fois. Néanmoins, des contrôleurs de la marche au pas ou des contrôleurs du trot ont été ainsi obtenus de façon automatique, contrôleurs qui se sont avérés plus performants que ceux que les ingénieurs humains avaient conçus, parce qu'ils permettaient au robot de parcourir une plus grande distance en un temps donné.

De même, dans le cas d'Elvis - un robot humanoïde de 60 cm de haut - c'est le code-machine de son programme de contrôle qui a été directement soumis à évolution [25]. Un programme servant à coordonner sa vision stéréoscopique et les mouvements de ses membres pour pointer du doigt une source lumineuse a été ainsi généré automatiquement. Des recherches en cours visent à produire de la même façon un contrôleur de locomotion qui puisse notamment permettre à Elvis de rejoindre une station de recharge lorsque ses batteries s'épuisent. A plus long terme, l'objectif est de faire évoluer un contrôleur permettant à ce robot de communiquer verbalement avec un humain.

2.2 Evolution de la morphologie et du comportement

D'autres chercheurs ont fait évoluer à la fois la morphologie et le contrôle d'un robot. Ainsi, une série d'expériences a porté sur un robot-portique équipé d'un système visuel [13]. Le problème à résoudre par le robot était de distinguer un triangle d'un rectangle affichés côte à côte sur un mur de façon à pouvoir rejoindre le premier tout en ignorant le second. Le génotype de ce robot codait à la fois la morphologie de son système visuel - en déterminant le nombre et la taille des champs récepteurs correspondants - et son contrôleur neuronal - en déterminant à la fois le nombre de neurones concernés et le détail de leurs interconnexions. Au sortir du processus évolutionniste, des individus performants ont été obtenus qui n'avaient besoin que de deux champs récepteurs pour distinguer les côtés verticaux du rectangle des côtés obliques du triangle. Cette information était ensuite exploitée par leur contrôleur neuronal pour diriger le robot vers le triangle.

Dans d'autres expériences, divers éléments de base ont été mis à la disposition du processus évolutionniste qui pouvait les agencer de façon à former des robots de forme et de complexité variables d'une génération à l'autre [26]. Des moteurs appropriés permettaient d'agir sur certaines articulations - et changer ainsi l'angle qu'un élément faisait avec un autre - ou de contracter la longueur d'un élément - à la façon d'un muscle - permettant ainsi de générer des mouvements et des déplacements. Dans ces conditions, il s'est avéré possible de faire évoluer en simulation à la fois la morphologie et le contrôle de robots capables de se déplacer sur la plus longue distance possible en un temps donné, puis de fabriquer les robots correspondants et de vérifier qu'ils étaient aussi performants dans la réalité qu'en simulation.

2.3 Co-évolution de deux espèces

D'autres applications de robotique évolutionniste mettent en œuvre des processus de *co-évolution* au cours desquels l'évolution d'une espèce peut dépendre de l'évolution simultanée d'une ou de plusieurs autres espèces.

Un tel processus de co-évolution a été, en particulier, mis en œuvre sur deux robots Khepera pour lesquels le premier joue le rôle d'une proie et le second celui d'un prédateur [8]. La proie est aveugle alors que le prédateur est équipé d'une caméra qui lui permet de détecter la proie à distance. En revanche, la proie se déplace plus vite que le prédateur. De plus, leurs senseurs à infra-rouges permettent aux robots de détecter à courte distance les obstacles fixes ou mobiles dans l'environnement, tandis que des capteurs de contact additionnels permettent de déterminer à quel moment le prédateur a « capturé » la proie. Le problème à résoudre est de sélectionner à la fois

une proie qui échappe le plus longtemps possible à la capture et un prédateur qui attrape le plus vite possible la proie.

Ce résultat a été obtenu en codant dans le génotype des robots les poids de réseaux de neurones à architecture prédéterminée reliant les senseurs de chaque robot à ses moteurs. Au cours d'une telle expérience, il arrive que le processus évolutionniste s'organise en périodes successives, pendant lesquelles différentes stratégies de poursuite-évasion peuvent être clairement identifiées. Ainsi, durant quelques générations, des prédateurs qui poursuivent directement les proies peuvent apparaître. Cependant, comme ces proies apprennent à fuir dans la direction opposée aux prédateurs, il arrive un moment où le recours à une nouvelle stratégie de chasse s'impose. Ainsi, voit-on apparaître de nouvelles générations de prédateurs qui ne poursuivent plus la proie mais observent ses déplacements et se décident à fondre sur leur victime sitôt que, pour éviter un obstacle par exemple, elle se dirige temporairement vers le prédateur et n'a plus le temps alors de lui échapper. Plus tard au cours de la co-évolution, il se peut que, la stratégie des proies ayant changé, les prédateurs se remettent à les poursuivre directement parce que c'est le comportement le plus efficace. En retour, les proies peuvent se mettre à fuir le prédateur en ligne droite et le cycle d'évolution précédemment décrit peut se renouveler indéfiniment. Dans une telle expérience, les fitness des deux espèces évoluent donc de façon cyclique. En revanche, dans d'autres conditions d'expérience, un processus de « course aux armements » s'installe et force les fitness à croître régulièrement.

2.4 Evolution et Développement

Alors que, dans les expériences précédemment décrites, le génotype d'un individu codait directement son phénotype, il se trouve que, dans la nature, ce codage est indirect et que la transformation d'un génotype en un phénotype s'opère au cours d'un processus de *développement* plus ou moins long et complexe. Au cours d'un tel processus, la possibilité est laissée à l'environnement d'influer sur l'organisation finale du phénotype. On peut ainsi concevoir que des connexions puissent apparaître ou disparaître au sein d'un système nerveux en développement - ce qui permet de compléter les ajustements découverts par l'évolution - selon le type de comportement que ces connexions génèrent et selon la nature des interactions avec l'environnement qui s'ensuivent. Un autre avantage apporté par un processus de développement intercalé entre le génotype et le phénotype est de permettre de limiter la quantité d'information que doit contenir le génotype et donc de limiter la taille de l'espace de recherche exploré par l'algorithme évolutionniste. Il est ainsi possible qu'un génotype relativement simple code, et permette donc de

découvrir, une morphologie et un système de contrôle très complexes [22].

En particulier, l'évolution des comportements de divers robots qui roulent, marchent, nagent ou volent a pu être réalisée grâce au codage dans le génotype de ces robots des règles de développement de leur système nerveux [30]. Ces règles de développement sont décrites dans un programme arborescent dont les instructions peuvent avoir pour fonction de créer ou de supprimer un neurone, de connecter ce neurone à un autre neurone, ou encore de changer les paramètres de son fonctionnement interne. Un tel programme est exécuté par un certain nombre de neurones initialement disposées par l'expérimentateur dans un substrat de développement donné, puis par tous les nouveaux neurones créés au cours de l'exécution de ce programme. Au final, un réseau comprenant plus ou moins de neurones, plus ou moins richement interconnectés, est ainsi généré.

La mise en œuvre de cette logique a, par exemple, permis de produire, en deux d'étapes successives, des contrôleurs neuronaux de la locomotion et de l'évitement d'obstacle chez un robot à 6 pattes. La découverte de chaque comportement était encouragée par une fitness appropriée et par l'utilisation de senseurs adaptés. Ainsi, au cours d'une première étape où la fitness du robot était mesurée par la distance parcourue en un temps donné, un réseau de neurones coordonnant le mouvement des pattes a été généré et a permis au robot de se déplacer en ligne droite selon un rythme de marche tripode

Au cours d'une deuxième étape, un autre réseau de neurones a été généré, permettant au robot d'éviter les obstacles rencontrés le long de sa trajectoire. Ce deuxième réseau était susceptible de se connecter au premier et d'utiliser des senseurs détectant le contact d'une des deux antennes du robot avec un obstacle. La fitness correspondante augmentait à mesure que le robot se déplaçait, mais elle était figée à sa valeur courante dès l'instant où un obstacle était heurté [7]. En simulation, un comportement supplémentaire - la poursuite d'une source odorante - a été obtenu en développant un troisième réseau de neurones interférant avec les deux autres [23]. De telles capacités ont été produites automatiquement en une nuit de calculs, alors que la conception "à la main" de contrôleurs neuronaux permettant à un insecte artificiel d'exhiber les mêmes comportements a pris le temps, et fait l'objet, d'une thèse entière [2].

2.5 Le hardware évolutionniste

Plutôt que de faire évoluer des programmes de contrôle dont l'exécution sur ordinateur ou sur microcontrôleur est coûteuse en temps, de nombreux chercheurs préfèrent recourir aux techniques du *hardware évolutionniste* [15][21][35][42] et à l'usage de FPGAs. Dans la mesure, en effet, où les interconnexions d'un FPGA peuvent être sélectionnées par un algorithme évolutionniste, un génotype peut être directement décodé en un circuit

électronique implémentant, par exemple, un réseau de neurones et ce réseau peut contrôler un robot sans devoir être simulé par un programme informatique.

C'est ainsi qu'un robot contrôlé par FPGA apprend au cours de générations successives comment poursuivre un objet coloré repérable par sa caméra, tout en évitant les obstacles détectés en route par ses senseurs à infra-rouges [21].

En revanche, un projet de hardware évolutionniste extrêmement ambitieux - initialement conçu en 1994 dans le laboratoire d'ATT à Kyoto, repris par le Starlab de Bruxelles en 2000, puis par l'Université de l'Utah en 2001 - a jusqu'ici totalement échoué. Il s'agit de faire évoluer le système nerveux de Robokoneko - un robot-chaton d'environ 3 à 4 Kilos - en vue de lui faire exhiber des comportements réalistes de jeune chat, tels que jouer avec un bouchon, miauler pour attirer l'attention, ronronner lorsqu'on le caresse, etc. [9].

3. Les limites de l'approche

Les difficultés de ce projet posent la question de savoir à quel degré de complexité, dans les problèmes ou dans leurs solutions, les approches évolutionnistes vont permettre de s'attaquer avec succès. A ce jour, les comportements qu'il a été possible de faire évoluer ne mettent en jeu que de simples réflexes destinés essentiellement à permettre à des robots de se déplacer, d'éviter des obstacles ou de poursuivre un objet. A notre connaissance, les problèmes les plus complexes qui ont été ainsi résolus concernent la mise au point de contrôleurs neuronaux pour animats volants simulés [5][6], lesquels sont susceptibles d'utiliser un nombre élevé de senseurs et d'actionneurs. C'est ainsi que des contrôleurs utilisant des capteurs de roulis, de tangage, de lacet et d'altitude ont pu maintenir un dirigeable lenticulaire ou un hélicoptère à la verticale d'un point-cible donné, et ce en dépit de vents constamment changeants. Dans de telles expériences, le dirigeable était équipé de 5 senseurs et 7 moteurs, l'hélicoptère de 6 senseurs et 4 commandes. Toutefois, l'obtention de contrôleurs performants n'a été possible que parce que des connaissances d'ingénieur ont servi à initialiser les génotypes initiaux en suggérant que tel senseur devait plutôt être connecté à tel actionneur. Si l'évolution pouvait éventuellement remettre en cause de tels patrons de connexion au fil des générations successives, la réduction de l'espace de recherche que le recours à de tels patrons a permis s'est néanmoins avérée indispensable à la découverte de contrôleurs performants.

Dans ces conditions, il est clair que sitôt que la robotique évolutionniste s'attaquera à des comportements plus élaborés que des simples réflexes - tels que des comportements impliquant, par exemple, la gestion de cartes cognitives pour la navigation ou la gestion de

systèmes motivationnels permettant de coordonner plusieurs comportements élémentaires - de nombreux problèmes conceptuels, méthodologiques et techniques ne tarderont pas à se poser. En revanche, à ce jour, le temps qu'il faudra pour les résoudre est parfaitement imprévisible.

Références

- [1] Ashby, R. *Design for a brain*. Chapman & Hall. 1952.
- [2] Beer, R. *Intelligence as Adaptive Behavior. An Experiment in Computational Neuroethology*. Academic Press. 1990.
- [3] Cliff, D., Husbands, P., Meyer, J.A. & Wilson, S.W. (Eds). *From Animals to Animats 3: Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 1994.
- [4] Colombetti, M. and Dorigo, M. *Learning to Control An Autonomous Robot By Distributed Genetic Algorithms*. In Meyer, Roitblat and Wilson (Eds.). *From Animals to Animats 2*. The MIT Press/Bradford Book. 1993.
- [5] Doncieux, S. *Evolution de contrôleurs neuronaux pour animats volants: méthodologie et applications*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. 2003.
- [6] Doncieux, S. and Meyer, J.-A. *Evolving Neural Networks for the Control of a Lenticular Blimp*. In Raidl et al. (Eds). *Applications of Evolutionary Computing*. pp 626-637. Springer Verlag. 2003.
- [7] Filliat, D., Kodjabachian, J. and Meyer, J.A. Evolution of Neural Controllers for Locomotion and Obstacle-Avoidance in a 6-Legged Robot. *Connection Science*. 11, 223-240. 1999.
- [8] Floreano, D., Nolfi, S. and Mondada, F. *Competitive Co-Evolutionary Robotics: from Theory to Practice*. In Pfeiffer et al. (Eds.). *From Animals to Animats 5*. The MIT Press. 1998.
- [9] de Garis, H. An artificial brain : ATR's CAM-Brain project aims to build/evolve an artificial brain with a million neural net modules inside a trillion cell cellular automata machine. *New Generation Computing Journal*. 12, 2, 215-221. 1994.
- [10] Goldberg, D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley. 1989.
- [11] Gomi (Ed.). *Evolutionary Robotics. From Intelligent Robots to Artificial Life. Vol. I et II*. AAI Books. 1998.
- [12] Gomi, T. and Ide, K. *Emergence of gaits of a legged Robot by Collaboration through Evolution*. Proceedings of the International Symposium on Artificial Life and Robotics. Springer Verlag. 1997.
- [13] Harvey, I., Husbands, P. and Cliff, D. *Seeing the Light: Artificial Evolution, Real Vision*. In Cliff et al. (Eds.). *From Animals to Animats 3*. The MIT Press. 1994.
- [14] Hallam, B., Floreano, D., Hallam, J., Hayes, G. and Meyer, J.A. *From Animals to Animats 7. Proceedings of*

- the *Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 2002.
- [15] Higuchi, T., Iwata, M. and Liu, W. (Eds). *Evolvable Systems: From Biology to Hardware*. Springer Verlag. 1997.
- [16] Holland, J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press. 1975.
- [17] Hornby, G.S., Fujita, M., Takamura, S., Yamamoto, T. and Haganata, O. *Autonomous Evolution of Gaits with the Sony Quadruped Robot*. In Banzhaf et al. (Eds.). Proceedings of GECCO99. Morgan Kaufmann. 1999.
- [18] Husbands, P. and Meyer, J.A. (Eds). *Proceedings of The First European Workshop on Evolutionary Robotics - EvoRobot98*. Springer Verlag. 1998.
- [19] Ijspeert, A.J. and Kodjabachian, J. Evolution and development of a central pattern generator for the swimming of a lamprey. *Artificial Life*. 5, 3, 247-269. 1999.
- [20] Jakobi, N. Evolutionary Robotics and the Radical Envelope of Noise Hypothesis. *Adaptive Behavior*. 6,1, 131-174. 1997.
- [21] Keymeulen, D., Iwata, M., Konaka, K., Suzuki, R., Kuniyoshi, Y. and Higuchi, T. *Off-Line Model-Free and On-Line Model-Based Evolution for Tracking Navigation Using Evolvable Hardware*. In Husbands and Meyer (Eds.). Evolutionary Robotics. Springer Verlag. 1998.
- [22] Kodjabachian, J. and Meyer, J.A. Evolution and development of control architectures in animats. *Robotics and Autonomous Systems*. 16, 161-182. 1995.
- [23] Kodjabachian, J. and Meyer, J.A. Evolution and Development of Neural Controllers for Locomotion, Gradient-Following, and Obstacle-Avoidance in Artificial Insects. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 9, 796-812. 1998.
- [24] Koza, J. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. The MIT Press. 1992.
- [25] Langdon, W.B. and Nordin, P. *Evolving Hand-Eye Coordination for a Humanoid Robot with Machine Code Programming*. In Miller et al. (Eds.). EuroGP'2001 Proceedings. Springer Verlag. 2001.
- [26] Lipson, H. and Pollack, J.B. Automatic Design and Manufacture of Robotic Lifeforms. *Nature*. 406, 974-978. 2000.
- [27] Maes, P., Mataric, M., Meyer, J.A., Pollack, J. & Wilson, S.W. (Eds). *From Animals to Animats 4: Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 1996.
- [28] Meyer, J.A. *Evolutionary Approaches to Neural Control in Mobile Robots*. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE Press. 1998.
- [29] Meyer, J.A., Berthoz, A., Floreano, D., Roitblat, H. and Wilson, S.W. (Eds). *From Animals to Animats 6. Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 2000.
- [30] Meyer, J.-A., Doncieux, S., Filliat, D. and Guillot, A. *Evolutionary Approaches to Neural Control of Rolling, Walking, Swimming and Flying Animats or Robots*. In Duro, R.J., Santos, J. and Graña, M. (Eds). Biologically Inspired Robot Behavior Engineering. pp 1-43. Springer Verlag. 2002.
- [31] Meyer, J.A., Husbands, P. and Harvey, I. *Evolutionary Robotics: A Survey of Applications and Problems*. In Husbands and Meyer (Eds). Proceedings of The First European Workshop on Evolutionary Robotics - EvoRobot'98. Springer Verlag. 1998.
- [32] Meyer, J.A., Roitblat, H.L. & Wilson, S.W. (Eds). *From Animals to Animats 2. Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 1993.
- [33] Meyer, J.A. & Wilson, S.W. (Eds). *From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 1991.
- [34] Mondada, F., Franzi, E. and lenne, P. *Mobile robot miniaturization: A tool for investigations in control algorithms*. Proceedings of the Third International Symposium on Experimental Robotics, Tokyo. 1993.
- [35] Naito, T., Odagiri, R., Matsunaga, Y., Tanifuji, M. and Murase, K. *Genetic Evolution of a Logic Circuit Which Controls an Autonomous Mobile Robot*. In Higuchi, Iwata and Liu (Eds.). Evolvable Systems: From Biology to Hardware. Springer Verlag. 1997.
- [36] Nolfi, S. and Floreano, D. *Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence, and Technology of self-Organizing Machines*. The MIT Press/Bradford Books. 2000.
- [37] Nordin, P. and Banzhaf, W. An On-Line Method to Evolve Behavior and to Control a Miniature Robot in Real Time with Genetic Programming. *Adaptive Behavior*, 5, 2, 107-140. 1996.
- [38] Ostergård, E.H. *Evolving Complex Robot Behaviour*. Master's Thesis. Department of Computer Science. University of Aarhus. 2000.
- [39] Pfeifer, R., Blumberg, B., Meyer, J.A. & Wilson, S.W. (Eds). *From Animals to Animats 5: Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books. 1998.
- [40] Raidl et al. (Eds). *Applications of Evolutionary Computing*. Springer Verlag. 2003.
- [41] Schwefel, H.P. *Evolution and Optimum Seeking*. Wiley. 1995.
- [42] Thompson, A. *Artificial Evolution in the Physical World*. In Gomi (Ed.). Evolutionary Robotics. From Intelligent Robots to Artificial Life (ER'97). AAI Books. 1997.
- [43] Watson, R.A., Ficici, S.G. and Pollack, J.B. *Embodied Evolution: Embodying an Evolutionary Algorithm in a population of Robots*. In Angeline et al. (Eds.). 1999 Congress on Evolutionary Computation. IEEE Press. 1999.

Comportement et cognition : ce que nous apprend un mini cerveau

Martin Giurfa

Centre de Recherches sur la Cognition Animale, Université Paul-Sabatier - CNRS, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 4, France

Les insectes ont été considérés habituellement comme de simples petites machines à réflexes. D'après cette vision particulière, leur comportement serait essentiellement gouverné par des réactions stéréotypées, laissant peu de place à des phénomènes de plasticité. Cette vision, qui exclut donc la possibilité de s'attaquer à des problématiques liées à la cognition animale sur les insectes, a inspiré un nombre important de travaux en robotique. Elle ignore, cependant, que les insectes, comme la plupart des animaux, traitent des informations de leur environnement de façon adaptative et flexible, ce qui leur permet de répondre à un environnement changeant. Elle ignore aussi le succès évolutif remarquable des insectes, succès qui leur a permis de pénétrer et conquérir pratiquement tous les habitats disponibles de la planète, et de surpasser tous les autres organismes multicellulaires en nombre absolu et en nombre d'espèces. Ces faits suggèrent que le cerveau de l'insecte doit être capable de fournir de solutions 'intelligentes' à une vaste gamme de problèmes écologiques afin d'assurer un tel succès. Ces problèmes sont similaires ou identiques à ceux auxquels d'autres vertébrés, les Humains parmi ces derniers, doivent se confronter dans leurs environnements respectifs.

Ainsi, il est pertinent de se demander jusqu'à quel point les insectes sont uniquement capables de comportements rigides et de formes simples d'apprentissage, et si des niveaux additionnels de complexité cognitive impliquant des formes non-élémentaires d'apprentissage doivent être admis afin d'expliquer la richesse comportementale observée chez les insectes. En clair, comme chez la plupart des animaux, nous trouverons chez l'abeille des apprentissages de type élémentaire, c'est-à-dire des simples associations liant deux stimuli spécifiques (par exemple, un stimulus neutre et un renforçateur) ou une réponse et un renforçateur. Par leur spécificité même, ces associations sont limitées et ne permettent pas de gérer des situations dans lesquelles l'animal est confronté à de nouveaux stimuli. Nous nous demandons donc si le comportement plastique observé chez l'abeille peut être expliqué exclusivement en termes d'associations élémentaires ou si un niveau de complexité supérieur doit être admis afin de l'expliquer.

Dans ce chapitre, nous essayons de répondre à cette question à partir des études réalisées sur un modèle

insecte, celui de l'abeille *Apis mellifera*. Ce modèle paraît particulièrement approprié pour ce type de problématique car il combine une richesse comportementale remarquable avec un système nerveux relativement simple et accessible à partir de nouvelles techniques permettant de mesurer l'activité du cerveau *in vivo* et pendant l'apprentissage.

Le comportement de l'abeille dans un contexte naturel

La richesse comportementale de l'abeille (von Frisch 1967) justifie l'emploi de ce modèle dans les études sur les capacités cognitives des insectes. L'abeille vit en société et ne peut pas survivre longtemps en absence des autres membres de la ruche. Malgré sa petite taille, elle est capable de naviguer efficacement jusqu'à une dizaine de kilomètres entre la ruche et les sources de nourriture, les fleurs. Elle organise ses activités de butinage de nectar et/ou pollen suivant un travail 'à la chaîne' extrêmement rapide et efficace : elle visite et exploite successivement des fleurs appartenant toujours à la même espèce ; quand cette espèce n'offre plus de nectar ou de pollen, elle s'oriente vers une autre espèce. Ceci est le phénomène de 'constance florale'. Les capacités sensorielles et les performances motrices sont très développées. Les abeilles voient le monde en couleur, perçoivent et discriminent des formes et des patterns et sont capables de détecter les mouvements avec une résolution temporelle très haute. Leur sens de l'olfaction leur permet de distinguer un spectre important d'odeurs et leur perception mécanosensorielle est aussi extrêmement riche grâce à la présence de milliers de poils mécanosensoriels autour du corps de l'insecte et de propriocepteurs internes. Des comportements complexes peuvent avoir des bases innées (par exemple, la construction des cellules de la ruche) ou dépendre entièrement de l'expérience (par exemple, la manipulation effective de certaines structures florales dans le but d'extraire leur pollen et leur nectar). La sélection naturelle a souligné en particulier l'apprentissage d'informations spécifiques, caractéristiques des endroits intéressants, c'est-à-dire la ruche et les sources de nourriture. L'apprentissage de marques de terrain et d'informations célestes employées dans le contexte de la navigation (position azimutale du soleil, pattern de lumière polarisée dans le ciel) garantit le retour au nid et permet donc d'optimiser l'efficacité du butinage. Les abeilles communiquent la présence de sources de

nourriture autour de la ruche au travers de mouvements ritualisés de leur corps qui reçoivent le nom de ‘danse frétillante’, un système de communication qui transmet l’information sur la direction et la distance à laquelle se trouve la source de nourriture exploitée (von Frisch 1967). Les abeilles qui suivent la danse d’une butineuse dans le noir de la ruche et sur la surface verticale des cadres sur lesquels elles se situent, obtiennent des mouvements de la danseuse l’information nécessaire pour trouver la source de nourriture exploitée : la vitesse des mouvements les informe sur la distance et l’angle de la phase frétillante par rapport à la verticale les informe sur la direction de vol par rapport au soleil. Dans les conditions naturelles, plusieurs danses ont lieu en parallèle au sein de la colonie. Différents processus de prise de décisions aux niveaux individuel et collectif peuvent être activés et devenir efficaces à partir d’une connaissance partielle de toute la gamme d’options disponibles.

Le comportement de l’abeille dans un contexte expérimental

La compréhension et l’analyse des mécanismes sous-jacents à ces comportements complexes ont besoin d’une approche expérimentale dans laquelle les traits essentiels du comportement de l’abeille sont préservés, mais, en même temps, le nombre de variables est réduit considérablement. Différentes approches ont été développées dans cet esprit à partir des travaux pionniers de Karl von Frisch, qui fut le premier à établir le travail scientifique expérimental destiné à comprendre le comportement des abeilles (1967). Deux paradigmes essentiels peuvent être cités ici à cause de leur importance dans l’étude de différentes facettes de l’apprentissage chez l’abeille : 1) le conditionnement olfactif du réflexe d’extension du proboscis chez des abeilles immobilisées et 2) le conditionnement du vol de rapprochement des abeilles en libre vol à un stimulus visuel explicitement récompensé.

Le conditionnement olfactif du réflexe d’extension du proboscis

Des abeilles immobilisées peuvent être conditionnées à répondre à des stimuli olfactifs (Takeda 1961; Bittermann et al. 1983). Dans ce paradigme, chaque abeille est fixée dans un petit tube métallique de telle façon que seulement sa tête en sort. Le seul mouvement possible à l’insecte est donc celui des antennes et des pièces buccales (mandibules et proboscis). Les antennes des abeilles sont leurs organes chemosensoriels ; quand on touche les antennes d’une abeille affamée avec de la solution sucrée (par exemple avec un cure-dent imbibé de solution sucrée), elle étire son proboscis afin d’atteindre et lécher la solution sucrée (Fig. 1).

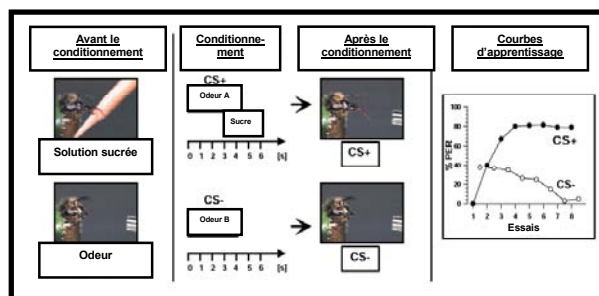


Figure 1. Conditionnement classique olfactif du réflexe d’extension du proboscis chez l’abeille. Quand les antennes d’une abeille affamée et immobilisée dans un tube de métal sont mises en contact d’une goutte de solution sucrée, l’insecte étire son proboscis et boit la solution. Les odeurs envoyées vers les antennes ne déclenchent pas cette réponse chez des animaux naïfs (à gauche : avant le conditionnement). Si, par contre, une odeur précède l’arrivée de solution sucrée (conditionnement de type forward), une association est créée qui permet à l’odeur de déclencher l’extension du proboscis (PER) dans les tests suivants. (au milieu). Les courbes d’acquisition (à droite) montrent une expérience de conditionnement différentiel avec deux odeurs ; une odeur est appariée à la solution sucrée (CS+) alors que l’autre odeur ne l’est jamais (CS-). Les essais C+ et C- sont intercalés. Les abeilles apprennent à répondre au CS+ et non pas au CS-.

Les odeurs envoyées vers les antennes ne déclenchent pas cette réponse chez des animaux naïfs. Si, par contre, une odeur précède l’arrivée de solution sucrée (conditionnement de type forward), une association est créée qui permet à l’odeur de déclencher l’extension du proboscis (PER) dans les tests suivants. Cet effet est clairement associatif et constitue un exemple de conditionnement classique (pavlovien) car la contingence apprise par l’abeille associe deux stimuli (Bittermann et al. 1983) : l’odeur, en tant que stimulus conditionnel (CS), et la solution sucrée, en tant que stimulus renforçateur ou inconditionnel (US).

Cette préparation offre un avantage supplémentaire au-delà de sa simplicité pour étudier l’apprentissage : elle permet d’étudier les bases physiologiques de l’apprentissage olfactif. Il est en effet possible de visualiser le cerveau de l’abeille immobilisée dans le tube de métal à partir d’une ouverture dans la cuticule de la capsule de la tête. Cette capsule est constituée de chitine et elle n’est pas innervée, la procédure n’étant donc pas invalidante pour l’animal qui apprendra de la même façon que des animaux non-opérés. Il est donc possible de visualiser l’activité du cerveau *in vivo* pendant que l’abeille apprend. Des corrélats physiologiques de différentes formes d’apprentissage olfactif peuvent être identifiées à différents niveaux, allant du moléculaire et du biochimique à des neurones spécifiques ou des ensembles neuronaux dont l’activité peut être rendue évidente grâce à des techniques d’imagerie.

Le conditionnement du vol de rapprochement des abeilles à un stimulus visuel explicitement récompensé
 Les abeilles en libre vol peuvent être conditionnées à des stimuli visuels tels que des couleurs, des formes et des patterns (von Frisch 1967). Dans ce paradigme, chaque abeille est individualisée (par exemple, avec des marques de couleur sur le thorax) et entraînée à voler vers l'endroit expérimental où elle est récompensée avec une goutte de solution sucrée à condition qu'elle se pose sur le stimulus visuel approprié. Les contingences établies dans ce contexte associent stimuli visuels (CS) et renforcement de solution sucrée (US), mais aussi la réponse de l'animal (voler vers, atterrir sur un objectif visuel) et le renforcement ; les abeilles apprennent ainsi qu'une information visuelle spécifique (la couleur, par exemple) est associée à une récompense de solution sucrée et qu'elles doivent se poser sur cette couleur afin d'obtenir la récompense.

Les études employant ce paradigme comportemental ont pu identifier les informations visuelles apprises par les abeilles. Les abeilles apprennent à associer toutes les couleurs de leur spectre visuel (de 300 nm à 650 nm) avec un renforcement, mais différents taux d'apprentissage sont observés pour différentes couleurs. Elles peuvent aussi apprendre à discriminer différentes formes, silhouettes et patterns visuels bien qu'un nombre d'essais d'apprentissage plus important soit nécessaire par rapport au cas de la couleur. Les abeilles sont capables de reconnaître des stimuli visuels à partir de leur position dans le champ visuel, leur orientation spatiale, leur géométrie, leur taille, leur fréquence spatiale, leur profondeur, leur contraste de mouvement et leur symétrie. Bien que pour des raisons évidentes il ne soit pas possible de réaliser des études physiologiques sur l'activité cérébrale d'un insecte en libre vol, ce paradigme a l'avantage d'exploiter la richesse comportementale associée au libre vol, richesse qui est diminuée quand l'animal se trouve immobilisé dans le paradigme du conditionnement olfactif du réflexe d'extension du proboscis.

Résolution de problèmes dans le contexte de la discrimination visuelle

Au-delà des simples associations entre couleur et récompense ou formes et récompense qui sont à la base de plusieurs discriminations visuelles, les abeilles sont capables de performances de discrimination visuelle qui leur permettent de répondre de façon adaptative à des stimuli qu'elles n'ont jamais vus préalablement. Ce comportement discriminatif repose sur la capacité de catégoriser des stimuli visuels.

La catégorisation de stimuli visuels est une tâche comportementale qui a été étudiée et démontrée essentiellement chez des vertébrés, en particulier, chez ceux caractérisés comme étant particulièrement aptes à résoudre des tâches d'apprentissage complexes (pigeons, dauphins, primates). Cependant, récemment il a été démontré que les abeilles sont aussi capables de

catégoriser des stimuli visuels. Typiquement, une expérience de catégorisation pose à un animal un problème de discrimination ou de choix de stimuli, dans lequel le renforcement n'est pas signalé par un stimulus unique, mais plutôt par une variété de stimuli partageant une ou plusieurs caractéristiques communes. L'animal doit être capable d'extraire les caractéristiques renforcées afin de pouvoir grouper les stimuli dans les catégories pertinentes. L'expérience doit aussi pouvoir montrer un transfert vers de nouvelles instances, c'est-à-dire, l'animal entraîné dans ce type de problème doit être capable de catégoriser des stimuli auxquels il n'a jamais été confronté si ceux-ci présentent les caractéristiques typiques de la catégorie renforcée. Il est donc évident que ce type de performance ne peut pas s'inscrire dans le cadre de simples associations élémentaires car celles-ci ne suffiraient pas à expliquer le transfert vers de nouveaux stimuli sur lesquels l'animal n'a pas une expérience explicite.

La catégorisation chez les abeilles a été bien étudiée dans le cas de la symétrie bilatérale. Il a été démontré que des abeilles entraînées avec une succession changeante de stimuli visuels de façon à renforcer les stimuli bilatéralement symétriques et non pas les asymétriques (ou vice versa) apprennent cette information abstraite (symétrie vs. asymétrie) et peuvent la transférer à de nouveaux stimuli symétriques et asymétriques qu'elles n'ont jamais vu (Giurfa et al. 1996). Les abeilles sont donc bien capables de catégoriser des stimuli visuels car elles regroupent des objets nouveaux dans des catégories bien définies résultant de leur entraînement. Le transfert vers de nouveaux stimuli qui étaient très différents des stimuli employés lors de l'entraînement, la présence ou non de symétrie mise à part, suggère qu'à un certain stade, des processus d'abstraction doivent avoir lieu dans le cerveau de l'abeille.

Une forme plus spectaculaire d'apprentissage non-élémentaire est mise en évidence dans des expériences dans lesquelles les abeilles sont entraînées suivant le schéma de la tâche appelée 'delayed matching-to-sample' (Giurfa et al. 2001). Dans cette expérience, un animal est typiquement confronté à un échantillon et ensuite à une série de stimuli parmi lesquels un est identique à l'échantillon. L'animal doit apprendre à choisir toujours le stimulus qui est identique à l'échantillon indépendamment des caractéristiques physiques particulières de l'échantillon qui, de plus, change régulièrement. L'animal doit donc apprendre la *règle* : "choisis toujours ce qu'on te montre en tant qu'échantillon indépendamment des propriétés particulières de l'échantillon".

Afin de déterminer si les abeilles peuvent apprendre un tel principe d'équivalence, elles sont entraînées avec un échantillon changeant et non-renforcé à l'entrée d'un labyrinthe en Y (l'échantillon peut être soit un disque de couleur bleue ou jaune, ou un disque avec des barres blanches et noires verticales ou horizontales) (Giurfa et al. 2001). Les abeilles

reçoivent une récompense de solution sucrée si et seulement si elles choisissent à l'intérieur du labyrinthe le stimulus qui correspond à l'échantillon vu à l'entrée. Les abeilles entraînées avec les couleurs jaune et bleue sont mises en présence de stimuli à barres verticales ou horizontales qu'elles n'ont jamais vus auparavant (Fig. 2). De même d'autres abeilles entraînées avec les stimuli à barres verticales ou horizontales sont mises en présence de disques de couleur jaune ou bleue qu'elles ne connaissent pas. Dans les deux cas, les abeilles ont choisi à l'intérieur du labyrinthe le stimulus correspondant à l'échantillon montré, bien qu'elles soient confrontées pour la première fois à ce type d'échantillon. Elles sont donc capables de résoudre l'expérience de 'delayed matching-to-sample' et de construire un principe d'équivalence qui va au-delà de stimuli spécifiques.

De la même façon, la capacité à établir un principe de différence a été aussi démontrée chez les abeilles (Giurfa et al. 2001). Dans ce cas, l'expérience employée est celle du 'delayed non-matching-to sample' où l'animal doit toujours choisir le stimulus contraire à l'échantillon qui lui est présenté. Les abeilles peuvent aussi résoudre ce type de problème, ce qui souligne leur capacité à produire des comportements sophistiqués au-delà de simples associations élémentaires.

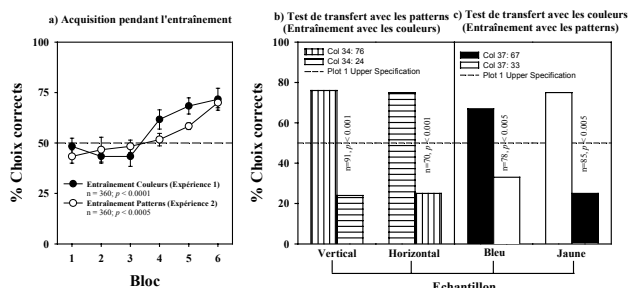


Figure 2: Les abeilles peuvent apprendre un principe d'équivalence. Performances d'acquisition et transfert d'abeilles dans une expérience de 'delayed matching-to-sample' dans laquelle elles sont entraînées avec des couleurs (Expérience 1) ou avec des patterns à raies blanches et noires, verticales ou horizontales (Expérience 2). a) *Acquisition* : les courbes montrent la performance d'acquisition groupée en blocs de dix visites consécutives au dispositif pour chaque expérience. (b,c) *Tests de transfert* : (b) Dans l'Expérience 1, les abeilles entraînées avec les couleurs ont été testées avec les patterns à raies blanches et noires. (c) Dans l'Expérience 2, les abeilles entraînées avec les patterns ont été testées avec les couleurs. Dans les deux cas, les abeilles choisissent le nouveau stimulus à l'intérieur du labyrinthe correspondant à l'échantillon présenté à l'entrée, bien qu'elles n'aient pas d'expérience explicite sur ces nouveaux stimuli. n : nombre de choix (Giurfa et al. 2001).

Le mini cerveau de l'abeille : design et architecture cognitive

La richesse et la sophistication comportementale mises en évidence chez l'abeille ont leur origine dans un

mini cerveau qui a un volume de 1 mm³ et qui contient 960 000 neurones (Fig. 3). La description de l'organisation neuronale de ce cerveau peut être simplifiée à partir de la reconnaissance de trois principes d'organisation fondamentaux :

- 1) *Neuropiles spécialisés*. Comme dans tout cerveau, des régions de tissu nerveux spécialisées (neuropiles) dans le traitement d'informations sensorielles spécifiques (vision, olfaction, etc.) seront facilement identifiables dans le cerveau de l'abeille.
- 2) *Neurones spécialisés*. Dans le cerveau de l'abeille, comme dans le cerveau d'autres insectes, il est possible d'identifier des neurones uniques qui peuvent être reconnus de façon récurrente d'une abeille à l'autre et dans la même abeille à cause de leur morphologie unique et de leur fonction unique dans des routines sensori-motrices définies. Ceci constitue une spécificité du cerveau de l'invertébré car une telle identification récurrente de plusieurs neurones individuels s'avère techniquement difficile dans le cas du vertébré.
- 3) *Centres d'intégration d'ordre supérieur*. Comme dans d'autres cerveaux, des centres où convergent plusieurs voies de traitement de l'information sensorielle peuvent être identifiés dans le cerveau de l'abeille. Ces structures constituent donc des centres d'intégration multimodale permettant d'associer divers stimuli lors de l'apprentissage et de la mémorisation. Ce qui les rend particulièrement intéressants, c'est la possibilité qu'ils offrent en tant que substrat pour des formes de plasticité non-élémentaire où se manifesterait, par exemple, le transfert entre modalités sensorielles différentes (voir ci-dessus).

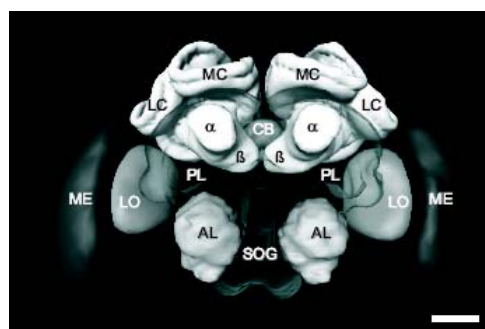


Figure 3. Reconstruction tridimensionnelle d'un cerveau d'abeille en vue frontale faite à partir de techniques de microscopie confocale. Plusieurs neuropiles y sont indiqués : ME : medulla; LO : lobula ; ME + LO + Lamina (non visible) constituent les lobes optiques, la région du cerveau où se fait le traitement primaire de l'information visuelle; AL : lobe antennaire, le neuropile olfactif primaire; PL : lobe protocérébral, un neuropile dont la fonction est mal connue ; SOG : ganglion subœsophagique, une région du cerveau liée aux entrées gustatives ; CB: une région du cerveau liée aux réponses motrices. Les deux structures proéminentes et symétriques qui occupent la partie centrale du cerveau sont les corps pédonculés ou corps en champignon. Chaque corps pédonculé consiste de deux subunités, les calices, latérale (LC) et médiane (MC). Les calices

constituent la région d'entrée des différentes voies sensorielles (vision, olfaction). Les lobes α et β constituent la région de sortie. Echelle = 200 μ m.

Différentes approches peuvent être employées pour étudier la cognition du mini cerveau de l'abeille à ces trois niveaux. Trois exemples sont donnés par la suite, un pour chaque niveau.

1) Neuropiles spécialisées : le cas du lobe antennaire

Les lobes antennaires sont les neuropiles olfactifs primaires dans le cerveau de l'abeille. Leur fonction est de traiter et coder l'information olfactive en provenance des récepteurs olfactifs sur les antennes (Fig. 4).

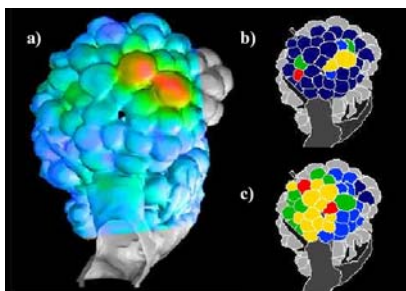


Figure 4. a) Le lobe antennaire est le neuropile olfactif primaire dans le cerveau de l'abeille. Deux lobes antennaires (un dans chaque hémisphère cérébral) peuvent être identifiés dans le cerveau de l'abeille. Les glomérules olfactifs sont les unités fonctionnelles du lobe antennaire. Ces glomérules constituent les régions de convergence des terminaisons dendritiques des récepteurs olfactifs et des neurones de projections vers des centres supérieurs. Des connexions latérales entre glomérules sont aussi assurées par des interneurons locaux. Chaque lobe antennaire est fait de 160 glomérules. L'imagerie calcique permet d'enregistrer les motifs spatiaux d'activation glomérulaire quand une odeur stimule l'antenne d'une abeille. Chaque odeur détermine un motif spatial d'activation glomérulaire spécifique. Les couleurs sont employées pour indiquer le niveau d'activation, rouge correspondant au maximum et bleu au minimum. b, c) Motifs d'activation correspondant au pentane et à la 2-heptanone, respectivement.

Le cerveau de l'abeille présente deux lobes antennaires (un par antenne ou hémisphère cérébral). Les lobes antennaires constituent l'équivalent du bulbe olfactif des mammifères; ces deux structures présentent des principes communs d'architecture et de fonctionnement. Les deux sont constituées de plusieurs glomérules (160 dans le cas du lobe antennaire). Dans le cas du lobe antennaire, les glomérules sont des structures globulaires qui constituent les régions de convergence des terminaisons dendritiques des récepteurs olfactifs qui se trouvent sur les antennes de l'abeille et des neurones de projections qui transfèrent l'information vers des centres supérieurs (les corps pédonculés et les lobes protocérébraux); des

connexions latérales entre glomérules sont assurées par des interneurons locaux (Galizia et Menzel 2000).

Afin d'étudier le codage olfactif au niveau du lobe antennaire, une combinaison d'études neuroanatomiques et d'imagerie cérébrale a été adoptée (Joerges et al. 1997). Les études de neuroanatomie ont permis d'établir une cartographie précise du lobe antennaire, ce qui permet d'identifier des glomérules individuels à partir de leur forme et position. Les études d'imagerie ont permis de comprendre comment se fait le codage et la représentation des odeurs au niveau du cerveau de l'abeille.

Le principe de base sous-jacent à l'imagerie calcique employée dans les études du lobe antennaire, est la libération de calcium par des cellules excitées. Ainsi, des produits fluorescents qui s'unissent au calcium ('calcium sensitive dyes') sont employés pour baigner le cerveau de l'abeille stimulée avec des odeurs choisies. Quand les neurones sont excités par la stimulation olfactive, ils libèrent du calcium qui s'unit aux produits fluorescents. Ceci détermine un changement de fluorescence, détectable à partir d'une camera CCD dirigée vers le lobe antennaire. De cette façon, il est possible de visualiser l'activité cérébrale pendant que l'insecte sent des odeurs. Ces études ont dévoilé les mécanismes de codage olfactif chez l'abeille naïve : chaque odeur est codée en termes d'un motif spatial d'activation glomérulaire (Fig. 4). Quand deux odeurs sont présentées dans un mélange, la représentation glomérulaire est similaire, mais non identique à la somme des représentations glomérulaires correspondant aux odeurs composantes individuelles. Au fur et à mesure que des composantes s'ajoutent au mélange, le motif spatial change et les interactions inhibitrices deviennent de plus en plus évidentes.

La méthode de l'imagerie calcique étant déjà établie dans le cas du lobe antennaire, la question à laquelle il faut répondre maintenant est celle du rôle de l'expérience dans la modification éventuelle des motifs d'activation glomérulaire. Comment l'apprentissage olfactif modifie-t-il les représentations neuronales des odeurs au niveau du lobe antennaire? Est-ce que différents types d'apprentissage olfactif renvoient à des représentations glomérulaires différentes pour une même odeur? Une première étude (Faber et al. 1999) a montré que l'apprentissage élémentaire différentiel (l'abeille doit apprendre à réagir à une odeur renforcée et à inhiber sa réaction à une odeur non-renforcée) détermine des changements qualitatifs mais non pas quantitatifs dans la représentation de l'odeur renforcée. Le motif d'activation glomérulaire reste donc le même pour l'odeur renforcée, seule l'intensité de l'activation augmente. On ne détecte pas de changements significatifs dans le cas de l'odeur non-renforcée.

2) Neurones spécialisés : le cas du neurone VUMmx1

VUMmx1 est un neurone identifiable dans le cerveau de l'abeille dont le nom correspond à sa localisation neuroanatomique (le nom correspond aux sigles de neurone 'ventral impair médian du neuromère maxillaire 1'). La structure de ce neurone est particulièrement remarquable : les dendrites de VUMmx1 forment des arborescences symétriques dans le cerveau et convergent avec le circuit olfactif à trois endroits : 1) les lobes antennaires, 2) les calices des corps pédonculés, et 3) le lobe protocérébral. La caractéristique principale de VUMmx1 est liée à son excitation chaque fois que les antennes ou le proboscis de l'abeille sont stimulés avec de la solution sucrée (Hammer 1993). Cette propriété permet de suggérer que l'activité de ce neurone représente le renforcement de solution sucrée dans le cerveau de l'abeille (Hammer 1993).

Afin de mettre à l'épreuve cette hypothèse, Hammer (1993) réalisa une expérience de conditionnement olfactif du réflexe d'extension du proboscis dans laquelle le renforcement de solution sucrée est remplacé par une activation artificielle du neurone VUMmx1, générée par injection intracellulaire de courant électrique. Dans cette expérience de conditionnement, la dépolarisation artificielle du neurone suit immédiatement la stimulation olfactive de façon à reproduire les caractéristiques temporelles de conditionnement de type 'forward', où le CS précède toujours le US. Il s'agit donc d'une expérience de conditionnement olfactif 'virtuel' : l'abeille immobilisée est stimulée avec une odeur suivie de l'activation artificielle du neurone. Cet appariement réalisé, on observe si l'odeur toute seule est capable de déclencher *a posteriori* l'extension du proboscis. Pour éviter des artefacts liés au mouvement du proboscis lui-même, celui-ci est coupé et la réponse mesurée en termes de l'activité du muscle M17, un muscle à la base du proboscis qui contrôle précisément son extension. Si l'activité du neurone représente effectivement le renforcement de solution sucrée, l'abeille doit apprendre à réagir à l'odeur dans cette expérience, même si elle n'a jamais reçu de renforcement spécifique. Ceci est effectivement le résultat trouvé. Les abeilles ne réagissent pas à l'odeur avant l'appariement, ce qui est logique car l'odeur est inconnue, mais montrent une réaction importante après l'appariement, c'est-à-dire, après le conditionnement virtuel (Hammer 1993). Leur réaction est identique à celle d'un groupe d'abeilles où le conditionnement est normal, c'est-à-dire où l'odeur a été appariée à la solution sucrée réelle. Ces résultats montrent donc que VUMmx1 constitue le corrélât neuronal du renforcement de solution sucrée dans le cerveau de l'abeille. C'est un neurone spécialisé dont la fonction est de servir de renforceur pour l'apprentissage olfactif associatif.

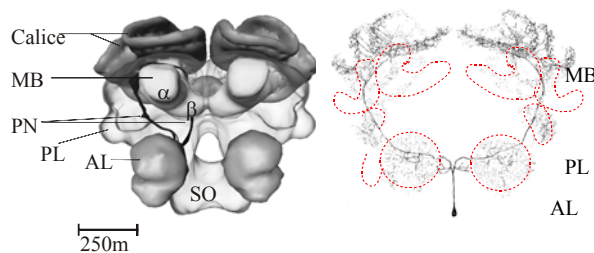


Figure 5. Un neurone unique, VUMmx1, représente le renforceur de solution sucrée dans le cerveau d'abeille. Le schéma à droite montre un cerveau d'abeille (sans les lobes optiques) avec le circuit olfactif. Le schéma à gauche représente à la même échelle la morphologie du neurone VUMmx1. Les dendrites de VUMmx1 forment des arborescences symétriquement dans le cerveau et convergent avec le circuit olfactif à trois endroits (délimités par une ligne pointillée rouge), les lobes antennaires (AL), les calices des corps pédonculés (MB), et le lobe protocérébral (PL). SO: ganglion subœsophagien ; PN : neurones de projection ; α et β : lobes des corps pédonculés. Le neurone répond à une stimulation des antennes et du proboscis avec de la solution sucrée.

Le cas de VUMmx1 illustre comment l'approche électrophysiologique permet de caractériser un neurone spécialisé. Cette approche a permis de caractériser de façon similaire d'autres neurones spécialisés.

3) Centres d'intégration d'ordre supérieur : le cas des corps pédonculés

Les corps pédonculés sont des structures centrales et proéminentes occupant près d'un tiers du cerveau de l'abeille (Fig. 3). Chaque corps pédonculé est constitué de 170 000 neurones densément regroupés, les cellules de Kenyon, et présente deux sous-unités fusionnées au niveau de leur base dans un pédoncule commun. Les calices constituent la région d'entrée des corps pédonculés ; on reconnaît un calice latéral et un calice médian. Chaque calice est divisé en trois compartiments : la région des lèvres, la région du collier et la région de l'anneau basal. Chacun de ces compartiments reçoit des afférences sensorielles spécifiques (lèvre : olfactives ; collier : visuelles ; anneau basal : olfactives). La région efférente des corps pédonculés est constituée par les lobes α et β qui résultent de la fusion des calices médian et latéral. Les neurones efférents répondent à plusieurs types de stimulation sensorielle et sont donc multimodaux. Ceci montre que les corps pédonculés sont des centres d'intégration sensorielle qui pourraient constituer un substrat idéal pour le transfert entre modalités et pour les formes non-élémentaires de l'apprentissage. Une nouvelle méthode permet à présent d'étudier le rôle des corps pédonculés dans différentes formes d'apprentissage et de mettre à l'épreuve cette hypothèse. Cette méthode consiste en la production d'abeilles adultes présentant des lésions spécifiques au niveau des corps pédonculés (Fig. 6). Ces lésions sont

obtenues à partir du traitement de larves du premier stade avec de l'hydroxyurée, une substance qui inhibe l'activité mitotique des cellules en division (neuroblastes) qui vont donner origine aux corps pédonculés (Malun 1998). L'hydroxyurée est donnée aux larves dans la gelée royale avec laquelle elles sont nourries pendant la période de division de ces neuroblastes. Les adultes qui résultent de ce traitement ne peuvent pas être différenciés extérieurement des abeilles normales. Cependant l'étude post conditionnement permettra de repérer des lésions partielles des corps pédonculés au niveau du cerveau de ces abeilles. Généralement, le traitement se traduit par l'ablation d'un ou deux calices médians.

Les abeilles traitées à l'hydroxyurée peuvent être étudiées dans des tâches d'apprentissage de complexité variable afin de déterminer l'importance des corps pédonculés dans la résolution de problèmes élémentaires et non-élémentaires. Jusqu'à présent, les résultats montrent que l'ablation partielle des corps pédonculés n'affecte pas la capacité de résolution de problèmes élémentaires impliquant une association simple entre un CS et un US. Ceci est valable pour des paradigmes d'apprentissage tactile (Scheiner et al. 2001) et pour le conditionnement olfactif différentiel (Malun et al. 2002). Le conditionnement avec une odeur renforcée et une odeur non-renforcée délivrées au niveau d'une antenne unique n'affecte pas la capacité d'apprendre à réagir (extension du proboscis) à l'odeur renforcée et non pas à l'odeur non-renforcée, même si l'antenne conditionnée correspond à l'hémisphère lésé du cerveau (Malun et al. 2002). Ces résultats montrent que les corps pédonculés ne sont pas nécessairement impliqués dans l'établissement d'associations élémentaires. Ces associations pourraient être établies préalablement au niveau des lobes antennaires.

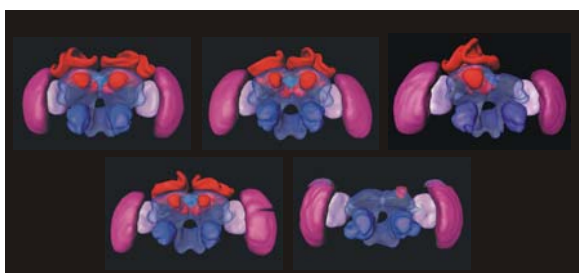


Figure 6: a- e) Reconstitutions tridimensionnelles de cerveaux d'abeilles traitées avec l'hydroxyurée en vue frontale. **a)** Cerveau d'abeille traitée à l'hydroxyurée ne présentant pas d'ablations ; le cerveau est identique à celui d'un individu normal (comparez avec la Fig.3). **b)** Lésion partielle unilatérale : le calice médian du côté gauche est absent alors que le calice latéral est intact . **c)** Lésion partielle unilatérale : les calices médian et latéral du côté droit ont disparu ; le côté gauche est intact. **d)** Lésion partielle bilatérale : les deux calices médians sont absents. **e)** Lésion totale : seulement un groupe réduit de cellules apparaît dans l'hémisphère droit ; calices et lobes sont absents. Les abeilles présentant cette lésion ont un taux de survie extrêmement bas et ne peuvent pas être employées dans des expériences de conditionnement.

Conclusion : mini cerveau et cognition

La combinaison d'études comportementales et neurobiologiques permet d'apprécier jusqu'à quel point la plasticité chez les abeilles surpasse des simples formes d'apprentissage élémentaire et de repérer les substrats neuronaux sous-jacents à ces capacités. La question soulevée dans ce chapitre était celle de la réduction éventuelle du comportement plastique de l'abeille à une collection de simples formes d'apprentissage qui se rassembleraient en tant que modules non connexes. Plusieurs exemples montrent qu'une telle réduction est erronée. Les abeilles sont capables de formes non-élémentaires d'apprentissage qui reproduisent les performances d'ordre cognitif supérieur connues chez les vertébrés, telles que l'apprentissage contextuel, la catégorisation visuelle et l'apprentissage de règles relationnelles (Menzel et Giurfa 2001). L'architecture cognitive de l'abeille consiste en un réseau complexe de modules interconnectés (neurones et neuropiles spécialisés, centres d'intégration d'ordre supérieur) assurant des comportements stéréotypés et flexibles. Dans ce réseau, des centres d'intégration centrale permettent la consultation, comparaison et dialogue croisé entre modules, ce qui permet le transfert de solutions d'une situation à une autre et donc la génération de nouvelles réponses. Le cerveau de l'abeille paraît être donc capable d'extraire la structure logique de son monde de façon très efficace. Quelles sont les limitations spécifiques de ce cerveau quand on le compare à des cerveaux vertébrés, et quelles sont les bases structurelles et fonctionnelles responsables de ces limitations ? Afin de répondre à cette question il est nécessaire d'étudier en profondeur les déficiences de l'apprentissage chez l'abeille, une aire d'études encore peu explorée.

Les études sur le comportement et la neurobiologie chez l'abeille permettent d'avoir une attitude optimiste face à ces questions. L'abeille peut servir de modèle pour la compréhension de niveaux intermédiaires de complexité cognitive et pour l'identification de leurs substrats neuronaux. Elle mérite donc un espace justifié dans le domaine des neurosciences cognitives. Le mini cerveau de l'abeille avec ses 960 000 neurones n'a pas encore dévoilé tout son potentiel. La convergence de nouvelles questions qui paraissaient impensables quelque temps avant et de nouvelles techniques de mesure permettant d'accéder à différents niveaux d'organisation neuronale, permet d'espérer que le mieux reste encore à être découvert.

References

- [1] Bitterman, M. E., Menzel, R., Fietz, A., et Schäfer, S. (1983) Classical conditioning of proboscis extension in honeybees (*Apis mellifera*). *Journal of Comparative Psychology* 97, 107-119.

- [2] Faber, T., Joerges, J., et Menzel, R. (1999) Associative learning modifies neural representations of odors in the insect brain. *Nature neuroscience* 2, 74-78.
- [3] Frisch, K. von (1967) *The Dance Language et Orientation of Bees*. Harvard University Press, Cambridge.
- [4] Galizia, C. G. et Menzel, R. (2000) Odour perception in honeybees: coding information in glomerular patterns. *Current Opinion in Neurobiology* 10, 504-510.
- [5] Giurfa, M., Eichmann, B., et Menzel, R. (1996) Symmetry perception in an insect. *Nature* 382, 458-461.
- [6] Giurfa, M., Zhang, S. W., Jennett, A., Menzel, R. et Srinivasan, M. V. (2001) The concepts of sameness et difference in an insect. *Nature* 410, 930-933.
- [7] Hammer, M. (1993) An identified neuron mediates the unconditioned stimulus in associative olfactory learning in honeybees. *Nature* 366, 59-63.
- [8] Joerges, J., Küttner, A., Galizia, C. G., et Menzel, R. (1997) Representation of odours et odour mixtures visualized in the honeybee brain. *Nature* 387, 285-288.
- [9] Malun, D. (1998) Early development of mushroom bodies in the brain of the honeybee *Apis mellifera* as revealed by BrdU incorporation et ablation experiments. *Learning et Memory* 5, 90-101
- [10] Malun, D., Giurfa, M., Galizia, G., Plath, N., Brandt, R., Gerber, B., Eisermann, B. (2002) Hydroxyurea-induced partial mushroom body ablation does not affect acquisition et retention of olfactory differential conditioning in honeybees. *Journal of Neurobiology* 53, 343-360.
- [11] Maelshagen, J. (1993) Neural correlates of olfactory learning in an identified neuron in the honey bee brain. *Journal of Neurophysiology* 69, 609-625.
- [12] Menzel, R. et Giurfa, M. (2001) The cognitive architecture of a mini brain : the honey bee. *Trends in Cognitive Sciences* 5:62-71
- [13] Takeda, K. (1961) Classical conditioned response in the honey bee. *Journal of Insect Physiology* 6, 168-179.

Session poster

- Etude et mise en convoi d'un véhicule urbain avec accrochage immatériel
Jonathan Bom (LASMEA/CNRS, Clermont Ferrand)
- Capteur de vision rapide `a partir d'un imageur CMOS
Pierre Chalimbaud, François Berry (LASMEA/CNRS, Clermont Ferrand)
- Planification de mouvements
N. Jouandaun (Laboratoire d'Intelligence Artificielle, Paris 8)
- Contrôle des mouvements d'un robot à l'aide d'une mémoire visuelle
Anthony Remazeilles, François Chaumette, Patrick Gros (IRISA, Rennes)
- Développement d'une interface haptique portable utilisant des couples gyroscopique
M.E.Brau, M. F.Gosselin (CEA/LIST/DTSI/SRSI/LPR Fontenay aux roses)
M. J.P. Lallemand (Laboratoire de Mécanique des Solides, Poitiers)
- Modélisation de la répétabilité des robots manipulateurs industriels par des ellipsoïdes stochastiques
Jean-François Brethé ,(GREAH, Le Havre)
- Système de gestion de flotte pour le transport CTS
Anjali Awasthi, Samra Benabid, Angel Talamona, Michel Parent (IMARA , INRIA Rocquencourt)
- R.O.S. : Un système d'exploitation robuste pour robot mobile
Nicolas Neveu (Equipe I.A.R.M., Paris 8, St Denis)
- Localisation en environnement dynamique
E. Seigneur, (IEF/CNRS, Université Paris XI, Orsay)
- Forceps Intelligent et Sécurisé
Ruimark Silveira (Laboratoire d'Automatique Industrielle INSA, Lyon)
- Premiers résultats expérimentaux suite à la conception d'un prototype de tête de coloscope
Guillaume Thomann (Laboratoire d'Automatique Industrielle INSA, Lyon)
- Navigation d'un robot mobile d'intérieur par vision artificielle
G. Blanc, Y. Mezouar, T. Château, P. Martinet , (LASMEA/CNRS, Clermont)

Etude et mise en convoi d'un véhicule urbain avec accrochage immatériel

Jonathan BOM

LASMEA

24, avenue des Landais
63177 AUBIERE Cedex
bom@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé

Le LASMEA (Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique et d'Automatique) est une unité mixte de recherche du secteur des Sciences Pour l'Ingénieur. Elle s'intègre en grande partie dans les recherches menées par l'université Blaise Pascal dans ce domaine d'activités.

L'un des deux groupes formant le LASMEA : le groupe GRAVIR (Groupe Automatique, Vision et Robotique), est engagé depuis plusieurs années sur des problématiques scientifiques liées à la perception visuelle et la commande dans le secteur de l'automobile. L'ensemble de ces actions est orienté très précisément vers l'augmentation de la sécurité des véhicules routiers.



FIG. 1 – Véhicule urbain électrique : le Cycab

Une des nouvelles approches dans cette vaste aventure, menée par le groupe GRAVIR, concerne la marche en convoi de plusieurs véhicules urbains électriques. De tels engins permettent, en convoi, une fluidité de la circulation en centre ville, une libre disposition à tout

endroit et tout moment ; et bien sûr, une automatisation totale de ces voitures urbaines autoriserait l'utilisateur à se concentrer sur d'autres tâches que la conduite.

De plus, ce type de convoi trouverait également des applications dans de nombreux milieux tels que l'industrie (gestion d'un ensemble de chariots), l'agriculture (conduite d'un convoi d'engins agricoles), les parcs d'attractions (mise à disposition d'un mode de déplacement flexible), et dans bien d'autres domaines encore.

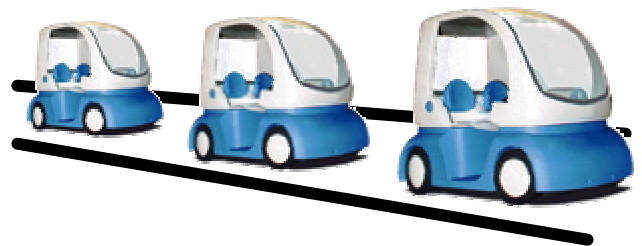


FIG. 2 – Illustration d'un convoi de trois véhicules

Ainsi, le but de mes recherches consiste, en premier lieu, à établir une modélisation décrivant la marche en convoi de véhicules. Actuellement, le modèle d'un véhicule, qui traîne un nombre indéfini de remorques, est connu. Le modèle à établir devrait permettre de représenter un convoi de véhicules où les liaisons entre les véhicules varieraient dans le temps et seraient contrôlées par des actionneurs spécifiques à chaque véhicule.

Cette modélisation effectuée, la commande du convoi sera abordée (d'abord en simulation, puis sur véhicules électriques).

Mots Clef

Convoi urbain, modélisation et commande d'un convoi.

Capteur de vision rapide à partir d'un imageur CMOS

Pierre Chalimbaud

François Berry

Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique et d'Automatique
Groupe Automatique et Vision pour la Robotique

24 avenue des landais - 63177 Aubiere cedex - FRANCE
chalimba@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé

Les travaux présentés dans ce papier, sont les premières phases dans la conception d'un capteur de vision. Le principe retenu consiste à utiliser les technologies FPGA et les nouveaux capteurs de vision CMOS, afin d'augmenter la vitesse d'acquisition sur de petites zones de l'image. De cette manière un tel système doit être capable de rétroagir sur lui-même de façon à optimiser les paramètres de la boucle de perception. Cette capacité permet, non seulement d'améliorer la perception, mais aussi de se focaliser uniquement sur les régions dites "intéressantes". De cette façon, on évite le goulot d'étranglement entre la caméra et le système de traitement qui est un problème classique en vision.

La notion de détecteur actif est proposée afin de formaliser notre approche. En guise d'illustration, un suivi rapide de zone texturée est proposé. Cette méthode est basée sur la corrélation d'un motif de référence avec une région d'intérêt centrée sur la cible. Suivant les dimensions du motif considéré, la fréquence de fonctionnement du dispositif de suivi varie entre 200 et 2000 acquisitions par secondes.

Mots Clef

Capteur de vision, imageur CMOS, vision active et suivi de motif.

1 Approche proposée

Des études récentes [4, 1, 3] ont été menées sur l'asservissement du dispositif de vision selon le concept de vision active sans considérer d'action mécanique sur le système. Dans ces travaux, l'objectif est d'intégrer le retour de l'information visuelle dans le capteur. L'essentiel du problème consiste à sélectionner des régions d'intérêt dans l'image afin de concentrer les ressources de calcul sur l'information utile. De ce fait, la notion d'étude locale est prédominante dans ce type de travaux.

En ce qui concerne notre approche, nous proposons d'inclure dans la boucle de vision les paramètres sensoriels en

introduisant la notion de détecteur actif. Un détecteur actif est une entité autonome constituée d'un ensemble de traitements associés à une zone d'intérêt sur l'imageur. La fonction de cette entité consiste à gérer et à faire évoluer, dans le temps, deux types de données : les caractéristiques de la zone d'intérêt sur l'imageur et un ensemble de traitements associés à cette région de l'image. L'objectif de ce détecteur est d'extraire une information locale et de déceler continuellement son évolution durant la perception. Par principe, la définition d'un détecteur actif est fixée par la tâche qui lui est confiée. Celle-ci doit conditionner d'un part les traitements locaux à effectuer, mais aussi les caractéristiques géométriques de sa fenêtre d'acquisition. Cette notion de détecteur actif, précédemment introduite dans [2] peut être considérée comme une macro-fonction visuelle destinée à réaliser une tâche locale. Une notion similaire a été proposée par S. Ullman en 1984 avec la notion de routine visuelle. Le concept de routine visuelle a été introduit pour la première fois par S.M. Kosslyn en 1973, mais la formalisation qui a permis sa mise œuvre, a été définie par S. Ullman [5]. L'idée principale est d'établir une collection de routines (Fig. 1) qui permettent de réaliser une large gamme d'opérations élémentaires de traitements d'images. L'objectif de cette approche est de faciliter l'élaboration de tâches spécifiques.

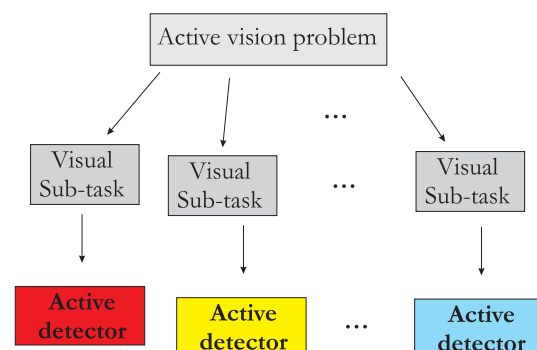


FIG. 1 – Décomposition en détecteurs actifs

La différence majeure avec nos travaux réside dans le fait qu'un détecteur actif associe un élément matériel (le capteur) et un élément logiciel (contrôle et algorithmes) alors que les routines visuelles manipulent seulement des éléments logiciels. De ce fait, il est essentiel de noter l'importance de l'adéquation (Fig. 2) entre le concept de détecteur actif et l'architecture matérielle. De plus, notre approche se restreint à la conception d'un capteur de vision. Nous considérons, donc, seulement qu'un système de vision bas-niveau intégré auprès de l'imageur.

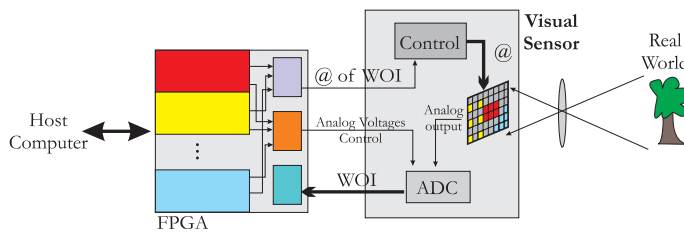


FIG. 2 – Synoptique générale du capteur

2 Résultats

Afin d'illustrer notre méthode, nous proposons un algorithme de suivi qui s'appuie sur une méthode de corrélation dans le domaine fréquentiel. Ce suivi est réalisé en asservissant une fenêtre d'acquisition sur une zone de niveau de gris pré-sélectionnée. Suivant cet objectif, le détecteur actif est constitué d'une zone d'intérêt adressée dynamiquement et d'un asservissement de sa position. Le schéma global de cet asservissement est décrit par la figure 3.

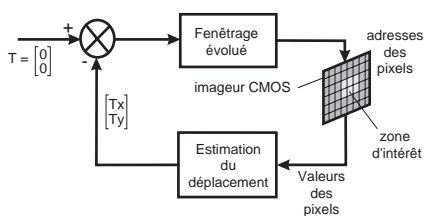


FIG. 3 – Schéma d'asservissement du détecteur actif

Les performances de la méthode précédente, nous avons introduit dans le mécanisme de suivi, une phase d'acquisition de l'image entière. Cette phase permet de visualiser la scène globale toutes les 720 ms (Fig. 4). Pour interpréter cette séquence, il faut noter, que durant le suivi, uniquement la zone repérée par le carré coloré est exploitée. Pour l'expérimentation de la figure 4, la taille de la fenêtre d'intérêt de 32×32 pixels permet d'obtenir un temps d'acquisition de $570 \mu s$ et un temps de cycle total de 1.8 ms (temps acquisition + temps de calcul). Les résultats obtenus pour divers tailles de fenêtres sont décrits dans le tableau suivant :

taille de la fenêtre	16x16	32x32	64x64	128x128
temps d'acquisition	200 μs	570 μs	2 ms	8 ms
temps de cycle	450 μs	1.8 ms	8.6 ms	78 ms
cadence de suivi	2220 f/s	550 f/s	117 f/s	12 f/s

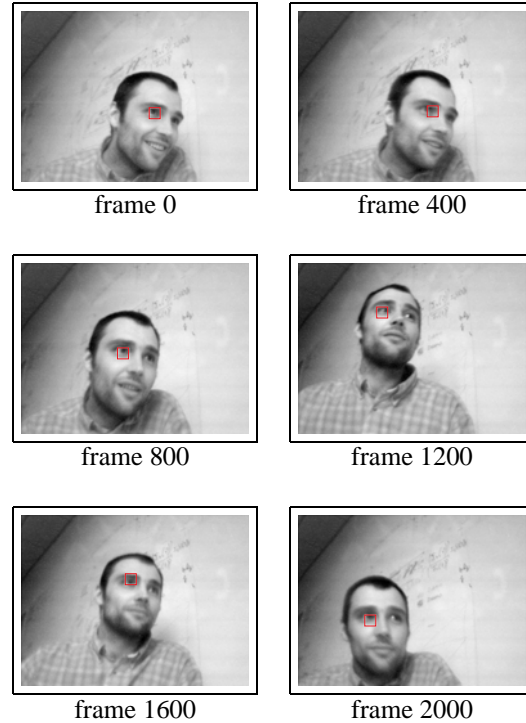


FIG. 4 – Suivi d'un motif de niveaux de gris de dimensions 32×32 pixels.

Ces résultats démontrent que la rapidité de réaction du dispositif est une propriété déterminante. Il est clair que cette approche est intéressante pour développer des systèmes de vision rapide.

Références

- [1] Brajovic V. and Kanade T. Sensory attention: Computational sensor paradigm for low-latency adaptive vision. *Image Understanding Workshop*, May 1997.
- [2] Chalimbaud P., Berry F. and Martinet P. The task "template tracking" in a sensor dedicated to active vision. In *IEEE - Computer Architectures for Machine Perception*, New Orleans, USA, May 2003.
- [3] Indiveri G., Mürer R. and Kramer J. Active vision using an analog vlsi model of selective attention. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and digital signal processing*, 48:492–500, May 2001.
- [4] Kato T. and Floreano D. An evolutionary active-vision system. In *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 2001.
- [5] Ullman S. Visual routines. *Cognition*, 18:97–160, 1984.

Planification de mouvements

N. Jouandeun@ai.univ-paris8.fr

Groupe IARM - Laboratoire d'Intelligence Artificielle - Université Paris 8

La planification de mouvements a pour objectif de trouver une trajectoire pour un mobile autonome dans un environnement statique ou dynamique. Nous proposons d'utiliser une méthode d'exploration aléatoire de l'espace (Rapidly exploring Random Tree) associée aux notions de visibilité, d'échantillonnage gaussien, de densité de l'espace. L'amélioration de cette méthode repose sur une dé-localisation des tirages aléatoires vers les régions étroites ou inexplorées au cours de l'exécution. L'association temps-réel des statistiques sur ces tirages contraint la gestion de la dynamique du mobile dans l'expression des propriétés topologiques de l'environnement. Les *RRT* réalisent des tirages aléatoires dans l'espace des configurations. Cet espace est défini à chaque instant par la géométrie obstacles (et donc à leur primitives de description). Nous proposons des primitives géométriques visant à contrôler l'évolution de l'échantillonnage aléatoire des *RRT*. Les figures 1 et 2 en présentent deux exemples simples. Le domaine de visibilité d'une configuration est définie par l'ensemble des segments et des sommets visibles à partir de cette configuration. Ces primitives géométriques sont associées au domaine de visibilité pour être insérées dans l'espace des tirages aléatoires du *RRT*. Le contrôle des éléments à mesure des itérations permet implicitement de réduire les tirages redondants et d'augmenter la couverture du graphe en direction de certaines régions. Les figures 3 à 8 sont le résultat de simulation de modèles dynamique à 9-dimensions de type voiture. L'intégration numérique des équations différentielles définissant le robot est approximée au 4ème ordre par la méthode de Runge-Kutta. La mise en correspondance de l'échantillonnage aléatoire et de la topologie de l'environnement est fondamentale pour le contrôle de l'expansion des *RRT*. L'utilisation de ces primitives guidées par des statistiques sur les noeuds du *RRT* permettent de diminuer le nombre d'itérations nécessaire à la résolution du problème.

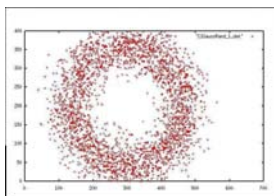


Figure 1: tirages aléatoires associés à un cercle.

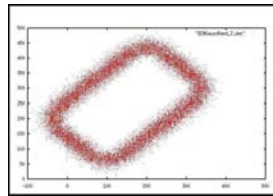


Figure 2: tirages aléatoires associés à un parallépipède.

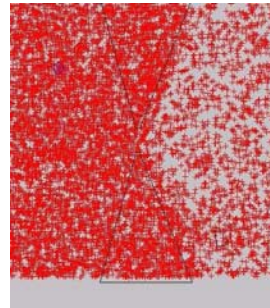


Figure 3: tirages-échec pour *RRT* standard.

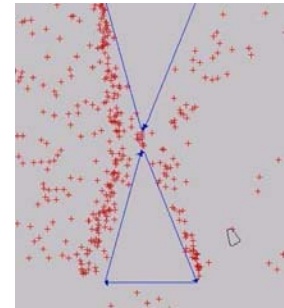


Figure 4: tirages-échec pour *RRT* gaussien.



Figure 5: graphe résultat du *RRT* standard.

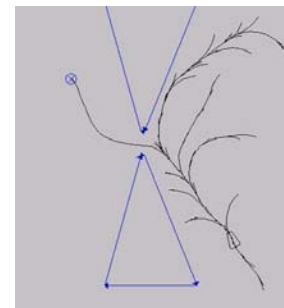


Figure 6: graphe résultat du *RRT* gaussien.

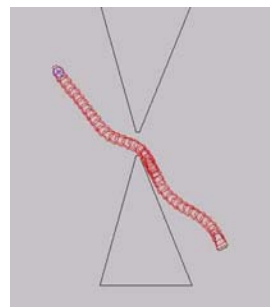


Figure 7: trajectoire du *RRT* standard.

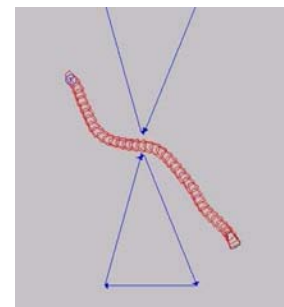


Figure 8: trajectoire du *RRT* gaussien.

Contrôle des mouvements d'un robot à l'aide d'une mémoire visuelle

Anthony Remazeilles

François Chaumette

Patrick Gros

IRISA, Campus de Beaulieu,
35042 Rennes Cedex, France
Prenom.Nom@irisa.fr

Résumé

Nous nous intéressons à la détermination des mouvements d'un robot en se basant sur les images fournies par une caméra embarquée. Cette problématique n'est pas récente, mais reste encore ouverte pour des environnements réels de taille significative. Nous proposons une technique qui ne nécessite pas de reconstruction 3d de l'environnement, sans pour autant limiter le type de mouvements que peut réaliser le robot. De plus nous avons opté pour un calcul des mouvements en ligne, afin de pouvoir dans nos prochains travaux prendre en compte des événements extérieurs imprévus survenant durant le déplacement.

Pour ce faire, nous utilisons une base d'images de l'environnement de navigation du robot. De cette base est automatiquement extraite une série d'images permettant de mettre en relation l'image initiale prise avant le déplacement, et l'image que doit obtenir la caméra une fois la position désirée atteinte. Ces images informent de plus sur le contenu visuel de la zone que doit traverser le robot durant son déplacement. La figure 1 présente un exemple d'une telle série d'images.



FIG. 1 – Images extraites de la base pour relier l'image initiale (a) et celle désirée (g)

Les mouvements du robot sont alors déterminés en ligne par une technique dérivée des fonctions de potentiel, en

ne s'appuyant que sur les points d'intérêt extraits de la série d'images. Elle consiste à déplacer la caméra pour faire rentrer dans son champ de vision les prochaines primitives d'intérêt définies sur le chemin. Cette méthodologie permet d'assurer une visibilité suffisante tout au long du déplacement, tout en évitant les minima locaux des fonctions de potentiel. Le déplacement réalisé est de plus indépendant des positions associées aux images de la série.

Ces travaux ont été validés par des expériences réalisées sur un robot cartésien à six degrés de liberté doté d'une caméra montée sur son effecteur. Pour illustration, la figure 2 présente la projection sur le plan image du centre optique de la caméra au cours du déplacement, pour la série d'images présentée ci-dessus. Cette méthode permet actuellement de réaliser des mouvements plans dans un environnement 2d; nous travaillons sur son extension pour des déplacements quelconques dans des scènes tridimensionnelles.

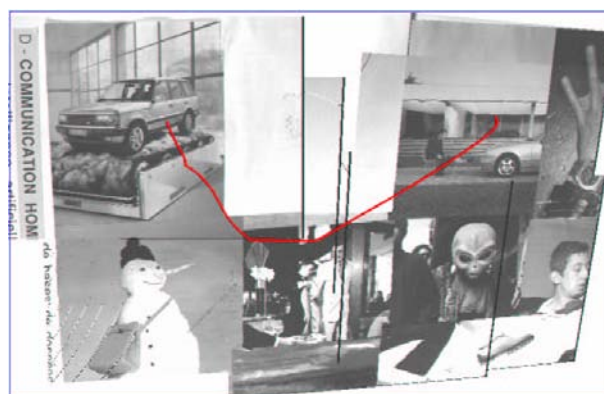


FIG. 2 – Trajectoire du point principal reprojété dans le premier plan image

Développement d'une interface haptique portable utilisant des couples gyroscopique

M. E. BRAU¹M. F. GOSSELIN¹M. J.P. LALLEMAND²¹CEA/LIST Fontenay aux roses²Laboratoire de Mécanique des Solides, Université de PoitiersCEA/LIST/DTSI/SRSI/LPR 18 Route du Panorama 92260 Fontenay aux roses
braue@zoe.cea.fr

Résumé

Dans le cadre de ma thèse, je m'intéresse à la conception d'une interface haptique portable. Dans cette optique, l'utilisation de couples gyroscopiques (comme sur l'interface « Gyro Haptic » [1] du VR LAB) ou inertiels (comme sur l'interface « Mobile Torque Display » [2] de l'université de Tsukuba) est tout à fait intéressante car elle permet de créer des efforts sans points d'application [3]. Dans un premier temps, j'effectuerai une analyse de l'interface « Gyro Haptic ». Je proposerai ensuite diverses solutions originales, inspirées de la littérature relative, notamment, au positionnement fin des satellites.

Mots Clef

Haptique, réalité virtuelle, couples gyroscopiques.

1 Introduction

Lorsque l'on cherche à concevoir une interface haptique portable, on peut boucler les efforts sur le corps de l'opérateur. Dans ce cas, des problèmes de fixation de l'interface et de positionnement du bouclage des efforts apparaissent. Pour éviter cela, on peut utiliser des efforts « sans points de contact » : ceux engendrés par exemple par les roues à inerties ou les systèmes gyroscopiques. Je m'intéresserai ici à ces derniers car ils permettent d'obtenir des couples plus importants à masse équivalente [1].

1.1 Travaux antérieurs

[3] E.BRAU : « Interfaces haptiques portables et robots collaboratifs : état de l'art », Document interne CEA, à paraître.

1.2 Références

[1] H.Yano, M.Yoshie, H.Iwata "Development of a non grounded Haptic Interface using the gyro effect" Proc of the 11th Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems, March 2003, L.A., USA, p1695-1980

[2] Y.Tanaka, S. Masataka et al. "Mobile Torque Display and Haptic Characteristics of the Human Palm", Proc. of ICAT 2001, Dec 2001, Tokyo, Japan .

2 Principe

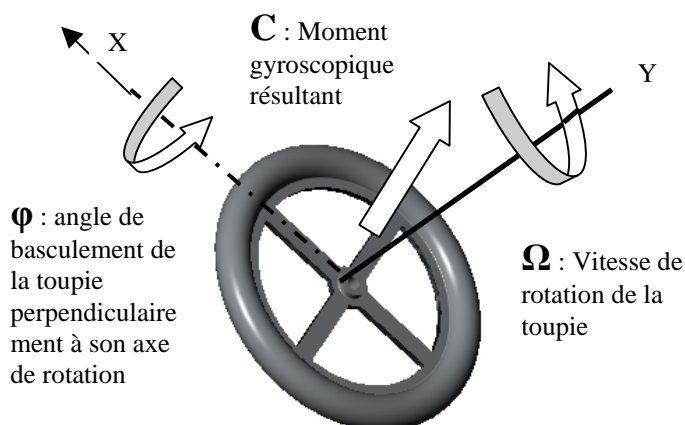


FIG. 1 – Figure de principe Moment gyroscopique

Lorsque l'on fait pivoter une toupie en rotation, on crée un couple, appelé couple gyroscopique, perpendiculaire aux deux rotations :

$$\vec{C}_{Gyr} = I \cdot \vec{\Omega}_{toupie/0} \otimes \vec{\phi}$$

3 Travail

Les systèmes gyroscopiques simples (type gyroscope à deux balances) ne permettent de générer que des moments de faible intensité (lorsque l'on veut garder une masse faible) pendant un temps relativement court. De plus, elles ne permettent pas de contrôler le moment indépendamment sur les trois axes.

Mon travail a donc consisté à proposer des architectures nouvelles à base de plusieurs toupies pour améliorer la contrôlabilité et augmenter les intensités des moments résultants ainsi que leur durée de fonctionnement.

Modélisation de la répétabilité des robots manipulateurs industriels par des ellipsoïdes stochastiques

Jean-François Brethé

GREAH, Université du Havre

GREAH, Université du Havre,
25 rue Ph. Lebon BP 540,
76058 Le Havre cedex, France,
brethe@univ-lehavre.fr

Mots Clef

répétabilité, ellipsoïdes stochastiques, robot manipulateur industriel

Résumé

Dans ce poster, je désire illustrer l'approche probabiliste des phénomènes de répétabilité pour les robots manipulateurs industriels. Le modèle théorique a été développé et exposé notamment aux JJCR16 à Lyon et à IROS 2002 à Lausanne.

Ce modèle envisage la répétabilité sous l'angle probabiliste et mène à la construction d'ellipsoïdes stochastiques qui viennent compléter la définition de la répétabilité de la norme ISO 9283 en apportant une connaissance plus fine de la répartition spatiale de l'erreur. Par la suite, la répétabilité peut être visualisée par une cartographie de l'espace de travail obtenue exclusivement à partir des paramètres géométriques du robot et de la sensibilité des capteurs.

Au niveau pratique, le modèle a été appliqué à un robot industriel Kuka.

Dans un premier temps, nous avons entrepris une détermination fine des écart-types angulaires afin de construire la matrice de covariance. Plusieurs centaines d'essais ont été nécessaires. Le dispositif expérimental de mesure repose sur des comparateurs micrométriques numériques Mitutoyo. Nous avons mis en évidence la répartition gaussienne des écarts de position sur chacun des axes.

Une fois la matrice de covariance angulaire déterminée, nous avons fixé un point de l'espace de travail comme cible et nous mesurons pour chacun

des essais les écart relatifs en trois dimensions. Ceci est possible car le dispositif de mesure expérimental est constitué d'un trièdre où sont disposés orthogonalement trois comparateurs Mitutoyo.

Les résultats pratiques et théoriques sont comparés, et montrent la bonne adéquation du modèle avec la réalité. Ainsi nous validons un nouveau modèle théorique, très satisfaisant d'un point de vue mathématique et pratique.

L'intérêt de ce modèle d'ellipsoïdes stochastiques est multiple :

- Il donne un résultat plus réaliste de la répétabilité d'un robot et permet de chiffrer la répétabilité du robot dans tout l'espace utile sans avoir à mener des plans d'expérience coûteux.
- Il peut être utilisé pour l'optimisation des paramètres géométriques du robot lors de sa phase de conception.
- Il sert à optimiser l'utilisation du robot pour la réalisation de tâches spécifiques d'assemblage. On analyse ainsi le taux de réussite de diverses tâches en fonction du positionnement tâche/robot. Cela permet de mieux organiser la cellule de travail.

Une vidéo permettra de visualiser les dispositifs expérimentaux et les méthodologies utilisées.

Système de gestion de flotte pour le transport CTS

Anjali Awasthi, Samra Benabid, Angel Talamona, Michel Parent

IMARA , INRIA Rocquencourt,
BP-105 , F-78153

Le Chesney Cedex , France

{anjali.awasthi,samra.benabid,angel.talamona,michel.parent}@inria.fr

Résumé

Les cybercars sont des véhicules routiers : ils se conduisent de façon totalement automatique dans certains environnements. Ils constituent un système de transport de personnes ou de marchandises (un CTS pour Cybernetic Transportation System) et ils sont contrôlés par un système central de gestion (CFMS pour central fleet management system) de l'offre et de la demande.

Développée pour une installation expérimentale de cybercars à Rocquencourt, le CFMS décrit fournit trois fonctionnalités importantes: l'allocation client, le routage du véhicule basé sur la connaissance complète de l'état du trafic sur le réseau routier, et la redistribution des véhicules non occupés après l'accomplissement de leur service. Le système fournit un support de décision à travers une infrastructure basée sur un Système d'Information Géographique (SIG), un système de gestion de base de données (SGBD), le calcul dynamique du temps nécessaire pour accomplir les trajets, et la supervision à travers une interface opérateur.

2 De l'infrastructure à la gestion de flotte en temps réels :

L'intérêt est de développer une application complète intégrant le planning de l'infrastructure (hors ligne) et la gestion de flotte en temps réel (en ligne). Les acteurs externes requis dans le CFMS sont : les utilisateurs, les véhicules et un opérateur humain. Les fonctionnalités principales fournies par le système sont :

Hors ligne :

- Planning de l'infrastructure

En ligne :

- Réservations, programmation
- Trajets et gestion de la redistribution
- Supervision et contrôle de l'opérateur
- Distribution des données



Fig 1 : Cybercar

La technologie pour la détection d'obstacles, aussi bien que le guidage automatique des cybercars, qui intègre plusieurs techniques comme le DGPS, la vision et la navigation inertielle, ne sont pas traités dans cet article.

Les cybercars savent se déplacer par eux mêmes entre deux nœuds adjacents. Ainsi, le rôle interne du CFMS en terme de navigation est d'indiquer au véhicule des chemins qu'il doit suivre. Ces chemins sont calculés en temps réels en considérant l'état du réseau et les ressources associées, et sont des chemins optimaux.

Un simple protocole de messages a été développé entre le CFMS et les véhicules, les chemins sont assignés de manière à optimiser le temps d'attente de l'utilisateur (moins de 5 minutes).

3 L'architecture système

Le CFMS comprend une architecture composée essentiellement des sections suivantes :

- SIG
- SGBD
- Module de gestion de réservations et trajet (noyau)
- Interface opérateur

L'information spatiale et la logistique liées au réseau routier sont extraites par un SIG puis stockées dans un SGBD partagé avec le module de la gestion de flotte. Les éléments de transports sont référencés dans le SGBD par rapport aux données géographiques. Les éléments définissant la structure du réseau (nœuds, et arcs définissent un graphe directement) sont stockés comme des données permanentes dans la base de données relationnelle. Les véhicules, le client et le chemin sont générés et gérés dynamiquement ou quand le système est en-ligne.



Fig 2 : Interface client

4 Gestion des trajets

Le processus de la gestion des trajets du CFMS demande quatre actions :

- Gestion des réservations
- Planification des routes, et calcul du temps de trajet
- Mise à jour en temps réel de la matrice du trafic
- Redistribution des véhicules

5 Interface opérateur

Une interface graphique indique la position des véhicules sur un plan représentant le circuit ; en précisant le statut de chacun, son origine et sa destination. Une fenêtre affiche les réservations en attente, et une autre affiche le nombre de véhicules et le détail de leur parcours.

Deux approches ont été prises en considération pour la conception de l'interface

1. Étendre l'interface du SIG avec des éléments dynamiques pour une supervision et un contrôle en temps réel.
2. Développer une interface privée, avec des actions restreintes

La seconde approche a été adoptée pour cette expérimentation.

6 Implémentation

Un serveur *threaded* a été développé en C++ standard. L'interface opérateur graphique est écrite en Java. Les véhicules sont connectés à la centrale de gestion à travers un réseau IEEE802.11. Des cartes GPRS sont actuellement en cours d'implémentation pour une couverture de réseau de communication plus large.

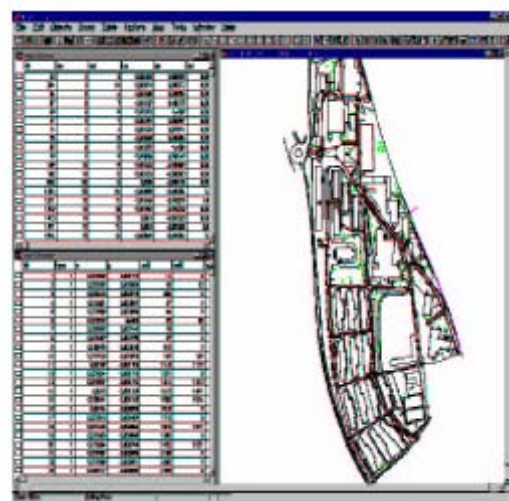


Fig 3 : Map d'Inria extrait de MapInfo



Fig 4 : Chemin Calculé

R.O.S. : Un système d'exploitation robuste pour robot mobile

Nicolas NEVEU

Equipe I.A.R.M.

Université Paris 8
St Denis

nn@mime.univ-paris8.fr

Les systèmes embarqués ont généralement deux caractéristiques : leur complexité et leur taille importante. Or, la complexité du système rend le risque de pannes plus important, et surtout leur correction et détection très aléatoire. Il nous a donc semblé nécessaire de concevoir un système d'exploitation dédié au fonctionnement de robots mobiles, afin de pallier au mieux à ces problèmes de pannes.

L'idée de réaliser un système d'exploitation capable de s'auto-corriger et conçu pour des microcontrôleurs remonte à 1996. Cette recherche a été justifiée par les points suivants :

- 1) nous permettre dans le cadre de la programmation de robots dotés de microcontrôleurs de pouvoir capter et traiter des événements extérieurs en temps réel.
- 2) permettre à un robot mobile en exploration de continuer à fonctionner même dans le cas d'un dysfonctionnement. Aujourd'hui dans la plupart des applications robotiques intégrant des microcontrôleurs la moindre panne de traitement nous entraîne à rebooter le système impliquant ainsi la perte d'informations.
- 3) améliorer l'autonomie des robots dans le cadre d'une réparation partielle de processus défectueux et de la réactivité.

Notre démarche consiste à bâtir des nano-noyaux chargés d'exécuter un certain nombre de tâches qui auront été groupées. Chacun de ces noyaux, ou R.O.S., devra être capable de détecter les éventuelles pannes, et dans une certaine mesure, de les corriger. Ils seront contrôlés par un serveur qui sera chargé de sélectionner le ROS à exécuter. Il aura, entre autres, un rôle d'ordonnanceur. Il décidera quel ROS doit fonctionner et quand, et devra gérer les défaillances d'un ROS.

Pour bâtir un tel système, nous avons décidé la modularité : un noyau très réduit, auquel on ajoute selon les besoins différents modules (Fig. 1). Le noyau de base est chargé du multi-tâches et de la communication inter-

processus. Ainsi, chaque système dispose uniquement du sous-ensemble de fonctionnalités nécessaires, ce qui entraîne une moindre complexité. ROS permet un multitâche de type coopératif et l'exécution de tâches indépendantes. Chaque tâche a à sa disposition l'ensemble des registres exactement comme si elle exploitait seule le microprocesseur.

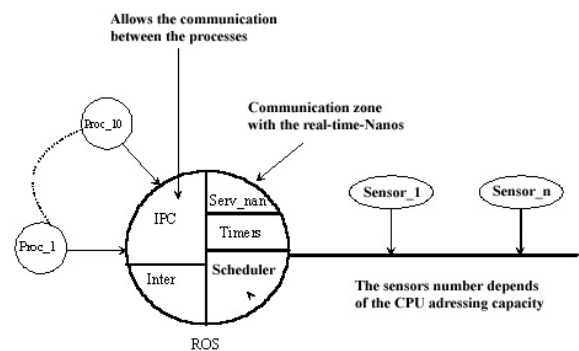


Fig. 1 : Architecture d'un R.O.S.

Le serveur de ROS a un rôle d'ordonnanceur mais il est aussi chargé de détecter les pannes et d'essayer de les corriger. En effet, il lance chaque ROS à son tour pour une durée paramétrable. Durant cette exécution, le ROS prend régulièrement des images de son exécution grâce à des techniques de checkpointing. Si le ROS concerné ne répond plus, alors le serveur considère qu'il est en panne. Il peut alors le relancer sans avoir à le rebooter entièrement, grâce aux images d'exécution du ROS qui ont été sauvegardées. Ainsi, une grande quantité de pannes logicielles peuvent être corrigées sans aucune perte d'informations. Nous sommes actuellement en phase de test de nos ROS lors de simulations, qui seront suivies de l'implantation de notre système sur un robot mobile.

Localisation en environnement dynamique

E SEIGNEZ

Instit d'Electronique Fondamentale (IEF), UMR CNRS 6622,

IEF, UMR CNRS 6622
Bat 220,
Université Paris XI,
91405 Orsay
seigneze@yahoo.fr

La problématique du sujet est de s'intéresser aux méthodes de localisation pour robots mobiles dans le cadre d'un environnement connu du robot. Celui-ci se déplace en environnement intérieur, muni de capteurs odométriques et ultrasons. L'environnement n'est pas statique, des personnes ou des objets pouvant évoluer au cours du temps.

Pour ce faire, une plate-forme expérimentale (Minicar) a été mise en œuvre. Cette dernière est une voiture miniature équipée d'odomètres, de capteurs ultrasons, d'une boussole et d'une caméra. Une architecture Serveur/Client a été développée avec un PC distant qui permet de décentraliser les calculs demandant beaucoup de ressources. Ainsi, les données utiles sont envoyées à cet ordinateur (client) qui aura à réaliser les opérations nécessaires à la localisation et à faire un retour visuel à l'utilisateur.

Les algorithmes de localisation utilisés dans ce projet sont de type probabiliste markovien. Ils correspondent à la technique grille de probabilité, technique discrétisant l'espace et la

position du robot, et à une technique utilisant le filtrage particulaire, la localisation Monte Carlo (MCL). L'environnement extérieur est polygonalisé pour en faciliter la représentation et peut évoluer au cours du temps, les algorithmes étudiés devant fonctionner dans le cas d'un environnement dynamique.

Ces algorithmes ont été étudiés et simulés sur ordinateur. Ils ont montré leurs capacités plus ou moins grandes à réagir dans des situations précises. Les résultats de la simulation sont maintenant confrontés à l'expérimentation avec utilisation de la plate-forme Minicar. Dans cette phase, Minicar doit se localiser dans le laboratoire, contrôlé à distance par un utilisateur de l'ordinateur.

En perspective, nous allons implémenter une perception active. La plate-forme ne sera donc plus commandée à distance par un utilisateur, mais l'algorithme devra planifier le chemin à suivre et déterminer la meilleure stratégie envisageable pour que le robot se localise dans les meilleurs délais.

Forceps Intelligent et Sécurisé

Ruimark SILVEIRA

Laboratoire d'Automatique Industrielle – LAI
INSA de Lyon

LAI, INSA de Lyon,
20 Av. Albert Einstein,
69621, Villeurbanne
silveira@lai.insa-lyon.fr

Ces dernières années, le monde médical a commencé un changement important en développant de nouvelles méthodes dans l'ingénierie médicale.

L'évolution de ces technologies a comme conséquence une instrumentation chirurgicale de plus en plus adaptée à la réalisation d'interventions. En collaboration avec l'Hôpital Edouard-Herriot de Lyon nous proposons de modéliser et d'instrumenter un forceps utilisé dans la pratique obstétrique.

L'objectif de cette étude est de déterminer les causes des accidents liés aux nouveaux-nés. Actuellement l'outil chirurgical développe des forces de traction et de compression qui sont appréciées subjectivement par l'obstétricien.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse phénoménologique (étude de 100 cas d'embarrure néonatale). Pour valider les capteurs de pression d'interface, un modèle physique (simulation des forces viscoélastiques) a été développé ainsi qu'un logiciel pour faire la cartographie de pression.

Nous proposons dans le cadre de cette thèse développer un forceps «intelligents» intégrant une matrice de capteurs actifs de pression d'interface à recherche d'équilibre pour l'accouchement sécurisé. Ce nouveau préhenseur aura un système d'analyse et d'aide à la décision à l'accouchement et un système de sécurité limitant les forces appliquées sur la tête de fœtus.

Les retombées cliniques et scientifiques d'une telle étude sont: la diminution du nombre d'accidents lors d'un accouchement avec forceps, l'aide au choix de la voie d'accouchement, l'amélioration de l'enseignement, l'augmentation des connaissances des phénomènes compressifs liés à la phase finale de l'accouchement et la participation à la prévention par l'instrumentation biomédicale intelligente.

Mots Clef

Forceps obstétriques, instrumentation, modélisation, capteurs d'interface.

Premiers résultats expérimentaux suite à la conception d'un prototype de tête de coloscope

Guillaume Thomann

Laboratoire d'Automatique Industrielle, INSA de Lyon

Bâtiment Antoine de Saint Exupéry,
20 avenue Albert Einstein
69621 Villeurbanne Cedex, France
gthomann@lai.insa-lyon.fr

Résumé - Depuis 2000, on estime à 37.000 le nombre de nouveaux cancers colorectaux diagnostiqués [PIENK 01] par an en France. Mais le pronostic de ce cancer s'est nettement amélioré ces dernières années grâce à un diagnostic plus précoce, d'où l'idée de procéder à un dépistage systématique du cancer colorectal.

Différents moyens de détection peuvent être utilisés pour diagnostiquer un cancer, mais la coloscopie reste la seule chirurgie fiable à l'heure actuelle. Les chirurgiens en pratiquent chaque année un million dans les établissements de soin français. Les statistiques de perforation ou d'hémorragie sont accablantes, et c'est progressivement que la Chirurgie Minimale Invasive (Minimally Invasive Surgery ou MIS) est devenue une des priorités dans le domaine médical, notamment avec les endoscopes médicaux, qui sont des instruments fondamentaux vis à vis de la MIS.



La coloscopie se déroule sous anesthésie générale, du fait des douleurs induites par les efforts s'exerçant sur

les parois intestinales lors de la progression de l'endoscope. C'est pour remédier à ce problème de douleur que nous cherchons à minimiser le contact entre le coloscope et les parois intérieures de l'intestin.

Les retombées de notre étude se situent au niveau du confort du patient : intervention de moins longue durée, rétablissement plus rapide, diminution du risque de perforation intestinale et par conséquent, coût sociétal global moindre.

Une première maquette de faisabilité a été montée et testée. Elle est constituée de trois soufflets métalliques plissés à actionnement électro-pneumatique (placés à l'intérieur d'une gaine en caoutchouc) et disposés à 120° les uns des autres. Trois capteurs sans contact sont par ailleurs disposés en cercle, à 120° les uns des autres autour de ce prototype. Ils lui permettent de se positionner automatiquement au centre de ces derniers.

A partir des mesures relevées, les commandes nécessaires sont engendrées pour positionner au mieux l'extrémité de l'endoscope au centre d'un tube rectiligne, représentant, dans un premier, l'intestin.

Les résultats de cette inspection tubulaire sont tout à fait satisfaisant : les régulations de pressions dans les soufflets permettent d'éviter tout contact entre l'endoscope et les parois du tube.

Nous pourrions conclure que la conception choisie est tout à fait satisfaisante par rapport aux objectifs fixés . Il ne manque plus qu'à réduire la taille de notre nouvel tête de coloscope.

Mots clé - Chirurgie Minimale Invasive, Coloscopie, Actionneurs Pneumatiques, Soufflets Métalliques, Fibres Optiques.

Navigation d'un robot mobile d'intérieur par vision artificielle

G. Blanc, Y. Mezouar, T. Château, P. Martinet

LASMEA

24 avenue des Landais

63177 AUBIERE

gblanc, mezouar, château, martinet @lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé

Dans ce poster, une stratégie de navigation d'un robot mobile d'intérieur par vision artificielle est présentée. L'objectif est d'utiliser une caméra embarquée sur le robot mobile pour le localiser et contrôler ces mouvements.

Mots Clef

Robot mobile, navigation, asservissement visuel.

1 Introduction

Dans le contexte émergeant de "la maison communicante", le robot mobile est intégré comme membre à part entière du réseau domotique. Le marché a vu apparaître récemment les premiers de ces agents mobiles à destination du particulier, sous forme de robots ménagés ou compagnons. Une autre tâche envisageable pour un agent mobile de la maison communicante est d'être "l'œil mobile" de l'utilisateur, en lui communiquant des informations sur son espace d'évolution. Ces informations peuvent être par exemple l'image d'une caméra frontale, ou une alerte suite à un événement anormal. Un tel robot, dit de télé-présence doit pouvoir se déplacer de manière autonome dans son espace de travail. Ce travail s'inscrit dans ce contexte et plus particulièrement dans le cadre d'un projet RNTL (WACIF) dont l'objectif est de fournir un ensemble de fonctionnalités pour la navigation autonome d'un robot mobile de télé-présence.

2 Stratégie de navigation

Généralement, la navigation autonome de robot mobile s'appuie sur l'utilisation de capteurs proprioceptifs (odomètre, gyromètre ...) et extéroceptifs (caméra, télémètre ...) [1]. La combinaison des informations issues des ces capteurs permet de localiser le robot et de générer ces déplacements dans un modèle géométrique de son environnement. Le succès de la tâche repose alors essentiellement sur la précision du calibrage des différents capteurs et du modèle de l'environnement utilisé. Notre travail s'intéresse à l'interprétation directe des images fournies par une caméra montée sur le robot mobile. L'objectif étant de contrôler les mouvements du robot entre ses positions courante et désirée spécifiée à travers une image requête sélectionnée dans une base d'images. Notre stratégie, similaire à celle proposée dans

[2] pour des robots manipulateurs, peut être déclinée en quatre phases (voir FIG. 1) :

1. L'utilisateur téléguide le robot dans son espace de travail. Le robot acquiert un panel d'images clefs représentatives des lieux. Ces images sont indexées et organisées dans une base de donnée. C'est la phase d'apprentissage.
2. Dans sa position courante, le robot se localise par rapport à la base d'images apprises, en identifiant l'image de la base la plus proche de l'image courante.
3. Une fois le robot localisé, une suite d'images ordonnées de la base, appelées images relais, est construite et décrit "l'itinéraire" à emprunter pour atteindre une image cible appartenant à la base d'images.
4. L'itinéraire déterminé par la suite d'images relais est interpolé et parcouru en s'appuyant sur des méthodes d'asservissement visuel adaptées au robot utilisé.

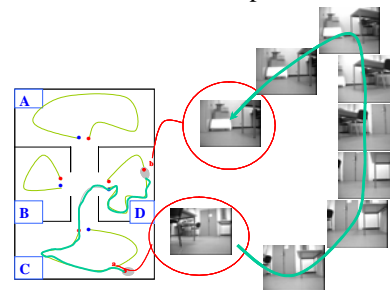


FIG. 1 – Stratégie de navigation

Dans le cas de robots mobiles à roues (chariot ou voiture), les mouvements du robot sont contraints. Le cœur de notre travail réside dans l'intégration de ces contraintes dans la phase de planification de trajectoires dans l'images et de commande par asservissement visuel .

Références

- [1] La Robotique mobile, Traité IC2, série systèmes automatisés, Hermes Sciences Publications, Jean-Paul Laumont.
- [2] Y. Mezouar, A. Remazeilles, P. Gros, F. Chaumette, Image Interpolation for Image-based Control Under Large Displacement, *ICRA '02*, Volume 3, Pages 3787-3794, Washington DC, Mai 2002.

Session démonstrations

- Microrobotique collective pour le transport d'objets
Lounis Adouane, Nadine Lefort (LAB/CNRS, Besançon)
- Microrobot à pattes réalisé par microfabrication
Agnès Bonvilain, Nicolas Chaillet (LAB/CNRS, Besançon)
- MOC : Microrobot On Chip
Cédric Clevy, Joël Agnus, Nicolas Chaillet (LAB/CNRS, Besançon)
- Table de micropositionnement actionnée par des fils en alliage à mémoire de forme (AMF)
Yassine Haddab, Joël Abadie (LAB/CNRS, Besançon)
- Développement et contrôle d'un micromanipulateur magnétique de cellules (WIMS)
Michaël Gauthier, Emmanuel Piat (LAB/CNRS, Besançon)
- Plate-forme robotisée du Centre Technique d'Arcueil
André Dalgalarondo, Delphine Dufourd, David Filliat (DGA, CTA, Arcueil)
- Récupération et positionnement automatique d'un instrument chirurgical en laparoscopie
Alexandre Krupa, Michel de Mathelin, Christophe Doignon, Jacques Gangloff (EAVR-LSIIT, Illkirch)
Guillaume Morel (LRP/CNRS, Paris)
- Dermarob : robot de prélèvement cutané
G. Duchemin, É. Dombre, F. Pierrot et P. Poignet (LIRM/CNRS, Montpellier)
- TAIPAN : un véhicule sous-marin autonome (AUV)
Bruno Jouvencel, (LIRM/CNRS, Montpellier)
- Commande de la posture du robot Hylos
Christophe Grand, Faïz BenAmar, Frédéric Plumet et Philippe Bidaud (LRP/CNRS, Paris)
- Suivi automatisé de véhicules
Joël G. Morillon, Laurent Vasseur, François Useo, Vincent Marion, Jérôme Dento et Nourrdine Cherfaoui (Thales Systèmes Aéroportés, EM/ROB – CN300, 2, Avenue Gay-Lussac, 78851 Elancourt)
- Guidage latéral d'un véhicule urbain électrique de type Cycab, à partir des informations fournies par un récepteur GPS cinématique
J.Bom, B.Thuilot, F.Marmoiton, P.Martinet (LASMEA/CNRS, Clermont Fd)
- Guidage automatique de véhicules agricoles par un unique GPS cinématique en présence de glissements
R.Lenain, C.Cariou (LASMEA/CNRS, Cemagref, Clermont Fd)
- Télé-échographie robotisée. Le projet OTELO et son premier démonstrateur OTELO.
Equipe robotique médicale (C.Novales, LVR, Bourges)
- Démonstrateur I4R : architecture et identification géométrique par vision
N.Andreff (LARAMA/IFMA, Clermont Fd)
F.Pierrot (LIRMM/CNRS, Montpellier)

Microrobotique collective pour le transport d'objets

Lounis ADOUANE, Nadine Le Fort-Piat
 Laboratoire d'Automatique de Besançon – France
Lounis.Adouane@ens2m.fr Nadine.Piat@ens2m.fr

Transports d'objets

Pourquoi un transport coopératif ?

- charge trop lourde pour être transportable par un seul robot,
- tendance à améliorer le temps d'exécution de la tâche,
- robustesse accrue de la commande due à la redondance des interactions entre robots.

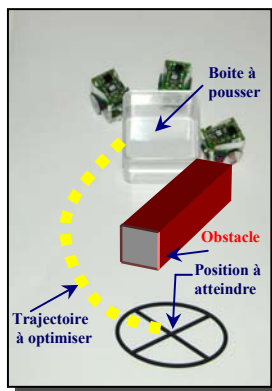


Fig 1 : Tache de pousser d'objets (Box-pushing)

Pourquoi un transport réactif ?

- meilleure flexibilité et adaptation des interactions entre robots dues à l'architecture de commande simpliste basée sur le principe de stimuli-réponse,
- validité de l'approche même si on ne dispose d'aucune information sur l'environnement où s'exécute la tâche de transport.

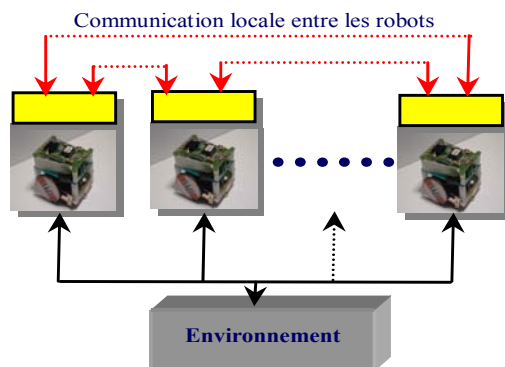


Fig 2. : Architecture de commande distribuée

Architecture de commande distribuée

- ensemble de comportements élémentaires et réactifs implanté sur chaque robot,
- hiérarchie des comportements (subsumption),
- comportements altruistes : signaux attractifs,
- pas de connaissance globale de l'environnement,
- pas de communication directe entre les robots.

Plate-forme expérimentale : robots mobiles autonomes ALICE

(développé à l'EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)

Caractéristiques techniques :

- 2 moteurs de montre (Lavet) pour l'actionnement,
- 4 capteurs infrarouges (champ d'émission maximal 5cm),
- 1 microcontrôleur PIC 16F84 avec 1K mots de mémoire flash,
- 1 récepteur infrarouge pour les commandes à distance,
- 3 petites piles de montre.

Avantages structurels :

- petite dimension (22mm×20mm×19mm),
- vitesse pouvant aller jusqu'à 35 mm/s,
- autonomie énergétique supérieure à 10 heures (consommation <10 mW).



Fig 3. : Microrobot ALICE

fi

Simulateur de robotique collective.

Il offre les possibilités suivantes :

- modélisation de robots avec différentes caractéristiques structurelles,
- validation de stratégie de contrôle avec le nombre de robots nécessaires (détermination du seuil critique pour l'émergence de comportements coopératifs,
- extensibilité et modification de l'environnement aisé (ajout d'obstacles, de murs ...).

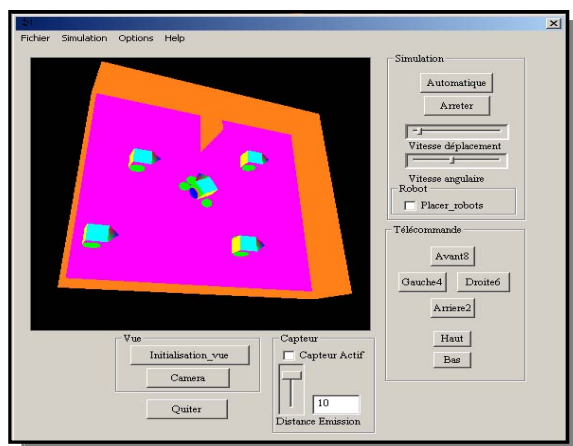


Fig4. : Simulateur 3D

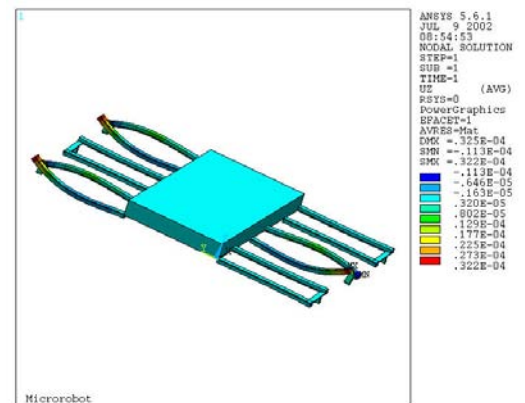
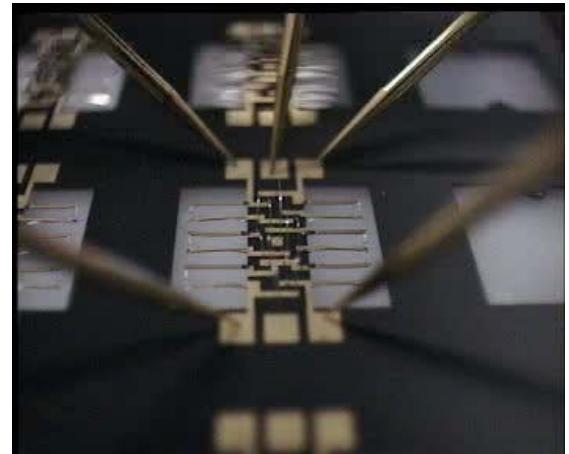
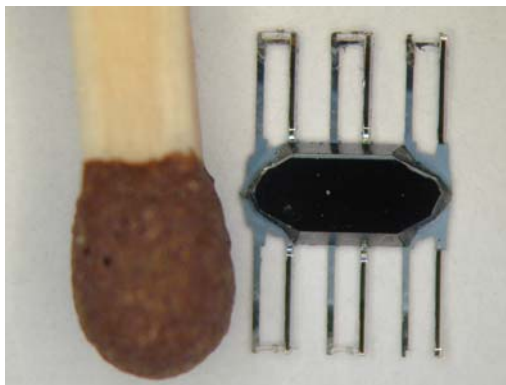
Microrobot à pattes réalisé par microfabrication

Agnès Bonvilain, Nicolas Chaillet
 Laboratoire d'Automatique de Besançon – France
 agnes.bonvilain@ens2m.fr, nicolas.chaillet@ens2m.fr

Description du microrobot à pattes

Ce microrobot à pattes est le plus petit du monde actuellement :

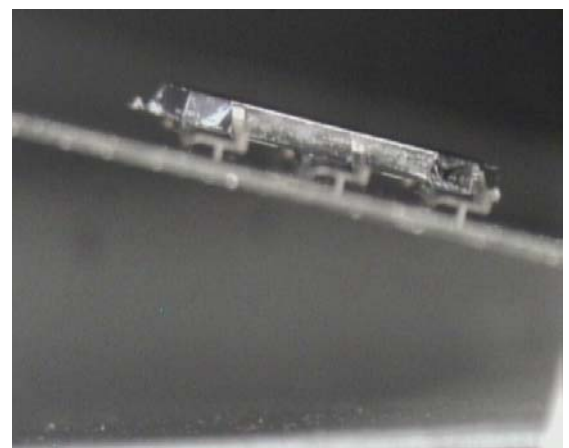
- microrobot à 6 pattes
- réalisation de la structure par micro-fabrication, sans assemblage,
- utilisation de bilames thermiques Si/SU-8 pour actionner les pattes,
- 9 masques, 50 étapes, 80 heures de fabrication



Caractéristiques du microrobot insecte

La structure comprend 6 pattes avec deux micractionneurs bilames thermiques par patte :

- deux degrés de liberté actifs par patte
- dimensions du microrobot hors tout : 6 mm x 3,5 mm x 0,5 mm
- poids propre : 2,3 mg,
- charge transportée : jusqu'à 5 g
- vitesse de déplacement : 100 $\mu\text{m/s}$



MOC : Microrobot On Chip

Cédric Clevy, Joël Agnus, Nicolas Chaillet

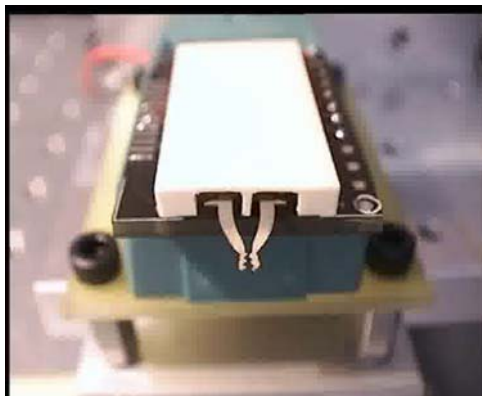
Laboratoire d'Automatique de Besançon – France

cedric.clevy@ens2m.fr - joel.agnus@ens2m.fr - nicolas.chaillet@ens2m.fr

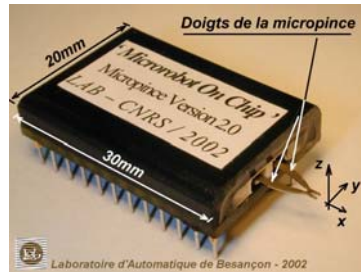
Le concept

L'objectif : développer des composants microrobotiques "plug and use"

- Développer des "puces microrobotiques" connectables entre elles et à bas coût,
- Réaliser des installations microrobotiques modulaires (comme en électronique).
- Actionnement piézoélectrique
 - deux degrés de liberté par doigt,
 - courses :
 - axe y : +/- 150 μm /doigt (+/- 150V)
 - axe z : +/- 200 μm /doigt (+/- 100V)
- bande passante :
 - axe y : > 1 kHz
 - axe z : > 400 Hz



Les prototypes



1 mm

Table de micropositionnement actionnée par des fils en alliage à mémoire de forme (AMF)

Yassine HADDAB, Joël ABADIE
Laboratoire d'Automatique de Besançon
yassine.haddab@ens2m.fr, joel.abadie@ens2m.fr

Le micropositionnement

Le micropositionnement est une fonction importante en microrobotique. La problématique consiste à développer des micropositionneurs de petites dimensions, de manière à s'immerger dans le micromonde. Les micropositionneurs commercialisés sont généralement onéreux et volumineux pour des applications en microrobotique.

Sur ces bases, nous avons réalisé un prototype de table de micropositionnement actionnée par des fils en alliage à mémoire de forme (AMF) qui répond en terme de coût, de précision et d'intégration aux objectifs que nous nous étions fixé. Pour l'instant, la commande des déplacements de la table est en boucle ouverte. Pour augmenter la précision de positionnement, il est indispensable d'asservir en position chacun des axes X et Y de cette table.

Caractéristiques de la table X-Y

Dimensions : 5,5 x 5,5 x 4,5.

Course suivant chaque axe : +/- 2 mm.

Précision de positionnement en BO : 1 μ m.

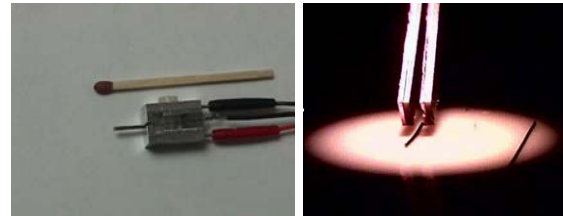
Actionnement : fils en alliage à mémoire de forme (AMF).

Caractéristiques : très faible coût, grande immunité au bruit, découplage total des axes X et Y, conception modulaire, approche Plug & Produce.



Applications

- micropositionneur de laboratoire,
- micropositionnement industriel, micro-usine.



Développement et contrôle d'un micromanipulateur magnétique de cellules (WIMS)

Michaël Gauthier, Emmanuel Piat

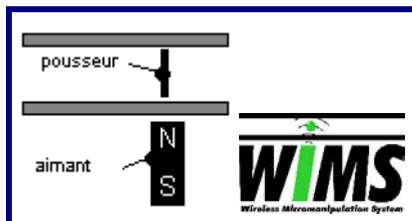
Laboratoire d'Automatique de Besançon - LAB UMR 6596 - IMFC FR W0067
25 rue Alain Savary - 25 000 Besançon - FRANCE
Courriel: gauthier, epiat@ens2m.fr

En génie biologique, l'aide à la manipulation de cellules in vitro fait partie des enjeux d'aujourd'hui. A ce titre le LAB développe un programme de recherche (*WIMS*) visant à développer et à commander un micropousseur magnétique évoluant dans un milieu aqueux emprisonné entre deux lamelles de verre telles que les lamelles utilisées pour des observations au microscope.

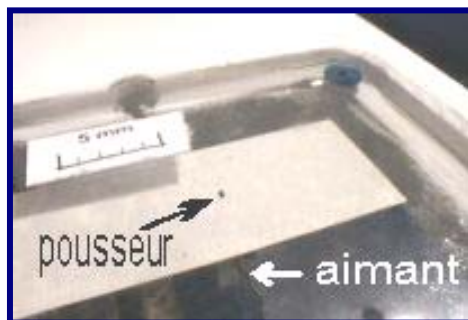
Le principe d'actionnement du pousseur repose sur l'utilisation d'un champ magnétique créé par un aimant permanent. Cet aimant est situé sous les lamelles et est asservi en position. Le microrobot est élaboré avec un matériau ferromagnétique, ainsi Ce moyen de micromanipulation en milieu liquide trouve naturellement ces applications en recherche biologique.

Cet outil va permettre l'automatisation de tâches de manipulation longues et pénibles réalisées pour l'instant manuellement, par exemple dans le domaine de la fécondation in vitro. Plus généralement, notre pousseur magnétique est conçu pour assurer l'approvisionnement et le déchargement des postes de travail des futures micro-usines d'analyse et de traitement d'objets biologiques.

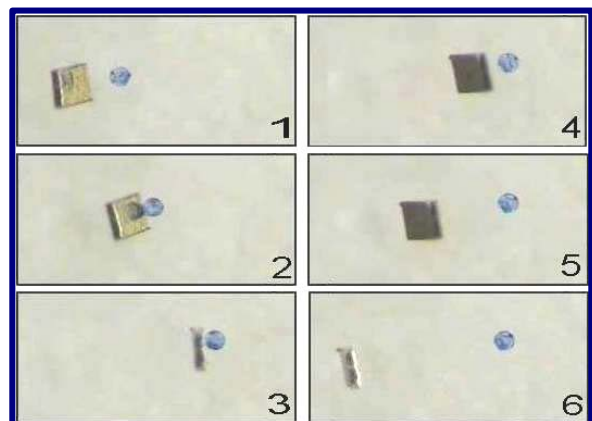
Le microrobot mobile est un "pousseur" ferromagnétique capable de se déplacer entre les deux lamelles de verre distantes d'une centaine de microns. On peut grâce à ce dispositif positionner des micro-objets jusqu'à 20 microns de diamètre avec une précision du micron. On peut également quantifier et contrôler l'effort appliqué sur l'objet manipulé afin de ne pas le détériorer. Les dimensions des pousseurs réalisés par microfabrication s'étendent actuellement de $10 \times 10 \times 5 \mu\text{m}^3$ à $400 \times 400 \times 20 \mu\text{m}^3$.



Principe d'actionnement



Le dispositif expérimental **WIMS**



Bille de 50 microns déplacée par un pousseur

Plate-forme robotisée du Centre Technique d'Arcueil

André Dalgarrondo¹Delphine Dufourd¹David Filliat¹¹ DGA / Centre Technique d'Arcueil16 bis, avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arcueil Cedex
prenom.nom@etca.fr

Résumé

Cette fiche a pour but de présenter les activités du département Géographie-Imagerie-Perception du Centre Technique d'Arcueil (DGA) dans le domaine de la robotique mobile et de situer l'utilisation de la plate-forme d'expérimentation Pioneer qui sera en démonstration à l'occasion des JJNR 2003.

Mots Clef

Architecture de contrôle, Perception, SLAM.

1 Présentation des activités de GIP

Le département Géographie-Imagerie-Perception (GIP) du Centre Technique d'Arcueil (CTA) réalise des prestations d'études, d'expertise et d'évaluation dans le domaine de la robotique autonome (robotique terrestre et microdrones). Il intervient au profit des autres entités de la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) et en collaboration avec des industriels et des laboratoires de recherche universitaires.

Les activités d'études et d'expertise sont centrées autour du thème scientifique *Perception en Milieu Hostile*. Elles s'étendent des aspects capteurs et traitements associés jusqu'à leur intégration dans le module de perception global d'un système autonome, incluant ainsi la prise en compte des interactions entre toutes les composantes de ce système.

Le département GIP intervient ainsi sur de nombreux systèmes de perception intégrés dans les systèmes d'armes des milieux aéroterrestre, spatial et maritime. Il assure l'étude et l'expertise de systèmes de traitement de données d'origines diverses (images visibles ou infrarouges, données radar, télémétriques et acoustiques) et sur des systèmes de fusion de ces données.

L'activité d'évaluation intervient en complément de l'activité d'expertise. Elle s'exerce au travers d'une méthodologie d'évaluation issue de plusieurs thèses. Ces travaux ont notamment conduit au développement de l'environnement d'évaluation SENA. À l'origine employé pour le domaine du Renseignement d'Origine Image (ROIM), cet environnement est également utilisé pour l'évaluation quantitative d'algorithmes de traitement d'images pour la navigation de robots mobiles autonomes

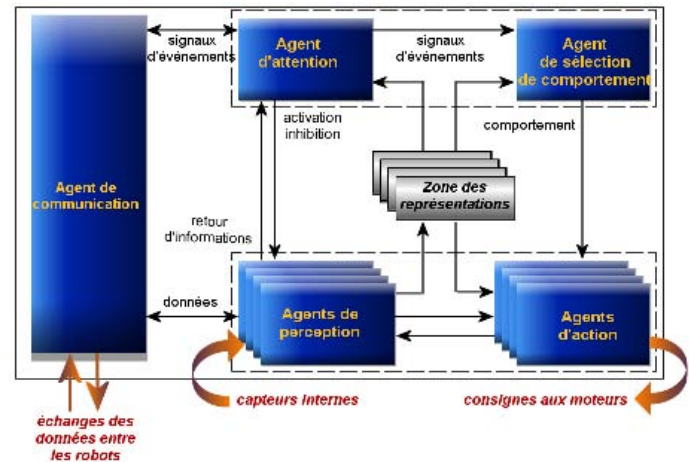


FIG. 1 – Schéma de principe de l'architecture HARPIC.

(détection de bords de route, suivi de véhicules ou d'amers visuels).

L'aspect système de nos travaux a notamment été acquis au travers du développement du capteur intelligent OPART, de plusieurs thèses sur les architectures de contrôle de robots mobiles autonomes et des études sur le développement et l'élaboration de données de géographie numérique et leur emploi dans les systèmes d'armes.

Le département GIP dispose de moyens humains de haut niveau (ingénieurs, docteurs et doctorants en thèse DGA-CNRS ou CIFRE) qui participent à l'animation de la communauté scientifique de leur domaine.

2 Travaux en robotique

Après avoir traité dans un cadre relativement général du traitement des images et de la commande intelligente, les travaux du département GIP ont été appliqués à la robotique. Ils se sont d'abord focalisés sur la commande des robots [1] puis sur les architectures de contrôle de robot mobile [2] [4] et notamment sur l'intégration de la fonction perception dans celles-ci [3]. Ces travaux ont donné lieu au développement de l'architecture HARPIC (voir figure 1). Ensuite, des capacités de localisation et de construction de carte (SLAM) ont été développées à partir des travaux de David Filliat [5] et de Delphine Dufourd [6].

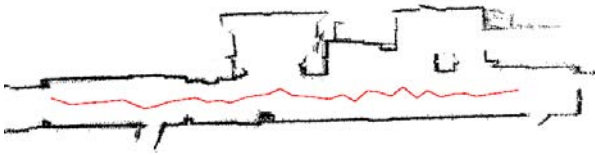


FIG. 2 – Exemple de carte réalisée par le robot Pioneer.



FIG. 3 – Le robot d'expérimentation Pioneer 2 AT du CTA.

Plus généralement, les travaux de robotique du département GIP contribuent, d'une part, à entretenir et à développer son expertise et, d'autre part, à expérimenter et à montrer la faisabilité de fonctions avancées qui pourraient à terme être implantées sur des démonstrateurs opérationnels. Ainsi, la plate-forme décrite dans le paragraphe suivant est un moyen d'expérimentation de fonctions automatiques qui pourraient équiper un petit robot mobile chargé d'accompagner des unités opérationnelles en milieu urbain à l'intérieur où à proximité de bâtiments, en particulier dans le contexte de missions de reconnaissance. Elle constitue également une base concrète pour le recueil de besoin auprès des forces opérationnelles. Dans ce cadre, les problématiques scientifiques qui intéressent le département sont essentiellement les suivantes :

- la localisation et la construction de carte en milieu intérieur ;
- l'exploration de bâtiment ;
- la surveillance et la collecte du renseignement ;
- la collaboration homme / robot et le partage des tâches ;
- la coopération entre robots homogènes ou hétérogènes.

3 Démonstration

Dans le cadre des JNRR 2003, le département GIP présente l'une de ses plates-formes d'expérimentation (voir figure

3). Il s'agit d'une base de robot mobile de type Pioneer 2 AT sur laquelle ont été intégrés les éléments suivants :

- télémètre laser à balayage IBEO ;
- PC portable de type PIII 600 Mhz avec baie d'extension pour 2 cartes PCI ;
- liaison Ethernet sans fil BreezeCom ;
- caméra panoramique (non représentée sur la photo).

Ce robot est contrôlé par l'architecture HARPIC développée au CTA. Il s'agit d'une architecture basée sur le principe des systèmes multiagent. Elle permet notamment de séquencer des agents de perception et des agents d'action dont l'agencement dote le robot de comportements sensorimoteurs. Sa principale originalité provient de l'utilisation d'un agent d'attention qui a pour but de surveiller l'environnement du robot, de détecter des événements et d'adapter les perceptions du robot à sa situation et aux ressources de calcul disponibles.

Le robot en démonstration sera doté de plusieurs comportements de navigation réactive (évitement d'obstacles, suivi de mur et suivi de couloir), d'agents de perception destinés à construire des cartes locales ou plus globales de l'environnement du robot et d'agents d'interface permettant à un opérateur humain d'interagir avec le robot. Plusieurs modes de contrôle de l'autonomie du robot sont ainsi à la disposition de l'opérateur : commande directe du robot, commande avec contrôle anti-collision, commande par points de passage, commande de ralliement sur carte locale ou plus globale, mode autonome à partir d'enchaînements automatiques de comportements.

Références

- [1] D. Luzeaux, *De la commande à l'autonomie des systèmes robotisés*. Mémoire de HDR, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay, décembre 2001.
- [2] D. Luzeaux and A. Dalgalarondo, *Hybrid architecture for autonomous robot based on representation, perception and intelligent control*. Book chapter. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Recent Advances in Intelligent Paradigms and Applications. ISBN 3-7908-1538-1. Physica-Verlag, Heidelberg 2003.
- [3] A. Dalgalarondo. *Intégration de la fonction perception dans une architecture de contrôle de robot mobile autonome*. Thèse de l'Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, janvier 2001.
- [4] P. Sellem. *La répartition de la perception dans un système distribué de robots autonomes*. Thèse de l'Université Paris VI, septembre 2001.
- [5] D. Filliat. *Cartographie et estimation globale de la position pour un robot autonome mobile*. Thèse de l'Université Paris VI, 2001.
- [6] D. Dufourd. *Construction autonome de cartes d'environnement par des robots mobiles*. Thèse en cours sous la direction de R. Chatila et D. Luzeaux.

Récupération et positionnement automatique d'un instrument chirurgical en laparoscopie

Alexandre Krupa¹
Christophe Doignon¹
Guillaume Morel²

Michel de Mathelin¹
Jacques Gangloff¹

¹ EAVR - LSIIT (UMR CNRS 7005)

² LRP (CNRS FREE 2705)

LSIIT - EAVR, Bd. S. Brant, 67400 Illkirch, France
krupa@eavr.u-strasbg.fr

Mots Clef

Robotique médicale, chirurgie mini-invasive, asservissement visuel.

1 Introduction

Il existe aujourd'hui des systèmes robotiques permettant d'effectuer des interventions en chirurgie laparoscopique par télémanipulation, par exemple le système Zeus de Computer Motion ou encore le système Da Vinci de Intuitive Surgical. En se référant à l'image vidéo fournie par la caméra endoscopique, le chirurgien pilote, à l'aide d'une interface robotique (bras maîtres), des bras manipulateurs (esclaves) qui déplacent et actionnent les instruments chirurgicaux. Cette technique permet de réduire la fatigue du chirurgien et d'augmenter la précision des actes lors de l'intervention grâce aux possibilités de démultiplication/réduction des mouvements de l'interface de télémanipulation. Dans ce contexte, notre objectif est d'augmenter les fonctionnalités des robots de chirurgie laparoscopique, en y intégrant des modes de commandes automatiques ou semi-automatiques par asservissement visuel. Le principe général est d'utiliser en temps réel les images de la caméra endoscopique pour commander le déplacement des outils et réaliser des tâches simples en mode semi-automatique pour faciliter le geste chirurgical. Dans les systèmes de chirurgie téléopérés, plusieurs bras sont utilisés : un bras portant la caméra endoscopique et les autres déplaçant les instruments chirurgicaux. Une difficulté, rencontrée par le chirurgien qui téléopère à distance un système robotique, est liée à l'absence de repère lorsque l'instrument chirurgical est en dehors du champ visuel. Généralement un assistant se trouvant à proximité du robot replace manuellement l'instrument dans le champ visuel ou le chirurgien tente de récupérer l'instrument sans retour visuel avec le risque de contacts avec les organes. Pour assister le chirurgien dans cette situation, une tâche de récupération automatique qui ramène l'instrument perdu au

centre de l'image endoscopique par asservissement visuel a été développée. Une autre tâche automatique permettant de placer l'instrument à une position indiquée par le chirurgien a également été mise en place. L'approche proposée consiste à projeter selon l'axe de l'instrument un motif laser sur la scène. La position du motif laser extraite dans l'image permet de déplacer par asservissement visuel l'outil de manière à atteindre un objet d'intérêt (par exemple un vaisseau sanguin) défini préalablement dans l'image endoscopique par le chirurgien.

2 Description du système

Un robot médical AESOP commercialisé par la société Computer Motion est utilisé pour manipuler l'instrument chirurgical. L'instrument est introduit par l'intermédiaire d'un trocart dans une maquette simulant l'abdomen du patient (voir fig. 1). La caméra endoscopique est également introduite dans l'abdomen par l'intermédiaire d'un second trocart pour acquérir l'image endoscopique de la scène observée. Un porte-outil à pointage laser a été développé (voir

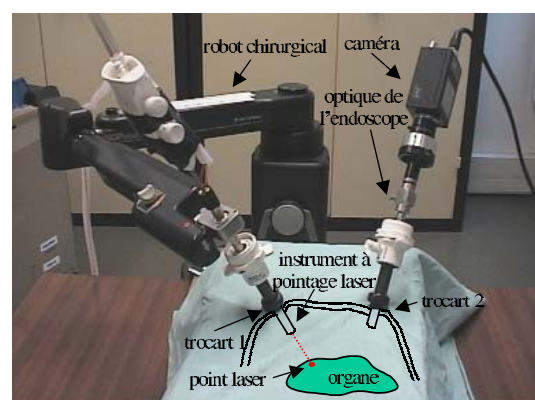


FIG. 1 – Dispositif expérimental

fig. 2.a) pour projeter un motif laser sur la scène selon l'axe

de l'instrument. La tête du porte-outil contient des collimateurs optiques miniatures qui sont connectés à des fibres optiques reliées à des sources laser externes. Ce support mécanique se fixe sur les instruments laparoscopiques de taille standard et permet de déporter les sources lasers. Le porte-outil contenant un instrument de lavage/aspiration est présenté à la figure 2.b. L'ensemble est maintenu par l'effecteur du robot et permet de projeter le motif laser sur la scène. Trois LEDs miniatures de technologie CMS sont fixées sur l'extrémité de l'instrument pour constituer des marqueurs optiques nécessaires à l'estimation de la profondeur entre l'instrument et l'organe.

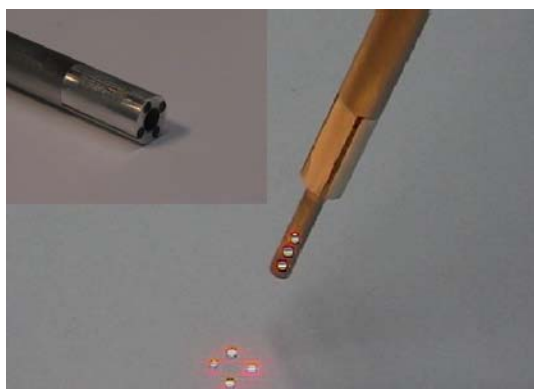


FIG. 2 – (a)-(b) prototype du porte outil à pointage laser

La figure 3 illustre la composition du système complet. Nous utilisons un ordinateur de type PC, sous l'environnement Linux. Il permet d'effectuer le traitement d'image nécessaire à l'extraction des informations visuelles et de calculer la vitesse de commande articulaire à appliquer au manipulateur AESOP. Le PC communique avec le contrôleur en vitesse du manipulateur AESOP par l'intermédiaire d'une liaison série RS232. Il transmet les vitesses articulaires de consigne au contrôleur du robot qui lui renvoie les valeurs courantes des coordonnées articulaires du robot. La caméra endoscopique fournit un signal vidéo analogique PAL à 25 images/s entrelacées qui est numérisé par une carte de capture vidéo installée sur le bus PCI du PC.

3 Approches développées

La viscosité des organes, la complexité de la scène et les conditions d'éclairage rendent la détection du motif laser particulièrement difficile. Pour extraire de manière robuste les marqueurs visuels de l'image, une technique de détection utilisant la synchronisation de l'allumage et l'extinction des lasers avec l'acquisition vidéo a été développée.

La position relative entre les bras utilisés étant inconnue, il est nécessaire de déterminer la matrice d'interaction entre les déplacements des indices visuels dans l'image et les déplacements de l'instrument pour pouvoir réaliser un asservissement. Cette matrice d'interaction a été dans un pre-

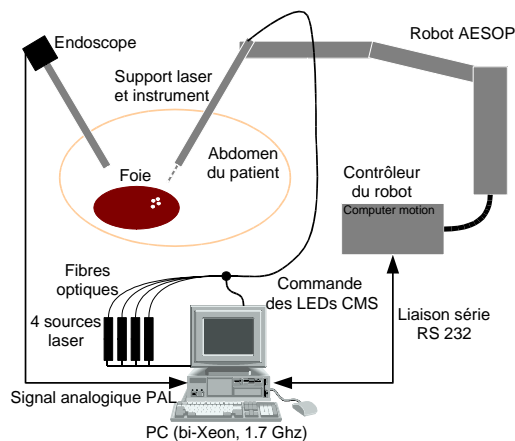


FIG. 3 – Composition du système

mier temps identifiée lors d'une procédure initiale pour un point de fonctionnement donné. Dans un deuxième temps, un algorithme d'identification en ligne a été mis en place pour réaliser une commande adaptative, de manière à tenir compte des variations de la matrice d'interaction si la caméra endoscopique change de position.

La caméra étant monoculaire, il manque la notion de profondeur pour reconstruire l'information tridimensionnelle complète entre l'outil et l'environnement. Pour résoudre ce manque d'information, l'utilisation de marqueurs visuels fixés sur l'outil chirurgical et leur projection dans l'image permettent de reconstruire la distance relative entre l'outil et l'organe. Cette mesure de la distance et l'image des spots laser permettent alors de placer automatiquement, par asservissement visuel, l'instrument à une position 3D indiquée par le chirurgien.

Ce travail a été mené dans le cadre d'un projet en partenariat avec l'Institut de Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif (IRCAD) à Strasbourg où est installé un système robotique pour la chirurgie laparoscopique de la compagnie américaine Computer Motion. Celle-ci a mis à notre disposition, depuis janvier 2001, un bras manipulateur chirurgical AESOP pour pouvoir expérimenter les différents travaux, lesquels ont été validés avec succès au cours d'expériences en conditions réelles au bloc opératoire de l'IRCAD.

Références

- [1] A. Krupa, J. Gangloff, C. Doignon, M. de Mathelin, G. Morel, J. Leroy, L. Soler et J. Marescaux., Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing, *IEEE Transactions on Robotics and Automation : special issue on Medical Robotics*, à paraître (octobre 2003).

Dermarob : robot de prélèvement cutané

G. Duchemin¹, É. Dombre¹, F. Pierrot¹ et P. Poignet¹

¹Laboratoire d'Informatique, Robotique et Microélectronique de Montpellier
LIRMM / CNRS – UMR 5506
161, Rue Ada
34392 Montpellier Cedex 5
{dombre, duchemin, pierrot, poignet}@lirmm.fr

Résumé

Nous exposons dans cette démonstration une nouvelle application robotisée en chirurgie réparatrice des grands brûlés. Le système présenté est un bras dont l'architecture géométrique et le contrôle en effort permettent de réaliser le prélèvement de peau, depuis la mise en contact de l'outil de découpe jusqu'au dégageement de celui-ci après prélèvement, le médecin supervisant le bon déroulement de l'opération.

Mots Clefs

Prélèvement de peau, contrôle en effort, dermatome, architecture SCARA.

1 Introduction

Le prélèvement cutané en vue d'une greffe ou d'une mise en culture est une opération délicate nécessitant de la part du spécialiste qui la pratique une grande précision du geste. Il s'agit en effet de prélever un greffon de peau dont la largeur et l'épaisseur dépendent d'un outil motorisé, appelé dermatome : la largeur du greffon prélevé est imposée par la largeur de la tête du dermatome, tandis que l'épaisseur est réglable avec une molette. Afin d'obtenir des résultats esthétiquement satisfaisants, l'épaisseur – quelques dixièmes de millimètre – et la largeur du greffon doivent être régulières, ce qui implique l'application d'un effort constant tout au long du mouvement.

L'importance de l'effort appliqué – cet effort peut atteindre une centaine de Newtons – normal au plan de la peau et la direction variable de celui-ci au cours du mouvement (lors d'un prélèvement sur la tête par exemple) font de cette opération une tâche pénible que seuls les praticiens expérimentés sont capables actuellement de réaliser correctement, assurant ainsi une cicatrisation rapide de la plaie. Ceci leur permet d'envisager des prélèvements successifs au même endroit dans le cas de personnes sévèrement brûlées. Pour des praticiens travaillant dans le domaine de l'orthopédie par exemple, cette opération n'est pas couramment effectuée et le geste médical n'est pas totalement maîtrisé. La complexité et la pénibilité de cette tâche ont justifié l'étude et la réalisation d'un robot de prélèvement cutané capable de prélever des bandes de peau sur le patient de façon automatique [1].

2 Présentation du système Dermarob

Le projet arrivé à son terme, a permis de développer un prototype avec la société SINTERS (Toulouse), prototype dont les principales caractéristiques sont résumées Tab. I. Ce robot est constitué (Fig. 1) :

- d'un bras de type dit SCARA possédant six degrés de liberté. Sa particularité est de posséder un Modèle Géométrique Inverse (MGI) analytique malgré un poignet à axes non concourants, sans singularité dans l'enveloppe de travail,

Architecture Géométrique		PRR-RRR	
	r_1	400 mm	(100 mm/sec)
	α_2	240°	(10 °/sec)
Plage angulaire (Vitesse maximale)	α_3	300°	(15 °/sec)
	α_4	440°	(60 °/sec)
	α_5	140°	(60 °/sec)
	α_6	150°	(80 °/sec)
Vitesse maximale		100 mm/sec	
Charge et moment maximal		130 N / 25 Nm	
Répétabilité selon z		0,1 mm	
Résolution		0,02 mm	
Poids	Bras	55 Kg	
	Contrôleur mobile	200 Kg	

TAB. I – Spécifications du robot



FIG. 1 – Robot Dermarob

- d'une baie de commande intégrée sur un chariot mobile sur lequel est aussi monté le bras. Cette baie contient toute l'électronique et l'informatique nécessaires au fonctionnement du système,
- d'une interface homme-machine permettant au praticien de commander ce système robotique complexe avec un minimum de boutons et de connaissances techniques,
- d'un capteur d'efforts six axes, placé en bout de bras à l'extrémité du poignet, permettant le contrôle de l'effort exercé sur la peau par le bras lors du prélèvement. En plus de ce capteur d'effort, un télémètre laser est monté au-dessus du dermatome pour mieux contrôler son assiette.

3 Validations expérimentales

Le prototype réalisé a été testé en 2002 avec succès sur porcs anesthésiés au Laboratoire de Chirurgie Expérimentale de la Faculté de Médecine de Montpellier sous contrôle d'un personnel qualifié (anesthésiste et chirurgien du Service des Brûlés de l'hôpital Lapeyronie). L'animal est au préalable endormi par anesthésie générale, puis étendu sur un flanc : les prélèvements sont principalement effectués sur les cuisses, le dos et le thorax.

Le chirurgien apprend dans un premier temps au robot les situations initiale, intermédiaire et finale du mouvement sur la peau (Fig. 2) : le bras est alors comme un pantin et le chirurgien le manipule par la poignée du dermatome tout en maintenant appuyée avec le pied une pédale « homme-mort ». Une fois la séquence d'apprentissage validée, le praticien sélectionne un effort à appliquer par le robot tout au long du prélèvement et dès lors qu'il appuie sur la pédale « homme-mort » le prélèvement commence, comme indiqué aux Fig. 3 et 4.



FIG. 2 – Apprentissage du robot par le chirurgien

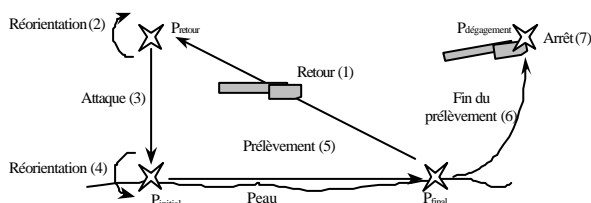


FIG. 3 – Différentes phases du mouvement



FIG. 4 – Prélèvement avec le robot

4 Conclusion

Les performances du système se sont révélées être équivalentes à celles du chirurgien (Fig. 5) ; une étude histologique est en cours pour comparer quantitativement les résultats. Afin d'adapter le comportement de la commande en effort aux caractéristiques biomécaniques de la peau du patient, un modèle de peau est actuellement à l'étude : un protocole clinique avant le prélèvement permettra ainsi de régler de manière automatique la pression à exercer (sélectionnée à l'heure actuelle manuellement par le chirurgien), d'ajuster les gains du contrôleur et, à plus long terme, de faire évoluer la loi de commande en effort externe vers une commande référencée modèle.



FIG. 5 – Greffon de peau obtenu avec le robot

Remerciements

Ce projet s'est déroulé en étroite collaboration avec le Service des Brûlés du CHU Lapeyronie de Montpellier (Dr. L. Téot). Il a été en partie financé par le "Ministère de l'Éducation Nationale et de la Recherche" et la "Région Languedoc-Roussillon" dans le cadre d'un contrat de plan État-Région (1999-2001) et par le CNRS (thèse BDI cofinancée de G. Duchemin).

Références

- [1] É. Dombre, G. Duchemin, P. Poignet and F. Pierrot, "Derma-robot: a safe robot for reconstructive surgery," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Special Issue on Medical Robotics, à paraître, octobre 2003.

TAIPAN : un véhicule sous-marin autonome (AUV)

Jouvencel Bruno

LIRMM

161 rue Ada 34392 Montpellier
jouvencel@lirmm.fr

Résumé

Une présentation rapide est faite du véhicule TAIPAN, véhicule sous-marin expérimental du LIRMM.

Mots Clef

Robotique mobile sous-marine, navigation, positionnement, inspection de source sous-marine, suivi de pipeline.

1 Introduction

TAIPAN est un véhicule sous-marin totalement autonome. Autonomie de déplacements grâce à des batteries qui lui permettent de réaliser des parcours de l'ordre de 17 kilomètres. Autonomie pour la navigation, grâce à son pilote automatique, Taipan peut se mettre en plongée avec la possibilité de conserver son assiette constante, l'inclinaison du véhicule étant alors de l'ordre du degré. Taipan peut naviguer sous la houle ou prêt de la surface, plonger jusqu'à 300 mètres de profondeur et effectuer tout type de trajectoire comme suivre le fond.



FIG. 1 – TAIPAN en plongée

Naviguer nécessite de déterminer sa position, trois techniques ont été développées : Taipan en remontant à la surface, se positionne à l'aide de son système GPS (système de positionnement par satellites). En cours de plongée le GPS devenant inopérant sous l'eau, Taipan calcule en permanence ses déplacements à l'aide des informations délivrées par des capteurs d'accélération, de

vitesse et d'inclinaison ; un compas magnétique lui fournit sa direction par rapport au champ magnétique terrestre, un capteur de pression enfin lui permet de connaître sa profondeur d'immersion. Taipan peut encore déterminer sa position par rapport à une balise acoustique immergée sous l'eau et cela grâce à un calcul mathématique complexe [Bac03].



FIG. 2 – Modem acoustique, antennes GPS et radio, capteur de Température, salinité.

Taipan doit pouvoir communiquer avec une station sous-marine ou une station située en surface pour cela, il possède un modem acoustique d'une part et une radio ne fonctionnant qu'en surface.

L'utilité de Taipan est d'être capable d'embarquer des capteurs de mesures physico-chimique comme la température, la salinité, la conductivité par exemple ou d'embarquer des capteurs acoustiques pour cartographier les fonds sous marins. Les données collectées sont mémorisées dans Taipan.

2 Architectures matérielle et logicielle

2.1 Description matérielle

Taipan est un véhicule sous-actionné, une hélice assure le déplacement principal axial, ses changements de cap sont obtenus par une gouverne de cap située à l'arrière. Pour obtenir les changements d'immersion, deux jeux de gouvernes l'un situé à l'arrière le second à l'avant, permet de réaliser des plongées en mode dit "yoyo" ou en conservant une assiette quasi-constante. Le jeu de

gouvernes situé à l'avant confère à cet engin de type "torpille", des capacités de plongée à partir de la surface.

2.2 Architecture logicielle

Le contrôle en immersion et en cap est réalisé à l'aide d'un contrôleur du type 'Sliding Mode'. Les propriétés de robustesse de ce type contrôleur, permettent de palier les erreurs de modélisation principalement dues à la méconnaissance de paramètres hydrodynamiques du véhicule. Sur la figure 3, nous donnons un exemple de tenue d'immersion.

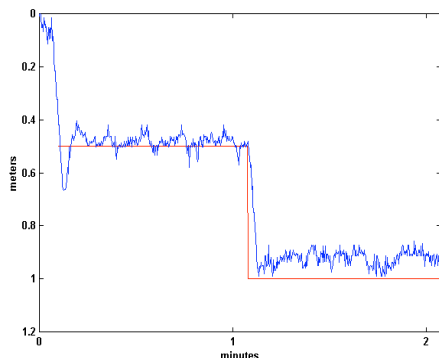


FIG. 3 – Tenue en immersion

Toute mission en mer, est précédée d'études en simulation à l'aide d'un simulateur hydrodynamique que nous avons développé.

3 Travaux en cours et futurs

Pour illustrer nos travaux, nous donnons deux exemples concrets d'utilisation de Taipan : la détermination du débit d'une source d'eau douce sous-marine et l'inspection d'un pipeline [Bak03].

La zone de résurgence d'une source d'eau douce, se traduit par la formation d'un panache dans lequel la salinité et la température varient en fonction de divers paramètres dont le débit de la source elle-même. A partir de l'obtention d'une carte 3D de ces 2 paramètres que sont la salinité et la température, les modélisateurs espèrent pouvoir en déduire le débit (cf. figure 4).

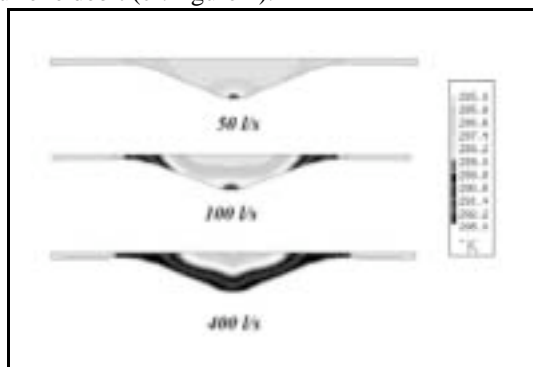


FIG. 4 – Champ de températures sur la source de la Vise dans l'étang de Thau en fonction du débit.

L'inspection de pipeline (figure 5) consiste à déterminer deux types d'accidents : le recouvrement du pipeline par des sédiments ou du sable ou au contraire de déterminer les zones où le pipeline ne repose plus sur le fond. Pour ce type d'inspection, il est en outre nécessaire de photographier les points d'ancrage du pipeline. Tout cela, Taipan doit pouvoir le réaliser de façon automatique et «intelligente» afin de minimiser la quantité de données à mémoriser.

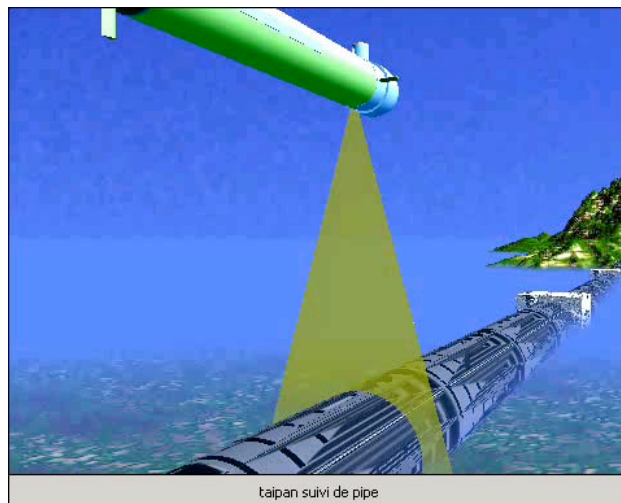


FIG. 5 – Suivi de pipeline

Ces deux applications en cours de développement, nécessitent des capteurs trop volumineux pour l'actuel appareil aussi, un nouveau prototype pré-industriel est en cours de développement. Cette opération est supportée par le conseil régional du Languedoc Roussillon est effectuée dans le cadre d'un transfert de technologie vers une PME Montpelliéraine Hytex T.

Ce appareil sera équipé de nouveaux capteurs: un loch doppler, un sonar latéral, un sonar à balayage entre autre. Une conception plus actualisée de son système informatique et enfin un nouveau contrôleur basé sur le sliding mode d'ordre supérieur.

Références

- [1] M. Bakalowicz, B. Jouvencel and al. : Coastal karst aquifers in Mediterranean regions. A methodology for exploring, exploiting and monitoring submarine springs. *TIAC03*, Alicante Spain, March 2003.
- [2] P. Baccou, B. Jouvencel, Simulation results, Post-processing experimentations and comparisons results for navigation, homing and multiple vehicles operations with a new Positioning method using one transponder, *IROS 2003*, Las Vegas USA October 2003.

Commande de la posture du robot Hylos

Christophe Grand, Faïz BenAmar, Frédéric Plumet et Philippe Bidaud

Laboratoire de Robotique de Paris
Université Pierre et Marie Curie, CNRS

Résumé

L'objet de cette démonstration est de présenter les capacités de locomotion et de reconfiguration du robot Hylos. Le robot Hylos est un prototype de système de locomotion à haute mobilité, il possède des mobilités internes permettant de commander sa posture. La reconfiguration intègre la commande des mobilités internes et vise à contrôler la posture du robot autour d'une posture désirée. Les lois de commande s'appuient sur le modèle cinématique du robot Hylos. Ces lois de reconfiguration sont mises en œuvre sur le robot lors de son déplacement sur un terrain irrégulier.

Mots Clef

Haute mobilité, commande, posture, Hylos.

1 Description de Hylos

Cette démonstration présente les capacités de reconfiguration et de commande de posture du robot Hylos lors de son déplacement sur des terrains de géométrie complexe.

Le robot Hylos mesure environ 60 cm de long pour un poids de 12 kg. Ce robot est une plate-forme expérimentale à 4 roues-pattes possédant au total 16 degrés de liberté commandés. Chaque patte possède 2 liaisons pivot à axes parallèles, actionnées par des mécanismes pantographiques, et dispose à son extrémité d'une roue motrice et directrice (fig.1).



FIG. 1 – Le robot Hylos

Ce robot est équipé de 2 inclinomètres mesurant les angles de roulis et de tangage de la plate-forme et de quatre capteurs d'effort 3 axes, intégrés dans chaque

patte, pour la mesure des efforts d'interaction roue-sol. La commande des 16 ddl du robot est distribuée sur une structure de contrôle multi-processeurs permettant de distinguer les commandes bas-niveau de chaque patte de la commande haut-niveau de l'ensemble.

Les commandes bas-niveau sont présent en charge par un microcontrôleur MPC555 qui assure la commande en position et en vitesse des paramètres articulaires de chaque patte. Le contrôle haut-niveau repose sur la mise en oeuvre d'un PC embarqué au format PC104. Il assure le contrôle de la posture du robot en s'appuyant sur la mesure des angles de roulis-tangage et des efforts au contact. Il génère les consignes de position et de vitesse articulaires de chaque patte. La communication entre les deux niveaux hiérarchiques est assurée par un bus CAN.

2 Commande de la posture

La loi de commande s'appuie sur le modèle cinématique du robot Hylos. Le modèle cinématique du robot Hylos et les algorithmes de commande de la posture sont présentés dans l'article¹ des actes de ces journées. L'objet de cette commande est d'asservir la posture du véhicule autour d'une posture désirée lors de son évolution sur des terrains irréguliers.

Le degré de mobilité générale du système ($m=10$) correspond aux 10 paramètres commandables qui se divisent en deux parties : l'une propre au suivi de trajectoire et l'autre associée au contrôle de posture. Les paramètres cinématiques de suivi de trajectoire sont les vitesses (V_x, V_y, ω_z) exprimées dans le repère du véhicule. Les autres mobilités cinématiques $(\omega_x, \omega_y, V_z, \dot{x}_i)$ autorisent la commande des paramètres de posture \mathbf{p} qui sont les angles de roulis et de tangage (φ, ψ) , la garde au sol (z_g) et les 4 demi-empattements au niveau de chaque patte $(x_i, i = 1..4)$.

La posture désirée \mathbf{p}^* est définie en considérant le problème de l'optimisation combinée de la distribution des charges et de la stabilité mécanique du système.

La posture est contrôlée en commandant les vitesses

¹Faïz Ben Amar, Christophe Grand, Frédéric Plumet et Philippe Bidaud, *Optimisation et contrôle de la configuration d'un rover articulé*

articulaires de chaque patte de manière à imposer une vitesse de reconfiguration de la plate-forme $(\omega_x, \omega_y, V_z, \dot{x}_i)$. Cette vitesse de reconfiguration est calculée dans une boucle d'asservissement avec un simple correcteur de type proportionnel :

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{K}(\mathbf{p}^* - \mathbf{p})$$

La mesure de \mathbf{p} est assurée par les inclinomètres et les capteurs articulaires. La vitesse de reconfiguration de plate-forme est alors calculée en intégrant le découplage cinématique sur les vitesses de roulis et de tangage $(\omega_x, \omega_y, V_z, \dot{x}_i) = f(\dot{\mathbf{p}}, \mathbf{p})$.

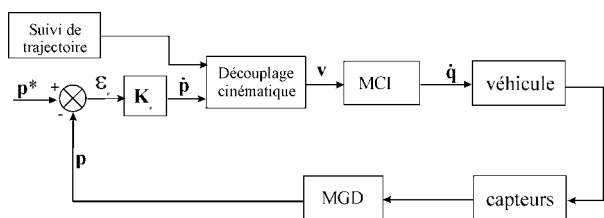


FIG. 2 – Schéma général de la commande de posture

3 Résultats

La commande de posture a été évaluée pour des déplacements sur un terrain irrégulier. Ce terrain consiste en une succession de pentes d'inclinaison variable (voir figure 3). Le contrôle du suivi de trajectoire ne fait pas l'objet de cette manipulation. Ainsi, le robot se déplace en ligne droite avec une vitesse constante suivant une direction orientée d'un angle θ par rapport à la ligne de plus grande pente. Ceci permet d'intégrer des pentes présentant à la fois des angles de roulis et de tangage.

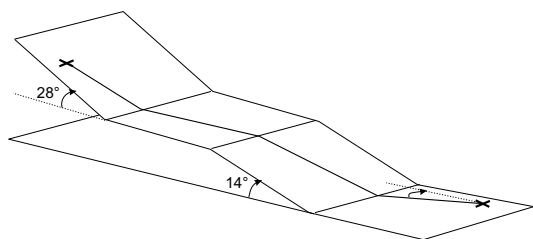


FIG. 3 – Configuration du terrain d'expérimentation

Les figures 4 et 5 montrent l'évolution des angles de roulis et de tangage au cours du déplacement du robot avec et sans commande de la posture. L'erreur maximale sur les angles de tangage et de roulis est respectivement de 6° et 5° alors qu'elle atteint la valeur d'environ 30° et 10° sans la commande de posture. Ces expériences permettent de montrer et de valider la faisabilité des lois de commande.

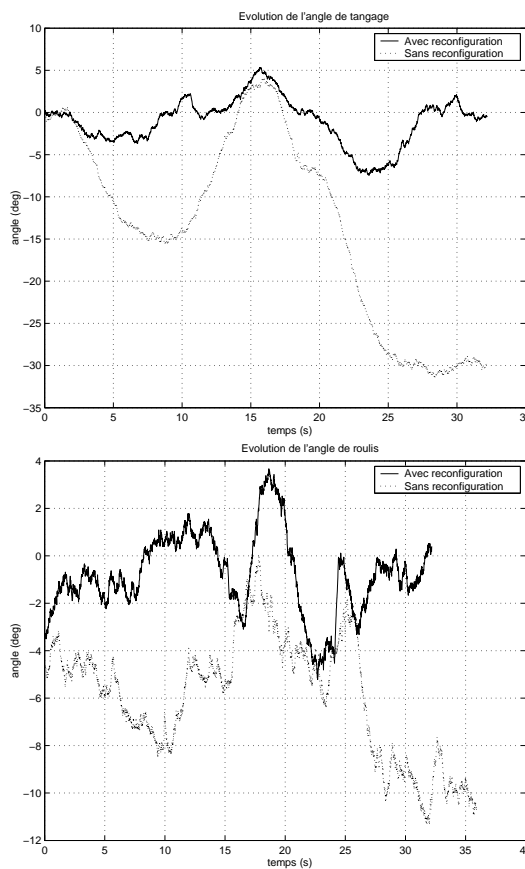


FIG. 4 – Evolution de l'angle de roulis-tangage avec ou sans contrôle de posture

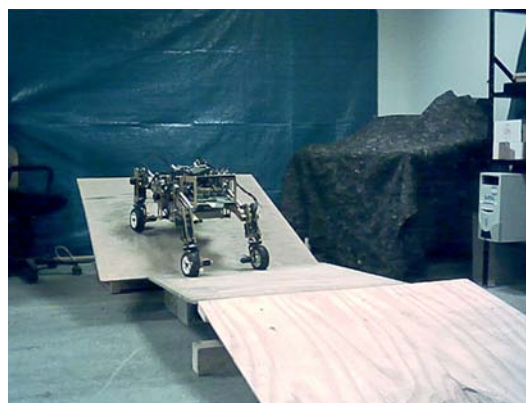


FIG. 5 – Evolution du robot hylos sur un terrain irrégulier

Suivi automatisé de véhicules

Joël G. MORILLON¹ Laurent VASSEUR¹ François USEO¹
 Vincent MARION¹ Jérôme DENTO¹ Nourrdine CHERFAOUI¹

¹Thales Systèmes Aéroportés
 EM/ROB – CN300
 2, Avenue Gay-Lussac
 78851 Elancourt Cedex

joel-g.morillon@fr.thalesgroup.com

laurent.vasseur@fr.thalesgroup.com

francois.useo@fr.thalesgroup.com

vincent.marion@fr.thalesgroup.com

jerome.dento@fr.thalesgroup.com

nourrdine.cherfaoui@fr.thalesgroup.com

Résumé

Cette fiche a pour but de présenter succinctement le rôle de Thales Airborne Systems France (TASFR) dans le domaine de la robotique mobile et de situer la démonstration de Suivi Automatisé de Véhicules qui sera présentée à l'occasion des JNRR03.

Mots Clef

Leader-follower, Laser, Suivi, Perception.

1 Introduction

Thales Airborne Systems France (TASFR) est un « Business Groups » de THALES, l'un des principaux fournisseurs internationaux de solutions de Défense.

Dans ce cadre, TASFR intègre un département entièrement tourné vers la conception, le développement et l'expérimentation de Systèmes Robotisés destinés à améliorer l'efficacité opérationnelle des missions de coercition, de maintien de la paix ou à caractère humanitaire.

Dans cette finalité, TASFR utilise une compétence reconnue de « Systémier », lui permettant de proposer aux utilisateurs militaires des applications fiables et abouties de la robotique mobile, en dépit de contraintes très exigeantes ; les aspects liés à la sûreté de fonctionnement des systèmes robotisés, à la cohérence de leur architecture, et plus généralement à leur robustesse, constituent le principal guide de la démarche suivie.

TASFR développe et améliore en continu des « fonctions robotiques » exploitant l'état de l'art existant, afin d'amener les futurs robots militaires au niveau de crédibilité compatible de leur finalité opérationnelle. Pour cela, TASFR collabore avec de nombreux laboratoires et industries du domaine, afin de définir, adapter, intégrer et expérimenter les fonctions spécifiques de la robotique qui contribueront à satisfaire les besoins opérationnels recensés. A titre d'illustration, on peut citer des travaux de TASFR menés pour la DGA en « Suivi de Chemin » (avec LASMEA, LIVIC, CMM), « Suivi de Véhicule »,

« Etudes de Concept diverses » (LAAS, LRV), ... et d'autres sur fonds propres Thales, par exemple en « Apprentissage Supervisé » (avec LIP6) ou en « Mobilité Autonome sur terrain non structuré », ...

TASFR mène également ses propres développements algorithmiques pour répondre à des thématiques très spécifiques, notamment lorsqu'elles ne sont pas abordées par la communauté scientifique. TASFR dispose ainsi d'une compétence reconnue en mobilité semi-autonome sur terrain non structuré (contrôle dynamique de véhicules lourds, désignation visuelle et ralliement de way-points, hybridation inertielle-GPS, ...).

2 PEA Robotique

Dans le cadre rappelé précédemment, TASFR a pour principal client les Services de Programme de la DGA (Délégation Générale pour l'Armement). TASFR a notamment été retenu pour assurer la Maîtrise d'œuvre du Programme d'Etudes Amont (PEA) Robotique : Ces travaux dédiés aux SRC (Systèmes Robotisés de Combat), visent à combler les lacunes mises en évidence sur les démonstrateurs existants et à compléter leurs fonctions actuelles avant d'envisager une éventuelle production en série. Pour cela, une quinzaine d'études réparties sur 5 ans (2000-2004) permettent d'aborder des thèmes aussi divers que « les IHM », la « préparation de mission », « la sûreté de fonctionnement », « la détection et synthèse de pannes », « l'évitement d'obstacle », « le rejeu de trajectoire », « le suivi de chemin », etc.

Le « suivi de véhicule » (« Leader-Follower ») constitue l'une des autres fonctions développées dans ce cadre, qui a fait l'objet d'une implémentation sur les véhicules Mercedes 4x4 constituant le système DARDS (voir ci-dessous) : Il s'agit de la démonstration proposée par la DGA et TASFR à l'occasion des JNRR03.

3 Démonstration de « leader-follower »

Deux modes distincts de suivi de véhicule ont été mis au point : le premier appelé « Suivi Immédiat » est basé sur la *perception* par chaque suiveur de son prédécesseur ;

dans ce mode, le suiveur exécute la trajectoire qu'il a reconstruite en exploitant sa *perception* du mouvement relatif du véhicule à suivre.

Le second mode, baptisé « **Suivi Différé** », s'appuie sur les moyens de *localisation* internes au véhicule à suivre : sa trajectoire est enregistrée, puis transmise au suiveur qui la rejoue à l'identique ; les deux véhicules n'ont pas besoin d'être en vue directe (au sens perception du terme).

Les travaux ont mis l'accent sur la robustesse et la précision des deux implémentations, et permettent désormais de disposer alternativement de deux modes de suivi affichant des performances satisfaisantes dans un cadre opérationnel. Les réflexions vont se poursuivre en étudiant notamment la possibilité d'une transition continue (assimilable à une fusion) entre le mode de suivi par *perception* et le mode de suivi par *localisation*, selon le type et la qualité des données accessibles à l'instant courant.

La démonstration proposée aux JNRR03 se focalisera sur le Suivi Immédiat ; les données de perception du prédécesseur seront exclusivement fournies par un capteur de type nappe laser SICK LMS221 ; l'exploitation de moyens de vision a été volontairement exclu de l'approche, le « suivi par vision » étant exploré par ailleurs, mais manquant encore de maturité pour la finalité applicative visée. On disposera ainsi à l'issue du PEA d'un bilan exhaustif sur une voie exploratoire alternative, qui pourra nourrir un futur mode de suivi de véhicules exploitant une perception multi-capteurs.

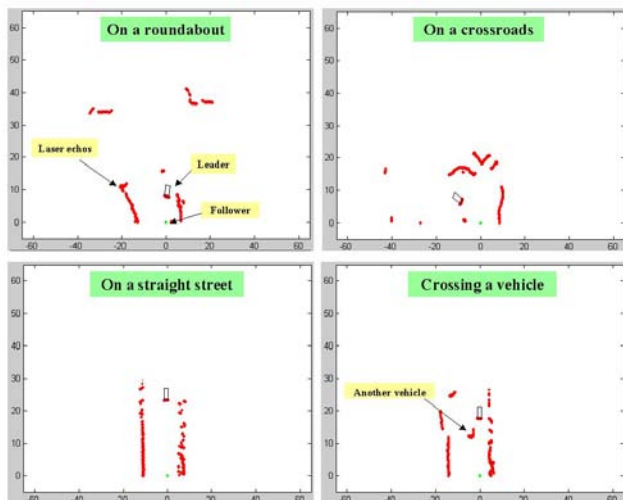


FIG. 1 – Exemples d'acquisitions laser par le suiveur

La démonstration consistera à réaliser le suivi d'un véhicule quelconque en conduite directe, non pré-équipé, par l'un des 4x4 robotisés du système DARDS.



FIG. 2 – Système DARDS

Les vitesses mises en jeu seront de l'ordre de 25 km/h, sur des trajectoires fermées d'un périmètre de quelques dizaines de mètres.

Références

- [1] J.G. Morillon, O. Lecointe, J.P. Quin, M. Tissedre, *Development of high level robotic functions for mobile combat systems*. SPIE Aerosense, Unmanned Ground Vehicle Technology V, 21-25 April 2003, Orlando, Florida
- [2] F. USEO, PEA Robotique, Etude TEL-1 *Robot Suiveur*, Rapport de définition. Ref. TASFR DEX 00020197, Avril 2001.

Guidage latéral d'un véhicule urbain électrique de type Cycab, à partir des informations fournies par un récepteur GPS cinématique.

J. Bom

B. Thuilot

F. Marmoiton

P. Martinet

LASMEA - UMR 6602 du CNRS
24, av. des Landais
63177 Aubière Cedex
nom.prenom@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé

L'objectif de ces 2 pages est tout d'abord de présenter comment s'intègre le guidage par GPS cinématique au sein des projets qui mettent en avant les véhicules urbains électriques. Le principe de la loi de guidage est ensuite décrit. Enfin, des expérimentations, similaires à celles qui seront présentées lors des JNRR'03, sont reportées.

1 Introduction

Pour le déplacement des personnes sur un site de grande amplitude (site industriel, parc d'attraction, parc d'exposition, . . .) ou dans le centre des grandes villes, une offre de transport très attractive serait la mise à disposition d'une flotte de véhicules automatisés. L'intérêt de cette solution est qu'elle fournit une parfaite flexibilité dans le temps et dans l'espace : l'utilisateur se présentant à l'entrée de la zone équipée peut démarrer son trajet *instantanément*, et se rendre *directement* à la destination qu'il souhaite.

Pour ce type d'application, il paraît naturel de se tourner vers des *véhicules électriques* : cela permet de réduire significativement les nuisances sur l'environnement, en terme de pollution directe et de bruit. La limitation habituelle de ces véhicules, à savoir leur autonomie, n'est pas un obstacle ici, étant donné le rayon d'action demandé.

Pour concrétiser ces applications, l'un des points durs sur un plan à la fois technique et théorique, est d'assurer la *navigation autonome* de ces véhicules, soit pour amener l'utilisateur à destination, soit pour ramener les véhicules à une gare où ils seront remis en charge dans l'attente d'une nouvelle utilisation. Parmi les capteurs permettant de localiser un véhicule en temps réel, le *GPS cinématique* est particulièrement attrayant : au vu de sa précision tout d'abord, puisqu'il fournit une localisation absolue précise au centimètre ; au vu de sa flexibilité ensuite, puisque spécifier un itinéraire sur une carte préalablement numérisée est immédiat ; au vu de sa facilité de mise en œuvre enfin, puisqu'il n'est pas nécessaire d'équiper l'environnement (comme par exemple avec des balises) ce qui peut être coûteux et parfois disgracieux dans le paysage. Ce capteur peut être utilisé sur des sites industriels ou des parcs, mais pas, c'est là sa grande restriction, dans des zones fortement

urbanisées, tels certains centre-villes, où les signaux satellites seraient fréquemment masqués par les bâtiments.

Le guidage latéral de véhicules urbains électriques au moyen d'un capteur GPS cinématique est abordé au LASMEA depuis 2002. Les expérimentations présentées lors des JNRR'03 seront réalisées avec l'un des 2 véhicules de type "Cycab", voir Figure 1, dont s'est doté le laboratoire.



FIG. 1 – Véhicule urbain électrique "Cycab"

Le guidage complet "latéral+longitudinal" au moyen d'un GPS cinématique est en cours d'étude. Le point dur est de préserver la précision du guidage lors de l'arrêt du véhicule. En parallèle, le guidage de ces véhicules au moyen de capteurs de vision est également développé au LASMEA. Les informations fournies par ces capteurs sont particulièrement riches dans les zones fortement urbanisées (arêtes de bâtiments, textures, . . .), précisément celles où le GPS cinématique ne peut être utilisé. Des capteurs de vision traditionnels, et plus récemment omnidirectionnels, sont envisagés, complétés par des odomètres et/ou un GPS métrique lorsque l'utilisation de ce dernier est possible. Enfin, un axe de recherche récent au LASMEA porte sur le guidage d'un convoi de véhicules urbains. L'intérêt pratique de ce mode de fonctionnement est par exemple le réacheminement automatique des véhicules, d'une gare vers une autre, en fonction de la demande.

2 Loi de commande latérale

La commande latérale de véhicules au moyen d'un GPS

cinématique fait l'objet d'une collaboration entre le LAS-MEA et le Cemagref depuis 1998. La loi de commande a été développée et éprouvée sur le cas de véhicules agricoles (moissonneuse-batteuse et tracteur), mais a pu être portée et validée sans difficulté sur les véhicules "Cycab".

La loi de commande a été développée à partir d'un *modèle d'évolution cinématique* du véhicule, construit sous l'hypothèse d'un roulement sans glissement des roues sur la chaussée. Cette approche est tout à fait légitime dans le cas d'un Cycab évoluant sur de l'asphalte à une vitesse maximale de 18 km.h^{-1} : les phénomènes dynamiques, y compris les glissements, peuvent être négligés.

Le modèle d'évolution du Cycab est fortement non-linéaire, mais, comme pour la plupart des modèles cinématiques de robots mobiles, on montre que c'est un *modèle chaînable* (cf. [1] par ex.) : par une transformation non-linéaire d'état et de commande, il peut sans aucune approximation être ré-écrit comme un système linéaire. Les outils de l'Automatique linéaire peuvent alors être utilisés, et on en déduit la loi de commande non-linéaire à appliquer sur les actionneurs du véhicule en inversant les transformations d'état et de commande (inversibles tant que la vitesse du véhicule est non nulle, et que l'écart angulaire à la trajectoire est différent de $\pi/2$ [π]). Les détails sur la synthèse de la loi de commande sont fournis dans [2].

Cette loi de commande latérale permet de faire suivre au véhicule une trajectoire quelconque (puisque la courbure de la trajectoire de référence est prise en compte au sein de la loi de commande), avec des performances indépendantes de la vitesse (on spécifie une distance de convergence vers la trajectoire, et non un temps de convergence). Enfin, d'un point de vue pratique, la position du véhicule est fournie directement par le GPS cinématique, alors que son orientation est estimée via un reconstructeur de Kalman à partir des vitesses fournies par ce même capteur.

3 Résultats expérimentaux

Le véhicule expérimental "Cycab", présenté sur la Figure 1, a été développé et commercialisé par la société Robosoft. Il peut transporter 2 personnes à une vitesse maximale de 18 km.h^{-1} . Pour cela, il est mû par 4 moteurs à courant continu de 1 kW, alimentés par 4 batteries plomb lui assurant une autonomie minimum de 2 heures. Chaque roue peut être directrice, mais lors des expérimentations, l'orientation des roues arrière a été bloquée afin que le Cycab présente la même mobilité qu'une voiture. Sur un plan informatique, les lois de commande ont été implantées en langage C++ sur un PC Pentium 4 cadencé à 1.7 GHz, utilisant un système d'exploitation Linux Red Hat 8.0. Les aspects temps-réel (synchronisation de la réception des trames GPS, du calcul de la commande, et de son envoi vers les actionneurs) sont gérés par un module RTAI.

Le GPS cinématique est un équipement "Aquarius 5002" commercialisé par Thalès Navigation. Il fournit la position absolue du véhicule avec une précision de 2 cm, à une fréquence de 10 Hz. Il fournit également son vec-

teur vitesse, utilisé dans notre application pour déterminer l'orientation du véhicule.

Les résultats expérimentaux présentés sur la Figure 2 ont été obtenus sur le campus universitaire des Cézeaux à Clermont-Ferrand. Ils ont été réalisés sur un sol en gravier, montant légèrement. La trajectoire de référence comporte une première partie rectiligne, poursuivie par une ligne courbe, comme décrit sur la Figure 2. Le Cycab est initialement positionné à 60 cm à côté de cette référence. Enfin, les gains de la loi de commande ont été réglés afin d'imposer une distance de convergence de 15 m.

Sur la Figure 2, on constate que le Cycab roule 15 m avant de rejoindre la trajectoire de référence, comme attendu, puis suit cette dernière parfaitement : les 2 tracés sont superposés sur la partie rectiligne (la précision de guidage est de l'ordre de 3 cm, i.e. \approx la précision du GPS). Une légère erreur ré-apparaît dans la partie courbe. Elle découle principalement du retard introduit par l'estimation de l'orientation du véhicule, ici nécessaire, puisque le GPS cinématique ne fournit pas directement cette variable. C'est la principale faiblesse de notre approche mono-capteur. Nous travaillons à réduire cette erreur (12 cm au max.), qui reste cependant compatible avec de nombreuses applications. Des démonstrations équivalentes seront présentées lors des JNRR'03, et ont été reportées dans [3].

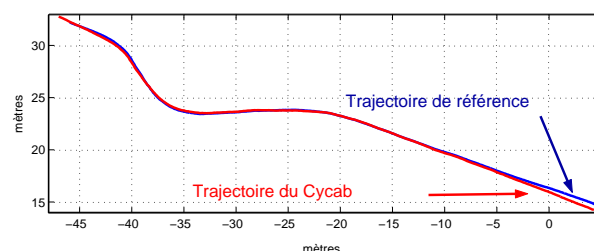


FIG. 2 – Trajectoire de référence et trajectoire du Cycab

Remerciements

- Ces travaux ont bénéficié du support du Contrat de Plan Etat - Région Auvergne (CPER) 2002, axe Machines et Systèmes Performants et Intelligents (MSPI).
- Ces travaux ont également très largement bénéficié de la collaboration menée depuis 5 ans avec le Cemagref sur le guidage d'engins agricoles par GPS cinématique.

Références

- [1] Samson C. *Control of chained systems. Application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots*, In IEEE Transactions on Automatic Control vol. 40(1), pp. 64-77, Janvier 1995.
- [2] Thuilot B., Cariou C., Martinet P. and Berducat M. *Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS*, In Autonomous Robots, vol 13(1), pp. 53-71, Juillet 2002.
- [3] Thuilot B., Bom J., Cariou C. and Martinet P. *Accurate automatic guidance of an electric vehicle devoted to urban transportation, relying upon a unique kinematic GPS sensor*, soumis à 35th International Symposium on robotics (ISR), Paris, Mars 2004.

Guidage automatique de véhicules agricoles par un unique GPS cinématique en présence de glissements

R. Lenain^{1,2}C. Cariou²¹LASMEA²Cemagref

24, av des Landais, 63177 Aubière
roland.lenain@cemagref.fr

Résumé

La conduite des véhicules agricoles lors des travaux tels le semis, la pulvérisation ou l'épandage nécessite de la part de l'agriculteur un guidage très précis de sa machine de l'ordre de quelques centimètres. Les travaux actuels ont démontré que le GPS cinématique était un capteur pertinent pour réaliser un système de guidage automatique satisfaisant à de telles précisions, tant que le véhicule ne glissait pas. Toutefois certaines conditions de travail font intervenir des phénomènes de glissement, les véhicules agricoles évoluant sur des terrains offrant parfois une faible adhérence au contact pneu/sol, particulièrement lors de travaux sur les terrains en pente ou lors de l'exécution de virage. Les lois de commande sont alors perturbées et le véhicule s'écarte de sa trajectoire de référence dans des proportions non acceptables. Nous proposons ici une nouvelle loi de commande non linéaire prenant en compte le glissement afin d'asservir le véhicule à sa trajectoire de consigne avec une plus grande précision. Son efficacité, validée sur simulateur, a été expérimentée lors d'essais réels.

Mots Clef

Robots mobiles, commande non linéaire, commande adaptative, glissement, GPS cinématique, agriculture.

1 Introduction

De nombreux groupes de recherche sont impliqués aujourd'hui dans la mise au point de systèmes de guidage automatique appliqués aux véhicules agricoles. Les principaux objectifs sont de réduire la pénibilité du travail et d'accroître la rentabilité des terres en réduisant les zones de recouvrements ou de manque. Les progrès considérables en terme de précision des systèmes de localisation par GPS autorisent à l'heure actuelle un positionnement absolu de l'ordre du centimètre, ce qui fait du GPS un capteur très utilisé notamment dans le cadre de la robotique agricole où les véhicules évoluent sur de grandes étendues avec de très bonnes visibilités satellitaires. Différents systèmes de guidage utilisant ce capteur ont donc vu le jour. Certains utilisent la localisation par GPS en complément de centrales inertielle [1], d'autres mettent en place plusieurs

antennes GPS [2], ces systèmes se limitant pour l'instant au suivi de lignes droites sur des champs relativement plats.

2 Travaux antérieurs

Notre objectif est de concevoir un système de guidage automatique fiable et précis quelque soit la trajectoire à suivre (ligne droite ou courbe), quelque soit le terrain d'évolution (plat, incliné) et être indépendant de la nature du sol (terre, boue,...). Notre première approche est une approche mono-capteur afin de réduire les coûts. Nos travaux antérieurs [3] utilisent une commande non linéaire indépendante de la vitesse basée sur les systèmes chaînés. Ces travaux ont montré de très bons résultats sur des terrains plats sur un tracteur agricole (FIG 1) en suivi de trajectoires rectilignes et courbes. Cependant, dès que le véhicule entamait une courbe sur terrain humide ou évoluait sur un terrain en pente, les phénomènes de glissement apparaissaient et la précision devenait inacceptable. Les travaux présentés ici proposent plusieurs développements des lois décrites dans [3] afin de compenser les effets des glissements.



FIG. 1 – Guidage automatique d'un tracteur agricole

3 Modélisation des glissements

Une première approche permettant d'intégrer le glissement du véhicule au sein de son modèle d'évolution consiste à utiliser une modélisation dynamique. Un tel

modèle décrit de façon précise le comportement du véhicule, mais cela implique la connaissance de nombreux paramètres (matrice d'inertie de l'engin, coefficients de glissement au contact roue-sol, etc) qui évoluent suivant la configuration du véhicule et du sol. De telles structures imposent une instrumentation coûteuse à la fois en terme financier et en temps de calcul. Une autre possibilité consiste à introduire des paramètres caractéristiques du comportement du véhicule au sein du modèle cinématique. Ces paramètres "perturbateurs" permettent ainsi de décrire le mouvement du véhicule lors des phases de glissement sans avoir à manipuler des algorithmes trop lourds. Nous avons donc intégré au modèle cinématique du véhicule décrit dans [3] deux paramètres perturbateurs, l'un sur la vitesse latérale, et l'autre sur la vitesse angulaire. L'estimation en ligne de ces paramètres est réalisée par modèle interne. La même commande est envoyée au véhicule et à son modèle sans glissement : la différence entre le mouvement mesuré du véhicule et son évolution théorique nous permet d'évaluer les paramètres de glissement.

5 Loi de commande étendue

A partir de l'évaluation des paramètres de glissement et du modèle cinématique, nous pouvons estimer en ligne et de façon indépendante l'écart latéral du véhicule en présence de glissement. Une nouvelle consigne peut donc être définie afin de ramener le véhicule sur sa trajectoire de référence. Nous avons donc mis en place la commande adaptative schématisée FIG 2.

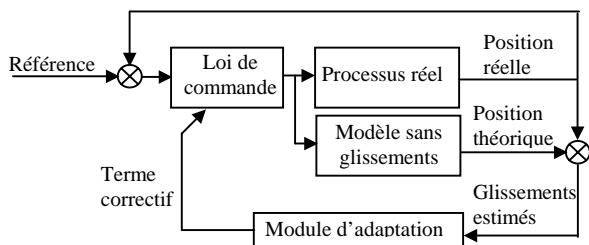


FIG. 2 – Schéma commande adaptative

Pour évaluer le terme correctif à appliquer sur l'écart latéral (module d'adaptation), deux approches ont été étudiées. La première solution consiste à simuler le comportement du modèle du véhicule avec glissement en temps réel et en parallèle du processus réel. La deuxième solution consiste à faire un calcul de convergence, c'est à dire calculer l'écart latéral du véhicule à un horizon infini pour les valeurs courantes des paramètres de glissement.

5 Résultats

Le véhicule expérimental est présenté FIG 1. Il est équipé d'une direction électro-hydraulique et d'un capteur d'angle de braquage sur la roue avant droite. Le GPS embarqué est un GPS à précision centimétrique. Lors d'un essai, nous avons demandé au véhicule de suivre en automatique une trajectoire en forme de boucle de forte courbure. La FIG 3 présente les écarts latéraux observés avec les différents lois de commande.

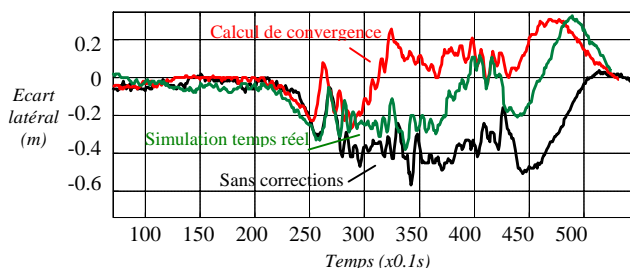


FIG. 3 – Résultat suivi d'une boucle

On constate qu'après 20s (début de la boucle), les lois de commande adaptatives permettent de corriger le véhicule pour le ramener vers un écart latéral acceptable. Un dépassement apparaît cependant en sortie de virage.

6 Conclusion et perspectives

Nous présentons ici un principe permettant de compenser les effets du glissement sur le guidage automatique appliqué à un tracteur agricole. Ses principaux avantages résident dans la conservation d'un modèle cinématique et dans le fait qu'une commande basée sur la linéarisée exacte peut être appliquée. Les perspectives sont l'étude d'une commande prédictive à horizon fini pour accroître l'efficacité du système lors de sorties de virage par exemple. Un nouveau modèle cinématique avec prise en compte du glissement est également en cours de validation expérimentale. Celui-ci est basé sur le comportement des pneumatiques plutôt que sur le comportement général du véhicule. Il introduit de nouveaux paramètres de glissement qui peuvent être intégrés dans la linéarisation exacte par chaînage du système. Le phénomène de glissement peut ainsi être directement intégré au sein même de la commande, autorisant la même rapidité que la méthode par calcul de convergence, mais avec une meilleure stabilité vis à vis des perturbations. Par ailleurs, un tel modèle s'avère beaucoup plus adapté à la mise en place de lois de commande prédictive, permettant d'éviter les dépassements lors des sauts de courbures.

Références

- [1] Y. Nagasaka, R. Oi, K. Shigeta and K. Tanikawi, *Automated operation in paddy fields with a fiber optic gyro sensor and GPS*. In proc. of the Intern. Workshop on Robotics and Automated Machinery for Bio-Productions, pp 21-26, Spain, Sept 1997.
- [2] M. O'Connor, G. Elkaim, T. Bell and B. Parkinson, *Automatic steering of a farm vehicle using GPS*. In Proc. of the 3rd Intern. Conf. On Precision Agriculture, Minneapolis (USA), pp 767-777, June 1996.
- [3] B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet and M. Berducot, *Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP-DGPS*. In *Autonomous robots* 13(1) :53-71, July 2002.

Télé-échographie Robotisée

Le projet européen OTELO et son premier démonstrateur OTELO 1

Equipe Robotique Médicale
Laboratoire Vision & Robotique
63 Av. de Lattre de Tassigny, F-18020 Bourges cedex

contact pour la présentation JNRR'03 : Cyril Novales
Cyril.Novales@bourges.univ-orleans.fr

Résumé

Cet article présente le concept de télé-échographie robotisée développé au travers du projet européen OTELO, montré lors des JNRR'03. Nous présentons les objectifs d'OTELLO et détaillons ses 3 postes clés : le poste patient (où se trouve le robot esclave), le poste expert (où se trouve l'instrument maître) et la transmission. Le démonstrateur OTELO 1 est plus particulièrement développé.

Mots Clés

Télé-échographie, robot léger dédié, commande à distance, sonde fictive.

1 Introduction

La télé-échographie robotisée est un concept qui permet à un médecin expert de manœuvrer une sonde échographique sur un patient situé à distance, pendant qu'il analyse les images échographiques qu'il reçoit en temps réel. Des médecins experts peuvent ainsi réaliser un diagnostic sur des patients éloignés qui n'ont pas localement accès à ce niveau d'expertise : soit pour des raisons d'infrastructures, soit pour des raisons d'isolement.

Le Laboratoire Vision et Robotique (UPRES 2078 de l'Université d'Orléans) est impliqué depuis 1996 dans le domaine de la robotique médicale. Un premier projet (SHISHA'98) réalisé en collaboration avec le CHU de Tours a conduit à la réalisation du robot léger "Syrtech" (fig.1a). Ce robot a été validé en 1998, lors d'une expédition au Népal [1]. Une liaison via satellite Inmarsat a permis à un médecin basé à Bourges de réaliser une échographie sur un patient situé à Katmandou [2]. Les résultats ont initié en 1999 un second projet de télé-échographie avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et la société Sintors à Toulouse. Dans ce cadre, le prototype préindustriel Teresa (fig.1b) a été conçu puis validé grâce à une liaison de type ISDN (Numeris) [3]. Après une participation dans le projet français TER en 2000, le L.V.R. est impliqué dans le projet européen Otelo avec 8 partenaires. Ce programme de 30 mois est cofinancé par la commission européenne depuis 2001.

OTELLO, (www.bourges.univ-orleans.fr/otelo/) "mObile Tele-Echography using an ultra-Light rObot" (IST-2001-

32516) a permis la réalisation du prototype OTELO 1, présenté lors de la session "Démonstrateurs".

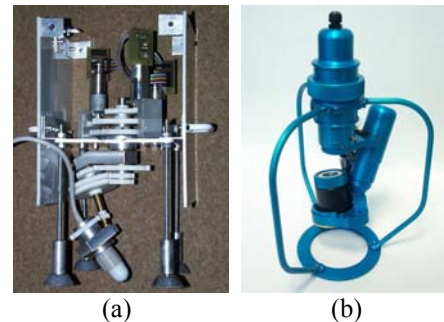


fig. 1 – les prototypes Syrtech (a) et Teresa (b)

2 Principe de la télé-échographie robotisée

L'objectif de la télé-échographie robotisée est de permettre à un médecin d'effectuer une échographie sur un patient à distance comme s'il l'effectuait classiquement dans son cabinet. Pour cela, nous définissons 3 parties : le **poste expert** où se trouve le médecin spécialiste (typiquement l'hôpital), le **poste patient** où se trouve la personne à diagnostiquer et le **medium** de transmission. Pour rendre applicable cette télé-échographie, nous avons choisi d'utiliser des media de transmission standards, et disponibles d'un point de vue technologique et économique.

2.1 Le poste expert

Le poste expert (fig.2) où se trouve le médecin, assure deux fonctions principales :

- une visualisation de l'image échographique,
- un système de commande de la sonde échographique sur le patient à distance.

Cette seconde fonctionnalité est primordiale pour le médecin car celui-ci reconstruit mentalement la zone analysée de l'organe en intégrant les mouvements de sa main sur le patient à la séquence d'images ultrasonores reçues : des images échographiques, provenant d'une sonde manipulée par quelqu'un d'autre, ne permettent pas, en général, à un médecin d'effectuer un diagnostic.



fig. 2 – Organisation au poste expert

Afin de rendre le système convivial, il est souhaitable de disposer d'une transmission audio et vidéo entre le poste expert et le poste patient. Le médecin peut ainsi observer la scène, la position du patient et diriger l'assistant près du patient. De plus, cela permet d'établir une relation quasi naturelle entre le patient et le médecin.

2.2 Le poste patient

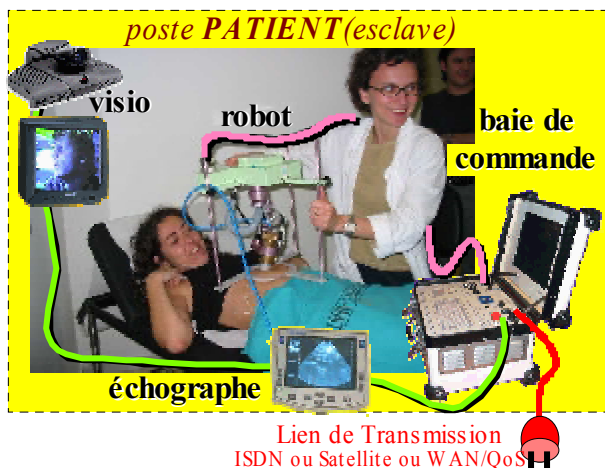


fig. 3 – Organisation au poste patient

Le poste patient (fig. 3) se trouve à distance du poste expert. Ce site distant peut être un dispensaire, le domicile du patient, un véhicule spécialisé, ou un site isolé pré-équipé en moyens de communication comme une base polaire ou la station spatiale internationale.

Ce poste patient doit disposer d'un robot permettant de bouger et d'orienter la sonde d'un échographe sur le corps du patient en fonction des consignes de l'expert.

Ce robot doit être spécifique et très léger, afin de pouvoir être positionné et maintenu par l'assistant paramédical et répondre aux normes sanitaires.

La baie de commande du robot doit être elle aussi légère et transportable, de même que l'échographe. La légèreté du robot alliée à la convivialité amenée par un système de transmission audio et vidéo permet au patient de ne pas voir le robot comme une machine aveugle mais comme un outil prolongeant le geste du médecin.

2.3 La transmission

La télé-échographie est très fortement dépendante du medium de transmission entre le site expert et le site patient. Les débits conditionnent la qualité de l'examen :

- pour la commande d'un robot 6 d.d.l. une dizaine de kb/s peuvent suffire, cependant le suivi de trajectoire est très sensible aux retards, surtout s'il existe un retour de force ;
- par contre, les images échographiques nécessitent un important débit, notamment pour garder une résolution et un rafraîchissement de l'image suffisant pour permettre au médecin d'effectuer son diagnostic.

Cette transmission bidirectionnelle est de type "point à point" et nécessite un débit stabilisé. Si nous voulons passer par un réseau à diffusion (LAN ou WAN type Internet), il faudra prévoir une qualité de service (QoS) sur tout le chemin de la liaison, garantissant ainsi un débit minimal. Si la QoS est facile à mettre en œuvre sur des réseaux sur lesquels nous avons la maîtrise (LAN), elle est quasi impossible sur des réseaux opérateurs, sauf par l'opérateur lui-même. De plus, une liaison asymétrique (de type ADSL) ne permettra d'obtenir que le débit le plus faible de cette asymétrie : en effet, si nous parcourons la liaison dans n'importe quel sens entre le site expert et le site patient, nous passerons obligatoirement par le débit "montant" d'un des deux sites et donc le débit le plus faible (10% à 15% du débit nominal descendant).

De plus, le site expert étant fixe, il peut-être équipé en moyens de transmission classiques (lignes spécialisées, paraboles satellite, cumul de lignes ISDN). Pour le site patient, nous pouvons distinguer 2 cas :

- Le cas d'un site patient "fixe" dans un lieu isolé : station polaire, dispensaire ou certains navires. Cela permet d'avoir une infrastructure fixe du type 1 à 4 lignes ISDN, une parabole satellite ou d'utiliser les moyens de transmission de la station ou du navire.
- Dans le cas d'un site patient "mobile", toute utilisation d'une infrastructure de type téléphonie fixe doit être écartée. Il ne reste que des liaisons de type "sans fil" : téléphone mobile, téléphone satellite ou liaisons satellite. Cependant, ces *media* ne nous offrent actuellement que peu de bande passante.

3 Le projet Européen OTELO

Le projet OTELO regroupe 9 partenaires européens autour de l'étude, la conception et la validation d'un système télé-échographique [7]. Trois laboratoires de recherche – le LVR (Bourges), ITII (Thessalonique) et Kingston University (Londres), deux partenaires médicaux (CHU de Tours et CSC de Barcelone) et quatre sociétés (Sinters à Toulouse, Ebit à Gènes, Elsacom et Kell à Rome), forment le consortium. Durant les 30 mois du projet, nous devons identifier et qualifier les besoins médicaux, étudier et concevoir 3 prototypes successifs de télé-échographes, puis les valider techniquement et

cliniquement. Nous en sommes à la fin de la validation clinique du prototype OTELO 1 et en cours de validation technique du prototype OTELO 2.

3.1 Le prototype OTELO 1

OTELO 1 est un robot léger à 6 degrés de liberté (fig.4). Dédié au portage et au positionnement d'une sonde ultrasonore sur le corps humain, il est maintenu par un assistant paramédical sur le patient. Disposant d'une baie de commande totalement intégrée et d'un échographe léger, il est aisément transportable à domicile ou sur des sites isolés – il est autonome en énergie grâce à une valise contenant 2 batteries. De plus, l'ensemble répond aux normes sanitaires hospitalières.

Les procédures de mise en œuvre et le fonctionnement du robot sur le site patient sont simples. Cette première version ne dispose pas des fonctionnalités audio et vidéo d'ambiance intégrées ; il est donc couplé à un système standard de visioconférence fonctionnant en parallèle du robot.

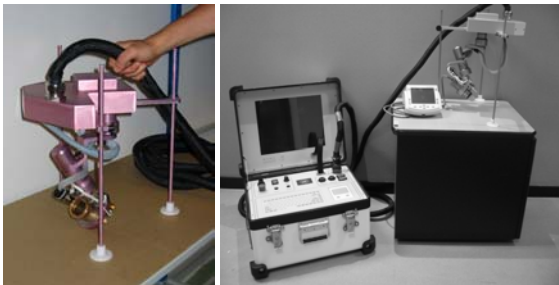


fig. 4 – Le prototype OTELO 1 à 6 ddl et sa baie

3.2 Le poste expert

Le médecin expert se trouve devant un ordinateur lui permettant d'initier la procédure de télé-échographie : appel du poste patient, commande de calibrage du robot, lancement de l'échographie. L'image et le son d'ambiance sont là aussi assurés par une visioconférence fonctionnant en parallèle. Une fois que l'examen échographique est commencé, le médecin ne s'occupe pratiquement plus que de l'image échographique qu'il reçoit, tout en conversant avec le patient ou l'assistant pour demander d'éventuels changements de position. Pour actionner la sonde échographique par le robot, le médecin utilise une sonde fictive (fig. 5) libre dans l'environnement [8]. Repérée en position et orientation par un système électromagnétique, cet instrument, de taille et de poids similaires à la sonde réelle, est manipulée de la même façon par le médecin. Celui-ci retrouve intuitivement le geste médical de l'échographie. Dans cette première version, un système passif permet de simuler l'enfoncement de la peau lors de l'appui de la sonde échographique.



fig. 5 – La sonde fictive

3.3 Les liaisons

Nous avons mené une étude sur les débits réellement disponibles sur différents types de liaison. En liaison fixe, nous avons éliminé les lignes téléphoniques classiques (RTC) à cause du faible débit qu'elles garantissent actuellement : 50kb/s au mieux (*cf* §2.3 pour ADSL). Les lignes spécialisées sont disponibles auprès des opérateurs de télécommunication et peuvent fournir des débits nominaux bien supérieurs à nos besoins. Mais elles sont longues à mettre en place et surtout ont des coûts prohibitifs dans le cadre d'une commercialisation future de notre système. Le système téléphonique ISDN (Numéris/RNIS pour la France) permet d'obtenir des débits nominaux garantis entre 2 points quelconques du globe. Une ligne permet d'accéder soit 2 fois 64 kb/s soit 128kb/s (sauf Amérique du nord où c'est 2x 56 kb/s). De plus, ces liaisons ISDN peuvent être "clusterisées" – *i.e.* agrégées – entre elles : certains matériels permettent de regrouper plusieurs lignes pour ne former virtuellement qu'une seule ligne ayant pour débit nominal la somme de chacune d'elles. Nous nous sommes donc basé sur ce type de transmission et sur un nombre variable de modules de 64 kb/s à se répartir entre les différentes tâches : commande/retour du robot, image échographie, son/image d'ambiance. Actuellement nous avons validé notre prototype avec 1, 2 et 3 lignes ISDN (de 128kb/s à 384 kb/s).

En ce qui concerne les liaisons sans fil, nous ne disposons au mieux que de 10kb/s sur la téléphonie cellulaire (type GSM), ce qui est largement insuffisant pour la télé-échographie robotisée. L'arrivée des réseaux de 3^{ème} génération avec l'UMTS devrait nous faire accéder à une plus grande bande passante mais toujours avec des notions de partage entre plusieurs utilisateurs. Le téléphone satellite portable, tel IRIDIUM ou GLOBAL STAR, permettent des débits théoriques plus élevés en cumulant des émetteurs/récepteurs, agrégeant, mais de manière dynamique donc fluctuante, des canaux de 7 à 8 kb/s chacun. Des expérimentations avec la société italienne Elsacom nous ont permis d'atteindre des débits de 53 kb/s. Les liaisons satellites permettent d'accéder à des débits supérieurs. INMARSAT octroie en tout point du globe, des canaux de 64kb/s ; en les cumulant, nous pourrions atteindre des débits suffisants pour la télé-échographie. D'autres satellites tels D-SAT ou EUTELSAT fournissent de relativement gros débits :

jusqu'à 2Mb/s en bidirectionnel mais de manière partagée et dynamique par tranche de 64 kb/s. Par contre, dans tous les cas, ces liaisons satellites induisent des retards proches de la seconde, qui impliquent une prise en compte au niveau de la commande du robot.

3.4 Validation technique et médicale

Le système complet d'OTELO 1 – poste maître, poste esclave et transmission – à été validé lors de test cliniques entre Tours et Barcelone et entre 2 hôpitaux de Barcelone (photographies des fig. 2 et 3). Plusieurs dizaines de patients ont été examinées par deux médecins spécialistes [9]. Deux types de liaison ont été utilisées : 3 lignes ISDN agrégées, et deux liaisons satellites EUTEL SAT.

4 Conclusion et perspectives

La continuité du projet Otelo se traduit par le développement des 2 prototypes Otelo 2 et Otelo 3. Sur les aspects robotiques, l'accent est mis sur la conception de structures légères et la commande pour un meilleur suivi du geste médical au travers d'une chaîne télé-opérée. Les notions de sécurité tant pour le patient pendant l'examen que pour la sûreté du diagnostic réalisé à distance constituent des éléments sous-jacents de notre démarche de recherche. L'industrialisation du produit Otelo constitue également pour nous un objectif fondamental.

Références

- [1] "Robot à trois degrés de liberté et à un point fixe", Brevet national n°9903736, déposé par l'Université d'Orléans représentant le Laboratoire Vision et Robotique 25 mars 1999.
- [2] "A new robotic mechanism for medical application", A. Gourdon, P. Poignet, G. Poisson, P. Vieyres et P. Marché, Proceeding IEEE/ASME99, Atlanta, pp33-38, 1999.
- [3] "The TERESA project : from space research to ground tele-echography", P. Vieyres, G. Poisson, F. Courrèges, O. Mériageux et P. Arbeille, Industrial robot : an international journal, Vol 30, n°1, pp77-82, 2003.
- [4] "Low Level Control of Antagonist Artificial Pneumatic Muscles for a Tele-Operated Ultrasound Robot", F. Courrèges, G. Poisson, P. Vieyres, A. Vichis-Gonzales, J. Troccaz et B. Tondu, 12th International Symposium on Measurement and Control in Robotics, ISMCR'02, Bourges, juin 2002.
- [5] "Experiments with the TER Tele-echography robot", Vilchis, A., J. Troccaz, Cinquin, Ph., et al., Proc. of International Conference of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2002, pp.138-146, Springer-Verlag, LNCS 2488.
- [6] "Three dimensional motion mechanism of ultrasound probe and its application for tele-echography system", K. Masuda, E. Kimura, N. Tateishi, et K. Ishihara, Proc. Of International Conference of the IEEE Intelligent Robot and Systems, pp. 1112-1116, Maui, 2001.
- [7] "A tele-operated robotic system for mobile tele-echography : The OTELO project", P. Vieyres, Gérard P., C. Novalés, N. Smith-Guerin et P. Arbeille, Chapitre 23 du livre "M-health, Emerging Mobile health Systems", Kluwer Academic - plenum publishers, fin 2003.
- [8] "Sonde fictive échographique", Brevet national n°0201027, déposé par l'Université d'Orléans représentant le Laboratoire Vision et Robotique, 29 janvier 2002. Brevet étendu à l'Europe sous le n°03290168.8 le 23 janvier 2003.
- [9] "Clinical validation of a mobile patient-expert tele-echography system using ISDN lines", N. Smith-Guérin, L. Al Bassit, F. Courrèges, G. Poisson, C. Delgorge, Ph. Arbeille et P. Vieyres, 4th Annual IEEE/EMBS Special Topic Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, ITAB'03, Birmingham, 23-26 avril 2003.

Démonstrateur I4R : architecture et identification géométrique par vision

N. Andreff*, F. Pierrot†

* LaRAMA/LASMEA, IFMA/U. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

† LIRMM, U. Montpellier II/CNRS, Montpellier

Résumé

Le premier objectif de ce démonstrateur est de faire le point sur le savoir-faire du LIRMM en matière de conception de machines parallèles. Son second objectif est de présenter la procédure expérimentale d'identification géométrique par vision de machines parallèles, développée conjointement par le LaRAMA et le LASMEA.

1 Contexte

Les machines à structure parallèles, ou plus simplement machines parallèles, émergent peu à peu dans le monde industriel. En effet, ces machines ont la propriété principale de porter leur effecteur grâce à plusieurs chaînes cinématiques (ou jambes) et non une comme dans le cas de robots sériels. Cela permet de porter une charge plus lourde à des vitesses plus élevées, le plus souvent avec une répétabilité supérieure.

Dérivée sous plusieurs variantes, cette propriété permet de réaliser des simulateurs (de vol ou de conduite), des machines d'usinage à grande vitesse, des robots chirurgicaux, entre autres.

D'un point de vue plus académique, ces machines génèrent des problématiques des plus intéressants dans nombre de domaines : conception d'architectures performantes, modélisation géométrique et dynamique, identification de ces modèles et commande. Tous ces thèmes sont abordés fructueusement depuis deux ans dans le projet MAX du programme de recherche interdisciplinaire ROBEA du CNRS.

Le démonstrateur I4R peut ainsi être vu comme un état d'avancement d'une partie des travaux de ce projet : conception de nouvelles architectures de machines et identification géométrique par vision de leur modèle géométrique.

2 Architecture

Après le H4 [3] et le I4L [1], le robot I4R (Figure 1) est le dernier né des robots parallèles conçu au LIRMM dans la famille des robots Delta et Hexa. Il reprend l'architecture globale du H4 et la plateforme articulée du robot I4L, totalisant au final 4 degrés de mobilité (3 translations et une rotation autour de la verticale).

Le robot I4R est constitué (Figure 2) de 4 moteurs tournants situés à sa base, actionnant chacun une jambe



FIG. 1 – Le robot I4R du LIRMM

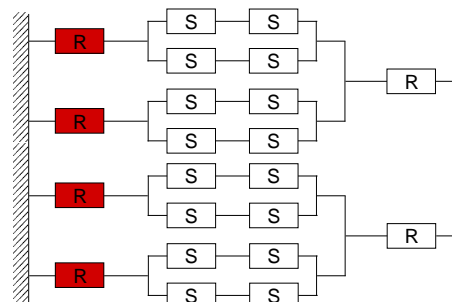


FIG. 2 – Graphe cinématique du I4R

constituée d'un bras en rotation autour de l'axe du moteur, suivi d'un parallélogramme déformable représentant l'avant-bras, lui-même relié à la plate-forme articulée. Cette plate-forme, obtenue en couplant deux demi-nacelles par un système pignon-crémaillère, autorise des rotations autour de l'axe vertical d'environ 90 degrés (amplitude rarement obtenue par des mécanismes parallèles).

Il est commandé grâce à une architecture logicielle basée sur le noyau temps-réel RTX sur PC Windows. La commande proprement dite met en œuvre le principe de redondance métrologique [2] : des capteurs proprioceptifs sur-numéraires (ici, un capteur angulaire mesurant la rotation de la nacelle) permettent de simplifier les modèles et donc la commande du robot.

3 Identification géométrique

Deux types de méthodes d'identification géométrique par vision ont été développées dans la thèse de Pierre Renaud[4] :

- identification par observation de l'effecteur ;
Dans cette classe de méthode, une mire rétro-réfléchissante est fixée à l'effecteur et est observée par une caméra fixe par rapport à la base du robot. A partir des images de cette mire, la pose (cT_m , position et orientation relative de la mire par rapport à la caméra) est estimée en inversant les équations de projection perspective. Puis, la pose est insérée dans le modèle cinématique inverse $q = f({}^cT_m, \xi)$ qui est comparé aux variables articulaires enregistrées q_e pour former un problème de minimisation non-linéaire en les paramètres ξ à déterminer :

$$\min_{\xi} \frac{1}{2} \|q_e - f({}^cT_m, \xi)\|^2 \quad (1)$$

- identification par observation des jambes.
Cette classe de méthode relève des méthodes d'identification géométrique fondées sur la redondance métrologique. Leur principe repose sur l'observation de l'état des nombreuses articulations non actionnées d'un mécanisme parallèle. Plutôt que d'instrumenter ces articulations par des capteurs proprioceptifs, nos méthodes tentent de reconstruire cet état interne du mécanisme par vision.

Pour ce faire, nous tirons parti du fait que la plupart des corps constitutifs des jambes machines parallèles sont des cylindres élancés. En détectant les limbes de ces cylindres et en choisissant des mouvements appropriés du mécanisme, nous sommes en mesure de déterminer séquentiellement les paramètres du modèle géométrique. Nous obtenons des résultats équivalents, voire supérieurs, à ceux obtenus par observation de l'effecteur, en dépit d'une détection simpliste des limbes dans l'image. Cela s'explique par le fait que la redondance métrologique permet de simplifier les modèles géométriques ainsi que par le fait que nombre de paramètres géométriques sont directement mesurés dans l'image (et non par minimisation non-linéaire).

Ne disposant pas encore de machine parallèle à Clermont-Ferrand, ces méthodes ont été développées en mettant l'accent sur leur mise en œuvre expérimentale. En effet, il a été nécessaire d'imaginer un système de métrologie par vision aisément transportable et une procédure simplifiant l'iden-



FIG. 3 – Machines sur lesquelles l'identification par vision a été expérimentée : H4 (LIRMM), Orthoglide (IRCCyN), I4L (LIRMM)

tification dynamique d'un robot distant. Ces méthodes ont été validées sur plusieurs machines (Figure 3) aussi bien à Montpellier qu'à Nantes.

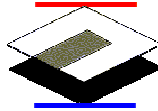
Remerciements

Nous souhaitons remercier tous ceux qui ont œuvré autour de ce démonstrateur, et notamment : Pierre Renaud, Sébastien Krut, Olivier Company, Michel Dhome, Philippe Martinet et Grigore Gogu.

Références

- [1] Company O., Krut S., Pierrot F., *Modelling and Preliminary Design Issues of a 4-Axis Parallel Machine for Heavy Parts Handling*, IMECH Part K Journal of Multibody Dynamics, Vol. 216, pp. 1-11, 2002.
- [2] Marquet F., *Etude de l'apport de la redondance en robotique parallèle*, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2, 23 Octobre 2002
- [3] Pierrot F., Marquet F., Company O., Gil T., *H4 parallel robot : modeling, design and preliminary experiments*. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 2001
- [4] Renaud P., *Apport de la vision pour l'identification géométrique de mécanismes parallèles*, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 25 Septembre 2003

Organisateurs



Partenaires



donner au monde l'énergie d'être meilleur



ISBN : 2-9520495-0-5

Imprimeur : Chaumeil Repro
65 bd Côte Blatin, 63000 CLERMONT FERRAND
Tél : 33 4 73 93 13 96

