

Projet Sharp

*Programmation automatique et systèmes décisionnels en
robotique*

Rhône-Alpes

THÈME 3B

R *apport*
d'Activité

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	5
2.1	Présentation et objectifs généraux	5
3	Fondements scientifiques	6
3.1	Planification de mouvements	6
3.2	Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement.	9
3.3	Synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D	10
3.4	Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique	14
4	Domaines d'applications	15
4.1	CAO-robotique	15
4.2	Route automatisée	16
4.3	Réalité virtuelle	16
5	Logiciels	17
5.1	Aladyn3D	17
5.2	OPenPI	18
6	Résultats nouveaux	18
6.1	Planification de mouvement	18
6.1.1	Contraintes cinématiques	19
6.1.2	Incertitudes	22
6.2	Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement	23
6.3	Synthèse du mouvement virtuel et interaction 3D	25
6.3.1	Modèles et algorithmes de base	25
6.3.2	Modélisation de corps physiques complexes et identification des paramètres	28
6.3.3	Interactions 3D	30
6.3.4	Synthèse du mouvement	34
6.4	Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique	36
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	38
7.1	Actions de développement Praxitèle et LaRA	38
7.2	Projet Priamm «Studio virtuel»	38
7.3	Robosoft	39
7.4	Carsense	39
8	Actions régionales, nationales et internationales	39
8.1	Actions régionales	39
8.2	Actions nationales	39
8.3	Relations bilatérales internationales	40

8.3.1	Europe	40
8.3.2	Russie et Asie Centrale	40
8.3.3	Pacifique et Asie du Sud	41
8.3.4	Amérique du Nord	41
8.3.5	Amérique du Sud et Amérique Centrale	42
8.4	Accueils de chercheurs étrangers	42
9	Diffusion de résultats	43
9.1	Animation de la communauté scientifique	43
9.2	Enseignements universitaires	43
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	44
10	Bibliographie	44

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Christian Laugier [DR INRIA]

Secrétariat

Benedicte Fluxa [Salarié ADR]

Personnel INRIA

Thierry Fraichard [CR]

Sepanta Sekhavat [CR]

Personnel CNRS¹

Emmanuel Mazer [DR]

Ingénieur expert INRIA

Olivier Lebeltel [à partir de mai 2000]

Kamel Mekhnacha [à partir de octobre 2000]

Collaborateurs extérieurs

Pierre Bessière [CR CNRS au laboratoire Leibniz de l'Imag²]

Moëz Cherif [INRIA Rhône-Alpes, projet VASY]

Ammar Joukhadar [Enseignant à l'ISSAT³, Syrie]

Chercheurs post-doctorants

Juan-Manuel Ahuactzin Larios [post-doctorant INRIA]

Rémis Balaniuk [post-doctorat INRIA, jusqu'à octobre 2000]

Ivan Ferreira-Costa [post-doctorat INRIA, décembre 1999 à novembre 2000]

Guo Dong [post-doctorat INRIA, janvier à octobre 2000]

1. Centre National de la Recherche Scientifique.

2. Inst. d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble.

3. Institut Supérieur de Sciences Appliquées et de Technologie.

Chercheurs doctorants

François Boux de Casson [allocataire MENESR⁴]
Diego d'Aulignac [allocataire MENESR]
Anton Deguet [Johns Hopking University]
Ruben Garcia Senen [boursier du gouvernement mexicain, CONACYT/SFERE]
Frédéric Large [boursier INRIA]
César Mendoza-Serrano [boursier du gouvernement mexicain, CONACYT/SFERE]
David Raulo [allocataire MENESR]
Jorge Hermosillo Valadez [boursier du gouvernement mexicain, CONACYT/SFERE]

Stagiaires

Abib Bouaziz-Viallet [stagiaire CNAM, décembre 2000 à septembre 2001]
Kok Hin Chan [étudiant de NTU⁵ à Singapour, janvier à juin 2000]
Satyendra Gupta [étudiant à l'IIT Kanpur, Inde, juin à juillet 2000]
Patrick Koebel [DEA ENSERG, fevrier à juillet 2000]
Ruth Lezama Morales [stage fin d'études, Universidad de las Américas, Puebla Mexique, juin 2000 à may 2001]
Antoine Maillet [stage de 3ème année de l'école d'ingénieurs ESME SUDRIA avril à septembre 2000]
Cedric Pradalier [DEA ENSIMAG, Decembre 2000 à juin 2001]
Priscilla Pek [janvier à juin et novembre à decembre 2000]
Kenneth Sundaraj [étudiant de NTU à Singapore (de septembre 1998 à septembre 2000), bourse Ambassade de France]
Jerome Truchet [DESS Math Appliquées de Chambéry, avril à sept 2000]

Visiteurs

Zvi Shiller [Professeur à University of California, Los Angeles, juillet 2000]
Michel Pasquier [Professeur associé à NTU, Singapour, Juin 2000]

4. Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

5. Nanyang Technological University

2 Présentation et objectifs généraux

2.1 Présentation et objectifs généraux

Sharp est un projet de recherche commun entre l'INRIA, le CNRS⁶, l'INPG⁷, l'UJF⁸ Grenoble, depuis 1992 ; il est localisé à l'Inria Rhône-Alpes, et il appartient également au laboratoire GRAVIR⁹ de la fédération IMAG.

Le programme scientifique du projet Sharp porte sur le thème suivant : « modélisation et synthèse du mouvement et des interactions 3D en robotique ». Le terme « robotique » revêt ici un caractère particulier, dans le sens où il inclut à la fois des machines physiques (communément appelées « robots ») capables d'actions autonomes dans le monde réel, et des agents mobiles ou articulés (où « robots virtuels ») possédant des capacités de mouvements propres leurs permettant d'évoluer de manière dite « intelligente » dans un monde virtuel soumis à des lois physiques semblables à celles du monde réel. Ce programme de recherche met l'accent sur les composantes « modélisation », « autonomie du mouvement », et « interaction physique ». Les principales applications visées sont celles de la CAO-Robotique, de la route automatisée, de la robotique d'intervention, de la santé, et des environnements virtuels dynamiques. Le programme de recherche associé s'articule autour des principaux axes suivants :

- Planification de mouvements : conception et implantation d'algorithmes de planification de mouvements ayant la capacité de prendre en compte à la fois les contraintes classiques de non collision, et celles provenant de la nature physique du monde dans lequel les robots (réels ou virtuels) évoluent (en particulier : contraintes cinématiques et dynamiques, incertitude) ;
- Architectures décisionnelles pour le mouvement : méthodologie pour le développement de structures décisionnelles pour le contrôle « intelligent » des mouvements, actions, et interactions d'agents évoluant dans des environnements dynamiques peu ou pas connus a priori ;
- Synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D : modèles et algorithmes pour le traitement en temps réel ou en temps interactif de la dynamique et des interactions physiques de corps complexes en mouvement dans un monde virtuel (mouvements divers, déformations, collisions, changements interactif de topologie, interaction haptique) ;
- Outils probabiliste pour la géométrie : développement d'outils de modélisation et de calcul probabiliste pour la géométrie, afin de traiter correctement (i.e. en exploitant le cadre formel de la théorie des probabilités et du calcul bayésien) les incertitudes et leurs impacts sur les problèmes inverses et sur les problèmes d'interprétation de données sensorielles (sujet traité en collaboration avec le Laboratoire Leibniz de l'Imag).

L'activité de recherche précédente est à la fois valorisée et fertilisée par des activités plus appliquées qui visent au développement de solutions à des problèmes industriels. Plusieurs

6. Centre National de la Recherche Scientifique

7. Institut National Polytechnique de Grenoble

8. Université Joseph Fourier

9. Laboratoire informatique Graphique, Vision, et Robotique

prototypes de recherche et expérimentations réelles (e.g. sur des robots, des véhicules, où des systèmes de Réalité Virtuelle) sont ainsi réalisés en relation avec des industriels et les moyens robotique de l'Inria Rhône-Alpes ; certains de ces prototypes ont déjà donné lieu à des transferts de technologies en CAO-Robotique, et dans le domaine des effets spéciaux en vidéo professionnelle.

3 Fondements scientifiques

Le thème central du projet Sharp est celui de «la modélisation et la synthèse du mouvement et des interactions 3D en robotique». Ce thème de recherche est abordé en mettant l'accent sur les composantes «modélisation», «autonomie du mouvement», et «interaction physique». Ceci se traduit par l'étude des quatre sujets principaux suivants : planification de mouvements, architecture décisionnelle pour l'autonomie du mouvement, synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D, outils probabiliste pour la géométrie.

3.1 Planification de mouvements

La planification de mouvement est un problème fondamental en Robotique [Lat90]. A ce titre, il a fait et continue de faire l'objet d'un nombre important de travaux de recherche. Du fait de la complexité intrinsèque du problème général de la planification de mouvement, la grande majorité des travaux ne considèrent que l'aspect géométrique de la planification de mouvement et calculent un chemin géométrique sans collision avec les obstacles (généralement fixes) de l'environnement. Notre volonté de produire des plans exécutables dans des environnements réels nous amène à prendre en compte de façon explicite des contraintes autres que la simple contrainte géométrique de non-collision habituellement considérée. Ces contraintes découlent d'une part de la nature physique du monde réel (cinématique et dynamique des systèmes considérés, interactions de contacts, incertitudes), et d'autre part de la nature des environnements considérés (systèmes multi-robots, obstacles mobiles, environnements évolutifs, etc.). Ces différentes contraintes posent des problèmes particuliers pour lesquels nous nous attachons à trouver des solutions, tout en cherchant à maîtriser la complexité algorithmique induite. Nos travaux de recherche portent principalement sur les quatre volets suivants du problème: les systèmes multi-robots, les contraintes cinématiques, les contraintes additionnelles de l'environnement, et l'incertitude géométrique.

Contraintes cinématiques. Les robots mobiles à roue, sont tous soumis à la contrainte de roulement sans glissement de leurs roues sur le sol. Cette contrainte mécanique se répercute par une contrainte cinématique - dite «non holonome» - sur les mouvements instantanés exécutables par le système. Le problème des contraintes non holonomes intéresse tout particulièrement la communauté robotique depuis qu'il est apparu pour la première fois en 1986 [Lau86]. La

[Lat90] J.-C. LATOMBE, *Robot motion planning*, Kluwer Academic Press, 1990.

[Lau86] J.-P. LAUMOND, « Feasible trajectories for mobile robots with kinematic and environment constraints », in : *Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, p. 346-354, Amsterdam (NL), 1986.

non holonomie contraint la forme géométrique des mouvements que peut effectuer le système. De ce fait, pour une grande majorité des robots mobiles considérés dans la littérature, il existe une bijection entre le chemin suivi par le système dans son espace de configuration de dimension n et la courbe 2D effectuée dans le plan de travail par un point caractéristique du robot. Cependant, les robots mobiles sont aussi soumis à d'autres types de contrainte tels que l'existence d'une borne sur l'angle de braquage des roues avant d'une voiture, borne sur les vitesses et accélérations de braquage et linéaires, etc. Certaines de ces contraintes peuvent être traduites géométriquement au niveau du chemin 2D du point caractéristique du robot. Ce traitement nécessite quelquefois (c'est souvent le cas des bornes dans l'espace des commandes) un durcissement des contraintes ou la prise en compte d'un modèle plus fin du robot. Dans nos travaux, nous nous sommes efforcés d'enrichir le problème de la planification non holonome dans le cas des robots mobiles en y intégrant d'autres contraintes fréquentes pour ces systèmes. Dans le cas de robots de type « voiture », nous utilisons des chemins dont la courbure est continue et dont la dérivée de la courbure est bornée¹⁰ [SF97]. Les chemins ainsi obtenus sont quasi-optimaux et présentent un grand intérêt pratique. Dans le cas du véhicule « Cycab » de l'Inria¹¹ [LB97], qui possède un modèle cinématique très particulier du fait de la rotation couplée de ses roues avant et arrière (ce qui permet d'accroître la manœuvrabilité du système dans des environnements fortement contraints), il faut faire face à des problèmes nouveaux de modélisation du système et de formalisation pour pouvoir résoudre le problème de planification de mouvement associé. Notre approche consiste à utiliser les outils de l'algèbre différentielle, et plus particulièrement ceux liés au concept de « platitude différentielle » [FLMR95], afin de pouvoir ramener le problème de la planification pour ce système 4D à un problème de recherche de courbes planes, comme c'est le cas pour les robots de type voitures.

Contraintes additionnelles de l'environnement. Comme cela a été mentionné précédemment, un robot mobile est soumis à des contraintes non holonomes, se traduisant par une modélisation de la cinématique du système à l'aide d'une famille d'équations différentielles non intégrables. De plus, l'environnement dans lequel évolue le robot est à l'origine de contraintes qui ne peuvent généralement être intégrées directement dans cette formalisation, en particulier : la présence dans l'environnement d'obstacles et/ou d'autres robots, ou les interactions roue/sol pour un robot évoluant sur un terrain accidenté ou à adhérence irrégulière. C'est pourquoi,

10. la continuité de courbure correspond à la continuité de la variation de l'angle de braquage des roues avant, tandis que la borne sur la dérivée de la courbure correspond au fait que la vitesse de variation de l'angle de braquage est limitée.

11. Plate-forme expérimentale de l'Inria commercialisée par la société Robotsoft, et au développement de laquelle le projet Sharp a largement contribué.

-
- [SF97] A. SCHEUER, T. FRAICHARD, « Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2, p. 997–1003, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [LB97] L. LISOWSKI, G. BAILLE, « Specifications of a small electric vehicle : modular and distributed approach », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [FLMR95] M. FLIESS, J. LÉVINE, P. MARTIN, P. ROUCHON, « Flatness and Defect of Nonlinear Systems : Introductory Theory and Examples », *Int. Journal of Control* 61, 6, 1995, p. 1327–1361.

il est généralement nécessaire d'utiliser des planificateurs dits « locaux » aptes à prendre en compte les diverses contraintes de déplacement, et de les combiner avec des schémas algorithmiques dits « globaux » pour permettre l'évitement des obstacles. Ceci peut être fait soit par des méthodes de type « roadmap », soit par modifications successives d'un chemin sans collision calculé auparavant [Lau98]. Le cas de la locomotion en milieu tout-terrain est un cas typique de la difficulté qu'il y a à modéliser les équations différentielles de mouvement du robot de manière « closed form ». Ceci est expliqué par la présence de plusieurs facteurs qui entrent en considération, notamment la dynamique du robot, la cinématique de la chaîne du châssis si le robot est articulé, les interactions de contact roues/sol (glissement, roulement, déformation des surfaces de contact), et enfin le relief du terrain. Ceci signifie que des modèles mixtes (géométriques et physiques) couplés avec des techniques de calcul appropriées doivent être utilisés au niveau de la planification de mouvements, et que le schéma « local/global » précité doit être soigneusement adapté pour pouvoir maîtriser la forte complexité algorithmique induite [CL95].

Incertitude géométrique. Dans certains cas, et notamment pour la navigation en robotique mobile, il est important que les chemins calculés soient « sûrs », i.e. pour lesquels le robot est assuré d'atteindre son but malgré les incertitudes qui peuvent affecter le robot (incertitudes sur la position du robot ou des obstacles, sur le résultat d'une commande appliquée au robot, ou sur une mesure capteur, etc.). En particulier, dans le cas d'un robot mobile équipé d'un système de localisation relative (odométrie), l'incertitude sur la position du robot, de par sa nature cumulative, peut devenir telle qu'elle rende impossible le suivi d'un chemin donné. Il devient donc nécessaire de considérer ces incertitudes dès la planification, afin d'engendrer des solutions sûres ; ceci se traduit en pratique par l'introduction de « stratégies de mouvement » qui peuvent inclure l'utilisation de capteurs, et de mouvements gardés ou compliants. Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés dans le domaine de l'assemblage de pièces mécaniques. Un premier type d'approche consiste à calculer une séquence d'assemblage en supposant l'incertitude nulle, puis à modifier la séquence ainsi obtenue afin de prendre en compte l'incertitude. Ce type d'approche se prête bien à l'assemblage : la structure du plan final est, en général, proche de celle du plan initial, grâce à la présence de « guides géométriques » engendrés par les surfaces en contact. Ce n'est cependant pas le cas en robotique mobile. Une autre approche consiste à utiliser le concept de « pré-image » [LPMT84], i.e. l'ensemble des configurations à partir desquelles une commande donnée permet d'atteindre à coup sûr un objectif donné. La planification par chaînage arrière de pré-images intègre l'incertitude directement dans le processus de planification, mais elle pose des problèmes de complexité algorithmique tels que cela a limité son utilisation à des cas très simples. Notre objectif est d'aborder la prise en compte de l'incertitude dans des cas plus réalistes (robot non ponctuel et non-holonomes, mouvements non rectilignes, etc.), ce qui nous amène à développer des modèles

-
- [Lau98] J.-P. LAUMOND (éditeur), *Robot motion planning and control, Lecture Notes in Control and Information Science, 229*, Springer, 1998.
- [CL95] M. CHERIF, C. LAUGIER, « Motion Planning of Autonomous Off-Road Vehicles Under Physical Interaction Constraints », in : *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya (JP), mai 1995.
- [LPMT84] T. LOZANO-PÉREZ, M. T. MASON, R. H. TAYLOR, « Automatic synthesis of fine motion strategies for robots », *Int. Journal of Robotics Research* 3, 1, 1984, p. 3–24.

d'incertitude plus complexes et de nouvelles techniques de planification [DIRLN96] [FM98]

Systèmes multi-robots. Dans la problématique générale de planification de mouvements, la planification pour systèmes multi-agents est une instance particulièrement ardue. De nombreux cas existent: les agents peuvent être en compétition pour les ressources ou en collaboration pour réaliser une mission commune, des moyens de communication entre agents peuvent être envisagés ou pas, la topologie de l'espace de travail peut être fixe ou modifiable par les agents, etc. De plus, les méthodes de planification sont tout aussi variées que les cas considérés. Une des spécificités de la planification multi-agents réside dans sa complexité algorithmique. En effet, on peut considérer l'ensemble des agents comme un seul robot à plusieurs corps, mais la complexité de cette approche la rend inutilisable en pratique, quand le nombre d'agents augmente. Plus précisément, en ajoutant des bornes sur la vitesse des agents, le problème de planification est alors NP-complet par rapport au nombre d'agents. La seule approche raisonnable est donc l'établissement de protocoles de coordination et de coopération prenant en compte les spécificités de l'application [ACF⁺98] [SS99].

3.2 Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement.

Il est maintenant acquis que l'autonomie de mouvement dans un monde dynamique nécessite de passer par le couplage de deux types de fonctions: des « fonctions délibératives », dotées de capacités de modélisation et de raisonnement à différents niveaux d'abstraction, et des « fonctions réactives », qui privilégient le temps de réaction à un événement donné (l'impératif temps réel implique souvent des capacités de raisonnement plus réduites, voire nulles). Le problème abordé est alors celui du développement d'une architecture de contrôle visant à doter un véhicule de la capacité de se déplacer de façon autonome dans un environnement dynamique partiellement connu. Comme indiqué précédemment, ceci implique de coupler de manière appropriée des fonctions délibératives qui utilisent des modèles et des raisonnements variés, avec des fonctions réactives qui utilisent des données de capteurs et des comportements réactifs avec des constantes de temps différentes. Ce couplage se réalise par le biais d'une « architecture de contrôle » qui gère les interactions entre ces différentes fonctions. Trois grandes classes d'approches existent dans la littérature (Délibérative [Nil84], Réactive [Bro90], et Hybride [ACF⁺98])

-
- [DIRLN96] F. DE LA ROSA, C. LAUGIER, J. NÁJERA, « Robust Path Planning in the Plane », *IEEE Trans. Robotics and Automation* 12, 2, avril 1996, p. 347–352.
- [FM98] T. FRAICHARD, R. MERMOND, « Path planning with uncertainty for car-like robots », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1, p. 27–32, Leuven (BE), mai 1998.
- [ACF⁺98] R. ALAMI, R. CHATILA, S. FLEURY, M. GHALLAB, F. INGRAND, « An architecture for autonomy », *Int. Journal of Robotics Research* 17, 4, avril 1998, p. 315–337, Special issue on integrated architectures for robot control and programming.
- [SS99] S. SEKHAVAT, S. S. SASTRY, « Towards an Automatic Air Traffic Controller », *in: Proc. of the Int. Conf. on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation*, Vienna (AT), février 1999.
- [Nil84] N. J. NILSSON, « Shakey the Robot », *rapport de recherche n° 347*, Artificial Intelligence Center, SRI International, Menlo Park (CA), 1984.
- [Bro90] R. A. BROOKS, « A Robust Layered Control System for a Mobile Robot », *in: Readings in Uncertain Reasoning*, G. Shafer et J. Pearl (éditeurs), Morgan Kaufmann, 1990, p. 204–213.

pour développer ce type d'architecture. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser une approche de type hybride à trois composantes (Fonctionnelle, Exécutive, Décisionnelle) [LGF⁺98], permettant de mieux gérer les contraintes de temps réel ainsi que le couplage des niveaux délibératifs et réactifs. L'idée de base, consiste à utiliser la notion de « manœuvre type » adaptée à un objectif et à un type de situation donnés (un « contexte »). Le principe consiste à disposer d'un ensemble de schémas de contrôle (ou « manœuvre asservie à des capteurs ») associés à chaque contexte (par exemple : parking automatique, évitement d'obstacle, etc.), et paramétrés par des informations capteurs (par exemple vitesse du véhicule, distance aux obstacles, etc.). Cette approche est bien adaptée au contexte des véhicules automatiques en environnement partiellement structuré, pour lesquels il semble exister un nombre raisonnable de schémas différentes ; elle permet d'intégrer correctement les différentes couches décisionnelles, tout en assurant un meilleur contrôle des mouvements exécutés par le véhicule (trajectoire, vitesses, accélérations).

3.3 Synthèse du mouvement virtuel et interactions 3D

Les technologies de réalité Virtuelle deviennent de plus en plus populaires dans de nouveaux secteurs d'application comme la robotique d'intervention, la santé, ou encore les loisirs (jeux vidéo en particulier). Toutes ces applications nécessitent un degré de réalisme élevé sur trois composantes essentielles du processus : le rendu graphique, la dynamique des scènes traitées, et l'interaction 3D ; elles imposent également des contraintes strictes de temps réel (ou au moins de temps interactif). L'approche généralement mise en oeuvre pour tenter d'obtenir ce réalisme au niveau de la dynamique des scènes virtuelles et de l'interaction, consiste à doter le monde virtuel de propriétés et de lois physiques semblables à celles du monde réel. C'est dans cette logique que se placent nos travaux de recherche sur la synthèse du mouvement virtuel et les interactions 3D, en s'appuyant naturellement sur les synergies qui existent entre les techniques de génération et de contrôle du mouvement en robotique, et celles habituellement mises en oeuvre en animation graphique (approches basées sur les modèles physiques). Cependant, les applications que nous considérons, qui mettent généralement en jeu des processus du monde réel (e.g. en robotique d'intervention ou dans le domaine médical), nous conduit à aborder le sujet sous un angle un peu différent : nous devons mettre l'accent sur le « réalisme physique » et sur les contraintes de « temps réel ou interactif ».

Compte tenu de la présence de nombreuses similitudes avec les problèmes de robotique, nous avons choisi de mettre en oeuvre une approche visant à considérer une scène virtuelle comme un espace soumis aux principales lois de la physique, et dans lequel évoluent et interagissent deux classes d'objets : (1) des « objets dits inertes », dont les mouvements et/ou les déformations résultent de l'application de champs de forces (comme la gravité) ou de l'interaction physique avec d'autres objets (manipulations, collisions) ; et (2) des « objets actifs » (ou « robots virtuels ») possédant des caractéristiques physiques prédéfinies (i.e. mécanique, cinématique, et dynamique) et dotés de capacités de mouvements propres. Certaines techniques de la robotique peuvent potentiellement être utilisées ou adaptées pour cela, comme

[LGF⁺98] C. LAUGIER, P. GARNIER, T. FRAICHARD, I. PAROMTCHIK, A. SCHEUER, « Motion Planning and Sensor-Guided Manoeuvre Generation for an Autonomous Vehicle », in : *Field and Service Robotics*, A. Zelinsky (éditeur), Springer, 1998, p. 60-67.

par exemple la planification de mouvements, le contrôle du mouvement, les comportements réactifs, ou encore la détection des collisions ; la principale difficulté réside dans l'intégration de telles méthodes avec une approche basée sur l'utilisation de modèles physiques de corps solides ou déformables (comme par exemple les approches proposées en animation graphique par [Bar92] et [BW92]). Cette analyse, que nous avons faite lors de nos premiers travaux (début des années 90) pour la prise en compte des interactions roue-sol lors de la simulation du comportement dynamique d'un véhicule tout-terrain [LJL94], a été aussi faite plus récemment par des chercheurs en robotique qui ont apportés des contributions intéressantes qui vont dans le même sens (en particulier les travaux de Mirtich à Berkeley [LJL94] sur les collisions entre objets rigides, ceux de Ruspini & Khatib à Stanford [RKK97] sur la simulation dynamique en robotique et sur l'interaction haptique, et ceux de Latombe & Kuffner à Stanford [Lat90] sur la planification de mouvements pour l'animation graphique).

L'approche que nous mettons en oeuvre pour résoudre ce problème nous conduit à aborder quatre sujets complémentaires dont les orientations sont guidées par les contraintes énoncées précédemment : les modèles et algorithmes de base, la modélisation de corps physiques complexes, l'interaction 3D, et la synthèse du mouvement.

Modèles et algorithmes de base. Il s'agit ici de développer des modèles et des algorithmes qui permettent de reproduire le comportement dynamique des divers composants d'une scène virtuelle en temps réel ou interactif, tout en conservant une certaine cohérence physique et en essayant de contrôler les problèmes numériques liés à l'intégration des équations de la dynamique. L'approche mise en oeuvre pour cela repose sur l'utilisation de modèles composites (géométrie, dynamique, méthodes d'intégration numérique), afin de pouvoir adapter le processus de simulation dynamique d'une part aux contraintes généralement antinomiques d'efficacité et de réalisme physique, et d'autre part à la nature et aux propriétés des objets mis en jeu (rigidité, déformabilité, structures articulées, nature des interactions...). L'objectif est donc de concevoir et de mettre en oeuvre de tels modèles ; notre approche pour cela consiste à utiliser un modèle géométrique maillé (2D ou 3D) comme « support » pour un modèle physique sous-jacent (e.g. masses-ressorts, éléments finis . . .), et à faire coopérer ces différents modèles pour reproduire les différentes fonctionnalités de la scène virtuelle considérée. Le principe de cette approche a déjà été expérimentalement validée sur des applications de robotique et plus récemment sur des applications de simulation d'organes humains, en utilisant une composante

-
- [Bar92] D. BARAFF, *Dynamic Simulation of Non-Penetrating Rigid bodies*, thèse de doctorat, Cornell University, mars 1992.
- [BW92] D. BARAFF, A. WITKIN, «Dynamic Simulation of Non-penetrating Flexible Bodies», *Computer Graphics* 26, 2, juillet 1992.
- [LJL94] C. LAUGIER, A. JIMENEZ, A. LUCIANI, «Simulating Physical Interactions Between an Articulated Mobile Vehicle and a Terrain», *in: Robotics and Autonomous Systems*, 2, 11, Elsevier, 1994, ch. Special Issue on Telerobotics.
- [RKK97] D. C. RUPINI, K. KOLAROV, O. KHATIB, «Haptic Interaction in Virtual Environments», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, p. 128–133, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [Lat90] J.-C. LATOMBE, *Robot motion planning*, Kluwer Academic Press, 1990.

physique basée sur des modèles de particules [JL96] [BdCL99]. Dans cette approche, la composante géométrique est essentiellement utilisée pour le rendu graphique, pour la détection des collisions et des contacts, et pour les interactions qui mettent en jeu des modifications de topologie ; la composante physique est utilisée pour le calcul du mouvement et/ou des déformations, et pour la détermination des effets des contacts et des collisions (le choix du modèle et de la méthode d'intégration numérique étant alors liés aux caractéristiques physiques des objets considérés).

Modélisation de corps physiques complexes et identification des paramètres. Le problème abordé ici est celui du choix du modèle et des paramètres nécessaires, pour représenter les différentes caractéristiques géométriques et mécaniques d'un corps physique complexe donné. Les modèles utilisés pour cela combinent des modèles mécaniques connus (qui sont réalistes, utilisés depuis des décennies, associés à des tables de propriétés des matériaux, mais dont les performances algorithmiques sont plutôt médiocres), avec des techniques issues de l'animation graphique qui ont par essence privilégié les aspects visuels sans chercher à vraiment coller à la réalité physique (et donc sans maîtriser les mécanismes de choix et de réglage des paramètres). La méthodologie de modélisation que nous appliquons comporte trois grandes étapes : (1) construction d'un maillage 2D et/ou 3D à partir d'un modèle géométrique ou d'un ensemble de points mesurés sur l'objet considéré (le niveau de résolution utilisé étant évidemment lié aux caractéristiques de déformation à prendre en compte) , (2) «placage» d'un modèle physique de déformation sur le maillage géométrique précédent (e.g. masses-ressorts, éléments finis...), (3) identification des paramètres du modèle sur la base de comportements requis ou de mesures faites sur les objets réels. Cette approche a déjà été validée expérimentalement lors de la modélisation d'un ligament croisé de genou à partir de données mesurées sur un genou de cochon, ou lors de la simulation des déformations d'une cuisse humaine soumise à des pressions appliquées par un sonde échographique virtuelle [dCL99].

Interaction 3D. Il s'agit ici de développer des modèles et des algorithmes qui permettent de reproduire le comportement dynamique d'objets en interaction physique (contacts, articulations, collisions, actions produisant des modifications de structure comme la découpe, et interaction haptique). Ces modèles doivent être à la fois réalistes sur le plan physique, et efficaces sur le plan algorithmique. En effet, les interactions représentent généralement le goulot d'étranglement des systèmes de simulation, elles sont à l'origine des discontinuités qui altèrent profondément les procédures numériques de calcul, et elles constituent une base essentielle du réalisme que l'on attribue aux scènes dynamiques simulées. Les approches utilisées pour modéliser les différents types d'interactions sont par nature différentes, bien que de nombreux

-
- [JL96] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Dynamic Simulation: Model, Basic Algorithms, and optimization», *in: Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, Toulouse (FR), juillet 1996.
- [BdCL99] F. BOUX DE CASSON, C. LAUGIER, «Modelling the dynamics of a human liver for a minimally invasive simulator», *in: Proc. of the Int. Conf. on Medical Image Computer-Assisted Intervention*, Cambridge (GB), septembre 1999.
- [dCL99] D. D'AULIGNAC, M. C. CAVUSOGLU, C. LAUGIER, «Modelling the dynamics of a human thigh for a realistic echographic simulator with force feedback», *in: Proc. of the Int. Conf. on Medical Image Computer-Assisted Intervention*, Cambridge (BG), septembre 1999.

auteurs aient tentés d'étendre artificiellement leurs modèles de collision au traitement d'autres types d'interactions (voir par exemple [MC94]). Nos travaux de recherche portent essentiellement sur trois types d'interactions : les contacts et collisions, les modifications interactives de topologie, et l'interaction haptique. Notre approche pour le traitement des contacts non restants (e.g. contacts de type roue-sol) et des collisions, consiste à utiliser des algorithmes optimaux de calcul de distances dérivés de la robotique (e.g. les algorithmes de Lin & Canny ou ceux de Gilbert & Johnson), à développer des algorithmes efficaces pour la détermination des caractéristiques géométriques des contacts et des interpénétrations, et à mettre en oeuvre des algorithmes de calcul de la réponse dynamique à la collision qui utilisent les lois connues de la mécanique et qui prennent en compte les problèmes d'intégration numérique associés [DJL98]. Les modifications interactives de structures topologiques engendrées par certaines actions (déchirement, découpe) mettent en jeu des procédures complexes de remaillage et de redistribution des propriétés physiques pour lesquelles nous avons obtenus des résultats récents dans le cadre de la simulation chirurgicale. L'interaction haptique, qui met en jeu un système mécanique articulé actif (i.e. de type robot), engendre des problèmes de contrôle (stabilité) et nécessite des fréquences d'échantillonnage de l'ordre du kilohertz afin de rendre le retour tactile interprétable par un opérateur humain ; or la simulation dynamique de scènes complexes, même lorsque le code est optimisé, n'arrive généralement pas à des fréquences de calcul supérieures à 100 herz. C'est pourquoi, nous nous intéressons au développement de « modèles haptique locaux » restituant en temps réel les principales caractéristiques topologiques et mécaniques locales des scènes considérées [RKK97] [Bal99].

Synthèse du mouvement. Le problème abordé ici est celui de la synthèse du mouvement pour des agents virtuels (ou robots virtuels). Cela englobe les aspects dynamiques du mouvement (c'est à dire la production d'un mouvement par application de forces ou de contrôles au niveau de certains organes des agents virtuels considérés), ainsi que les aspects de plus haut niveau liés au comportement et à la planification de mouvements. Notre objectif est de tenter d'appliquer des techniques que nous développons par ailleurs pour les robots réels (planificateurs géométriques, architectures décisionnelles, contrôleur de mouvements), tout en exploitant le fait que le monde virtuel permet dans certains cas de réduire la complexité globale (par suppression de certaines contraintes du monde réel, ou par introduction de « guides physiques artificiels »). Des premiers résultats sur ce point ont été obtenus pour planifier les mouvements de systèmes articulés divers, en surimposant des champs de forces fictifs sur un modèle physique de l'environnement, ou en introduisant un modèle physique simplifié d'interaction roue-sol au niveau de la composante locale d'un planificateur de trajectoire pour

-
- [MC94] B. V. MIRTICH, J. F. CANNY, «Impulse-based Dynamic Simulation», *in: Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, San Francisco, CA (US), février 1994.
- [DJL98] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «A Collision Model for Deformable Bodies», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, BC (CA), octobre 1998.
- [RKK97] D. C. RUPINI, K. KOLAROV, O. KHATIB, «Haptic Interaction in Virtual Environments», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, p. 128-133, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [Bal99] R. BALANIUK, «Using Fast Local Modeling to Buffer Haptic Data», *in: Proc. of the PHANTOM Users Group Workshop*, Boston, MA (US), octobre 1999.

véhicule tout-terrain. D'autres résultats plus récents concernent le contrôle temps réel d'agents virtuels autonomes ; l'approche adoptée consiste à modéliser ceux-ci comme des robots se déplaçant dans un environnement virtuel, perçu au moyen de pseudo-capteurs, et utilisant pour se déplacer des fonctions de planification et de contrôle de mouvements.

3.4 Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique

La prise en compte des incertitudes est un des problèmes importants de la robotique. Raisonner sur des informations incertaines pour programmer un robot constitue un des thèmes récurrents de cette discipline. En particulier, on peut se référer aux travaux déjà ancien de Taylor, Lozano-Perez et Mason^[LPMT84], ou ceux menés dans notre équipe^[TP88,DIRLN96]. Pour des raisons de commodité de calcul, la plupart des chercheurs cherchent à s'écarter de la théorie des probabilités en adoptant des simplifications parfois excessives : représentation ensembliste des erreurs ou filtre de Kalman. Dans ce travail, nous souhaitons au contraire utiliser les modèles probabilistes, et plus spécialement le calcul bayésien, pour représenter l'incertitude. Nous cherchons en particulier à nous doter d'outils de modélisation et de calcul probabiliste pour la géométrie et la programmation des robots. Les résultats attendus ne doivent pas seulement nous permettre de représenter les incertitudes et de calculer leurs propagations, mais aussi de traiter dans un cadre unifié une large catégorie de problèmes robotique liée à l'incomplétude des modèles de représentation de l'environnement.

En cela nous nous inscrivons dans un mouvement international plus large : celui de la robotique probabiliste^[Thr01]. Ces approches reviennent en force dans ce domaine et ont données lieu à de nombreuses démonstrations dans des environnements réels montrant des niveaux de robustesse et de complexité jamais atteints^[TBB⁺99]. Les conséquences de l'approche probabiliste se mesurent sur les problèmes de localisation, de fusion multi-capteurs, de contrôle et de planification mais aussi dans le domaine des architectures de commande de robot. Elle donne une vision nouvelle à la notion de modularité en remettant en cause l'intérêt fonctionnelle d'un découpage en niveau trouvé généralement dans les architectures classique de commande de robot.

Les fondements théoriques de notre approche sont ceux des probabilités bayésiennes. Une formalisation rigoureuse et synthétique de cette approche peut être trouvée dans^[Jay95]. Ed-

-
- [LPMT84] T. LOZANO-PEREZ, M. T. MASON, R. H. TAYLOR, «Automatic synthesis of fine motion strategies for robots», *Int. Journal of Robotics Research* 3, 1, 1984, p. 3-24.
 - [TP88] J. TROCCAZ, P. PUGET, «Dealing with uncertainties in robot planning using program proving techniques», *in: Proc. of the Int. Symp. on Robotics Research*, R. C. Bolles et B. Roth (éditeurs), MIT Press, 1988, p. 455-466.
 - [DIRLN96] F. DE LA ROSA, C. LAUGIER, J. NÁJERA, «Robust Path Planning in the Plane», *IEEE Trans. Robotics and Automation* 12, 2, avril 1996, p. 347-352.
 - [Thr01] S. THRUN, «Probabilistic Algorithm in Robotics», *AI Magazin (Tech. Report CMU-CS-00-126)*, 2001, à paraître.
 - [TBB⁺99] S. THRUN, M. BENNEWITZ, W. BURGARD, A. CREMERS, F. DELLAERT, D. FOX, D. HÄHNEL, C. ROSENBER, N. ROU, J. SCHULTE, D. SHULTZ, «MIMERVA: A second generation mobile tour guide robot», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 1999.
 - [Jay95] E. JAYNES, *Probability theory - The logic of science*, 1995, <http://bayes.wustl.edu>.

ward T. Jaynes propose en fait une théorie complète et intégrée du raisonnement probabiliste appelée “Probability as Logic” ou PaL qui étend la logique aux probabilités. Notre approche est basée sur la réalisation d’outils informatique permettant de mettre oeuvre concrètement cette théorie. Plusieurs prototypes de moteurs d’inférence ont été développés et testés sur des applications simples. Ils sont l’équivalent probabiliste des moteurs d’inférence logique tel que PROLOG. Nous avons utilisé ces moteurs pour construire un système de CAO robotique probabiliste et un système de programmation de robot. Les techniques utilisées pour réaliser ces moteurs s’appuient sur des techniques de raisonnement symbolique pour la simplification des expressions, des techniques de Monté-Carlo pour l’intégration en grande dimension et sur l’utilisation d’algorithmes génétiques couplés à des méthodes de relaxation pour l’optimisation en présence de contraintes ^[Mek99].

4 Domaines d’applications

4.1 CAO-robotique

En quelques années les systèmes de Conception Assistés par Ordinateur (CAO) se sont enrichis de nouvelles fonctionnalités. Ils ne sont plus seulement utilisés pour la conception de pièces mécaniques mais aussi pour la simulation, voire la planification, de procédés industriels complexes. On parle alors plus généralement de « prototypage virtuel ». La fonctionnalité de « fitting simulation » en est un exemple concret : la conception d’un montage mécanique ne consiste plus seulement à définir la géométrie des pièces mécaniques, mais inclut aussi la possibilité de tester la faisabilité de l’assemblage, voir de le planifier. Cette tendance spectaculaire vers la simulation et la planification atteint tous les acteurs de la CAO. Elle conduit à la conception d’outils informatiques permettant la conception d’usines virtuelles, où tous les processus de fabrication peuvent être simulés (par exemple gestes des employés, fonctionnement des machines, quantité de peintures déposée, etc.) pour être optimisés. Un autre domaine d’application important est celui de la médecine et plus particulièrement celui de la chirurgie assistée par ordinateur. Il s’agit dans ce contexte d’aider le chirurgien à planifier son intervention et à le guider durant celle-ci.

Dans ce contexte, nos travaux sur l’algorithmique géométrique revêtent une importance particulière car ils permettent :

- d’améliorer les performances des outils de simulation et de planification en fournissant des algorithmes de calcul de distance performants et généraux ;
- de prendre en compte la dynamique de l’interaction entre corps rigides ou déformables ;
- de fournir des outils de planification pour des systèmes non-holonomes ou pour des systèmes complexes ;
- de tenir compte des incertitudes et des erreurs de modèles.

[Mek99] K. MEKHNACHA, *Méthodes probabilistes bayésiennes pour la prise en compte des incertitudes géométriques: application à la CAO-robotique*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juillet 1999.

4.2 Route automatisée

Depuis une dizaine d'années, les différents problèmes liés aux transports routiers (sécurité, efficacité, etc.) prennent de plus en plus d'importance. Ainsi, ils ont fait et font encore l'objet de grands programmes de recherche tant du côté du secteur privé que du secteur public (*cf.* le programme européen Eurêka Prometheus sur les transports routiers [1986-1994] et les actions de développement INRIA-Inrets¹² Praxitèle [1994-1997] et LaRa [1998-2002]).

A l'heure actuelle, les recherches portent sur de nouveaux modes de conduite assistée par ordinateur, permettant une simplification et une sécurisation de la conduite, pouvant aller jusqu'à une conduite totalement automatique sur des voies réservées. C'est le concept de la route automatisée.

Ces réflexions esquissent une prospective sur les transports routiers automatisés du futur et proposent des éléments de réponse aux problèmes de sécurité, de débit des infrastructures, de vitesse de déplacement et, en même temps, de réduction de l'impact sur l'environnement. Si la route automatisée est encore un concept assez large, on peut cependant distinguer deux grandes orientations :

- des scénarios portant essentiellement sur « l'intelligence dans le véhicule » ; ces travaux intéressent les constructeurs car il y a un marché immédiat et évolutif ;
- des scénarii portant essentiellement sur l'aspect « système » (*i.e.* avec en particulier des aspects liés à l'infrastructure) ; ces projets ont un coût plus élevé mais ce sont les seuls qui permettent de réaliser une route complètement automatisée avec de meilleures performances.

Les exemples d'applications sont les trains de véhicules avec ou sans conducteurs, l'automatisation de certains transports publics, la route automatisée pour les camions, l'autoroute à haut débit, etc. La route automatisée concerne de nombreux domaines de recherche et implique au sein de l'INRIA plusieurs projets de recherche. Le projet Sharp est impliqué dans cette problématique depuis de nombreuses années (participation au projet Prometheus et à l'action de développement Praxitèle) et contribue principalement sur les aspects liés aux techniques de déplacements en mode automatique ou semi-automatique (*i.e.* conduite assistée).

4.3 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle est un secteur en pleine croissance, qui recouvre des secteurs d'applications très divers comme la robotique d'intervention, le graphique, la téléconférence et le multimédia. Compte tenu de nos orientations de recherches visant à privilégier le réalisme physique, les interactions, et l'efficacité des algorithmes mis en jeu, les applications que nous considérons dans le domaine de la réalité virtuelle sont les suivantes :

La robotique d'intervention. Il s'agit de mettre en œuvre des robots sur des tâches d'intervention ou de maintenance à exécuter dans des environnements hostiles et/ou éloignés (sous-marin, spatial, nucléaire, militaire). Nous considérons alors le monde virtuel reconstruit comme

12. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

un interface évolué entre l'opérateur et le robot plongé dans son environnement d'opération. Cette interface permet à l'opérateur d'interagir de manière naturelle avec le robot (graphique, système haptique), tout en prenant en compte implicitement les contraintes du monde réel (que ce soit pour des opérations de type téléopéré, ou pour des actions qui mettent en jeu des mécanismes de planification de mouvements). Par exemple, programmer une mission pour un véhicule d'exploration planétaire, pourra conduire à combiner des techniques de planification de trajectoires et/ou de guidage manuel, avec des techniques de simulation dynamique aptes à prendre en compte des phénomènes physiques tels que les glissements ou le patinage des roues lors de la navigation.

Les applications médicales. Il s'agit de doter le praticien ou le chirurgien d'outils informatiques lui permettant soit d'améliorer l'apprentissage de gestes médicaux, soit de l'aider à préparer certaines interventions chirurgicales par intégration de diverses données préopératoires et de résultats simulés des gestes opératoires projetés. Nos efforts actuels portent essentiellement sur le premier point. L'objectif est de produire des simulateurs permettant d'entraîner les praticiens et chirurgiens sur les techniques opératoires qu'ils devront utiliser (en particulier pour les nouvelles techniques de chirurgie non invasive qui nécessitent d'intervenir avec une réduction du champ visuel et gestuel), tout en donnant la possibilité de simuler de nombreux types de pathologie, même rares. Ceci devrait permettre au chirurgien néophyte d'acquérir ses réflexes sur des patients virtuels, et ainsi réduire le taux d'incidents lors des premières interventions sur des patients réels. Le travail correspondant est réalisé en relation avec des chirurgiens.

Le multimédia. Il s'agit d'appliquer les techniques de simulation dynamique et de génération automatique du mouvement pour la production en temps réel de séquences animées au sein d'applications nécessitant de fortes interactions avec un opérateur ou concepteur humain, par exemple : les jeux vidéos, visites guidées sur Internet, la production d'effets spéciaux ou de studios virtuels en vidéo professionnelle.

5 Logiciels

5.1 Aladyn3D

AlaDyn3D est un logiciel de *simulation dynamique*¹³ développé comme une généralisation du système *Robot- Φ* ¹⁴: il a été conçu pour être multi-modèles et multi-méthodes, avec des mécanismes permettant l'ajout de nouveaux modèles et méthodes. Dans sa version actuelle,

13. Un *simulateur dynamique* est un logiciel qui permet de calculer les mouvements, les déformations, et les interactions entre des objets rigides ou déformables évoluant dans un environnement soumis à des lois physiques classiques.

14. *Robot- Φ* est un prototype de recherche. Un brevet logiciel a été déposé et certifié par l'Agence pour la Protection des Programmes (Inter Deposit Digital Number IDD.N.FR.001.160005.00.R.P.1996.R.P.1996.000.21000). Une version particulière de *Robot- Φ* a été intégrée dans la machine "Psy" d'effets spéciaux 3D, développée et commercialisée par la société Getris-Images GDI; un "plug-in" pour le système 3D Studio Max (de Kinetix) a également été développé dans ce cadre.

AlaDyn3D permet de traiter les mouvements et interactions physiques d'objets rigides simples (chaque objet étant représenté par un modèle géométrique et par un modèle dynamique), et de simuler les mouvements/déformations et interactions de corps déformables surfaciques (*e.g.* drapeaux) ou volumiques (*e.g.* foie). Les interactions sont alors détectées grâce à un algorithme de calcul de distance (optimisé); elles sont ensuite modélisées à l'aide de liaisons visco-élastiques non linéaires et de modèles de collision de type "impulsif" et "pénalité". L'intégration des équations de la dynamique peut-être fait par deux méthodes différents: une méthode de type explicite (Newton-Euler ou Runge-Kutta), et une méthode implicite à pas de temps fixe ou adaptatif. Afin de faciliter les échanges avec d'autres applications, *AlaDyn3D* est doté de filtres qui permettent d'une part d'importer des modèles 3D à partir de modeleurs du commerce (3D Studio Max), et d'autre part d'exporter des animations 3D dans un format standard (Vrml 2.0) ou des animations 2D sous forme d'une séquence d'images.

AlaDyn3D est implantée en C++/STL/OpenGL. Une version stable et documentée fonctionnant sous Silicon Graphics/Irix 6.x et PC/Linux est disponible en accès ftp (voir <http://www.Inrialpes.fr/sharp/modelisation/AlaDyn>).

Une nouvelle version d'AlaDyn est en cours de développement et sera bientôt disponible. Alors que la version précédente était essentiellement centrée sur la notion de "simulation dynamique", la nouvelle version se présente comme une plateforme de développement d'applications de Réalité Virtuelle plus générique, dans laquelle les équations de la mécanique Newtonienne ne constituent plus la seule manière de générer le mouvement et les interactions entre objets. Les modèles géométriques ainsi que les méthodes de détection de collision et de rendu graphique ont été optimisées de manière à respecter des contraintes de temps-réel. De plus, d'autres modèles et algorithmes de base développés au sein du projet SHARP ont été intégrés, notamment certaines méthodes de planification et de contrôle du mouvement, ainsi que des modèles d'interaction avec une interface haptique. Cette nouvelle version fera prochainement l'objet d'un brevet.

5.2 OPenPI

Après avoir développé plusieurs moteurs d'inférence probabiliste et les avoir appliqué à différents problèmes: Système CAO et programmation des robots. Nous avons développé (en collaboration avec l'équipe Laplace du laboratoire Leibniz) un premier moteur général en C++: Ce système nommé OpenPI pour "Open Probabilistic Langage" est une API permettant de développer des applications autour de l'inférence probabiliste. Les techniques utilisées sont celles déjà expérimentées dans le cadre de la programmation des robots. Notre objectif est de l'utiliser comme plateforme de réflexion nous permettant de développer une version plus élaborée rassemblant plusieurs méthodes d'inférence.

6 Résultats nouveaux

6.1 Planification de mouvement

Cette année nos travaux sur la planification de mouvements se sont concentrés autour de deux axes principaux qui sont la planification sous contraintes cinématiques et la prise en

compte de l'incertitude. Nous avons aussi finalisé certains travaux de l'année précédente par des publications dans des revues. Plus précisément, il s'agissait de la planification pour la manipulation dextre [11] et de la planification en environnement multi-robot [12].

6.1.1 Contraintes cinématiques

Participants : Juan-Manuel Ahuactzin, Kok Hin Chan, Thierry Fraichard, Jorge Hermosillo, Sepanta Sekhavat.

Nos travaux sur les contraintes cinématiques des robots mobiles se sont essentiellement portés cette année sur deux types de plateformes : les robots de type voiture et les robots à double-bracage tels que le Cycab.

En 1998, nous avons défini un nouveau problème de planification de chemin pour robot de type voiture. En plus des contraintes cinématiques usuelles (continuité de la direction tangente, courbure bornée), ce problème prend en compte deux nouvelles contraintes : la continuité de la courbure et une borne sur la dérivée de la courbure par rapport à l'abscisse curviligne. La continuité de courbure correspond à la continuité de la variation de l'angle de braquage des roues avant du robot, tandis que la borne sur la dérivée de la courbure correspond au fait que la vitesse de variation de l'angle de braquage des roues avant est limitée.

Après avoir considéré le cas où la voiture ne se déplace qu'en marche avant (*cf.* rapport d'activité 1998), nous nous sommes penchés en 1999 sur le cas où la voiture peut passer de la marche avant à la marche arrière. Nous avons d'abord déterminé la nature des chemins optimaux pour conclure à l'impossibilité de les utiliser en pratique du fait de leur irrégularité (accumulation d'un nombre infini de clothoïdes). Ceci nous a amené à développer une 'méthode de guidage', *i.e.* un algorithme de calcul de chemin en l'absence d'obstacles, qui détermine des chemins sous-optimaux formés seulement d'un nombre fini de segments, d'arcs de cercle et de clothoïdes (*cf.* rapport d'activité 1999).

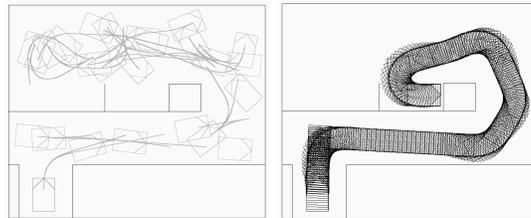


FIG. 1 – *Chemin sans-collision obtenu à l'aide de la méthode de guidage "marche avant-marche arrière"*

En 2000, nous avons poursuivi ce travail et obtenu les trois résultats suivants:

- Nous avons montré comment étendre la famille de chemins sous-optimaux considérées par nos méthodes de guidage (cas 'marche avant' et cas 'marche avant-marche arrière') de façon à améliorer la longueur des chemins obtenus.
- Nous avons complété la méthode de guidage 'marche avant-marche arrière' de sorte qu'elle

vérifie une propriété topologique^[SL98] qui rend compte de la contrôlabilité en temps petit de la voiture (possibilité de relier deux configurations voisines sans sortir d'un voisinage donné).

- Le résultat précédent nous a alors permis d'intégrer la méthode de guidage 'marche avant-marche arrière' dans un planificateur global, en l'occurrence ACA ^[MAB98], et d'obtenir un planificateur complet. La Figure 1 illustre un exemple de chemin calculé par notre algorithme.

Un article présentant ces différents résultats a été soumis à la conférence internationale IEEE Robotics and Automation 2001.

Le deuxième système non holonome auquel nous nous sommes intéressés cette année est le robot Cycab pour lequel nous avons complété nos travaux commencés l'année dernière. Ce robot possède deux essieux comme une voiture, mais il a la particularité d'avoir les roues arrière qui changent d'orientation en même temps que les roues avant. Nous disposons à l'INRIA Rhône-Alpes de 3 robots de cette famille. Sur le premier de ces robots, il existe une liaison mécanique entre les deux essieux, ce qui introduit un rapport linéaire entre l'angle de braquage avant et arrière. Sur le deuxième robot l'angle de braquage avant et arrière peuvent être commandés séparément, et sur le dernier robot il existe une commande de braquage par roue. Il existe à ce jour très peu de travaux sur ce système et plus particulièrement aucun travail sur la planification. L'étude de ces systèmes nous a permis d'établir leur propriété de "platitude différentielle" pour une grande famille de relation fonctionnelle f entre l'angle de braquage avant et arrière, y compris la relation linéaire [40]. La propriété de platitude est d'un grand intérêt pour la planification de trajectoire. Typiquement dans notre cas, elle implique que la planification "non holonome" pour notre système de dimension 4 (position, orientation du robot et angle de braquage) peut être ramenée à une planification "holonome" sous très faibles contraintes dans un espace de dimension 2: l'espace des sorties linéarisantes (ou plates) du système. Le point dur était alors de trouver explicitement l'expression de ces sorties plates pour les systèmes étudiés. La recherche de ces sorties nous a permis d'apporter une contribution concernant les sorties linéarisantes des systèmes d'Engel (résultat soumis à American Control Conference 2001). Enfin, l'obtention de ses sorties nous a permis de résoudre le problème de la commande en boucle ouverte pour les robots mobiles à double-bracage (voir Figure 4) mais aussi celui de la planification sans collision pour ces systèmes non holonomes (voir Figure 3). En effet, nous avons démontré dans des travaux antérieurs que si nous disposions d'une procédure de calcul de commande boucle ouverte vérifiant une certaine propriété topologique (TP -admissible^[SL98]), il était possible de l'utiliser comme un "planificateur local" dans un schéma général de planification qui permettrait le calcul d'une trajectoire faisable et sans collision pour le système. L'obtention des sorties plates pour les robots à double-bracage nous a permis de proposer un tel planificateur (résultats soumis à la conférence internationale IEEE Robotics and Automation 2001).

-
- [SL98] S. SEKHAVAT, J.-P. LAUMOND, «Topological Property for Collision-Free Nonholonomic Motion Planning: the Case of Sinusoidal Inputs for Chained Form Systems», *IEEE Trans. Robotics and Automation* 14, 5, octobre 1998, p. 671–680.
- [MAB98] E. MAZER, J.-M. AHUACTZIN, P. BESSIÈRE, «The Ariadne's Clew Algorithm», *Journ. of Artificial Intelligence Research* 9, July-December 1998, p. 295–316.

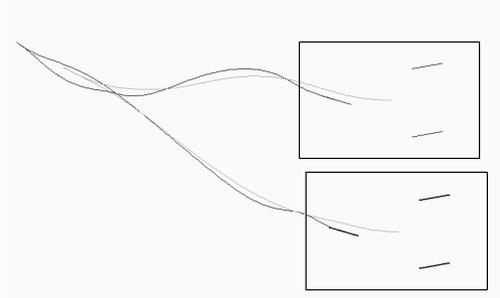


FIG. 2 – *Commande en boucle ouverte calculée pour le Cycab. La trace foncée est celle de la roue avant et la trace claire est celle des sorties linéarisantes.*

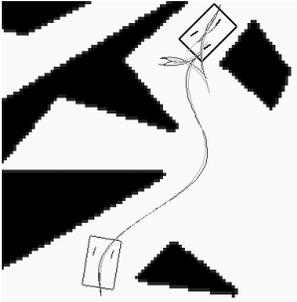


FIG. 3 – *Une trajectoire sans collisions pour le Cycab.*

6.1.2 Incertitudes

Participants : Thierry Fraichard, Alain Lambert.

Un robot mobile réel ne connaît sa position absolue qu'avec une certaine incertitude qui évolue au cours du temps et des déplacements successifs du robot. Cette incertitude, liée principalement aux incertitudes sur le résultat des commandes de déplacement exécutées par le robot et aux incertitudes sur les mesures des dispositifs de localisation, peut, si elle devient trop importante, entraîner l'échec du suivi du chemin calculé pour atteindre un but donné. En conséquence, planifier des chemins sûrs pour un robot mobile revient à planifier des chemins pour lesquels l'évolution de l'incertitude de position du robot le long de ces chemins est compatible avec les contraintes imposées par l'environnement (les obstacles) et le but à atteindre.

En règle générale, un robot mobile se localise d'abord via un dispositif odométrique dont le caractère relatif entraîne une dérive croissante et non bornée de son incertitude de position. Une solution partielle à ce problème de dérive consiste à équiper le robot de dispositifs de relocalisation absolue qui reposent généralement sur la détection *d'amers*, *i.e.* d'éléments particuliers de l'environnement (*e.g.* satellites pour le GPS, radio-balises pour un goniomètre, repères visuels pour une caméra, etc.). L'ajout de ce type de dispositifs ne résout que partiellement le problème puisque se pose encore le problème de la détectabilité des amers. Dans ce cadre, la planification de chemins sûrs passe alors par la prise en compte explicite de ces deux problèmes (dérive, détectabilité des amers) dans le processus de planification.

Nous nous sommes intéressés au cas d'un robot de type voiture (et donc soumis à des contraintes cinématiques) équipé d'un dispositif odométrique et d'un système de relocalisation absolue.

En 1998, nous avons débuté notre étude en considérant un système de relocalisation simplifié utilisant des amers binaires caractérisées par une région de détectabilité et une incertitude de relocalisation u_r constante. Sitôt que le robot pénètre dans une région de détectabilité, on considérait qu'il avait détecté l'amer et que son incertitude de position devenait u_r . En utilisant une représentation ensembliste des incertitudes, nous avons alors proposé un modèle d'incertitude et sa fonction d'évolution pour un robot de type voiture. Partant de ce modèle, nous avons développé l'un des premiers planificateurs de chemin sûr pour robot non-holonyme [FM98].

A partir de 1999, nous avons tout d'abord souhaité nous affranchir du caractère artificiel de nos amers en considérant un véritable dispositif de relocalisation, un capteur télémétrique en l'occurrence, et en abordant effectivement le problème de la détectabilité des amers (qu'est ce que ce perçois ? comment est-ce que je le perçois ?). Ensuite, étant donné le caractère conservatif des modèles ensemblistes (qui restreint l'espace des solutions admissibles), nous avons décidé de passer à une modélisation probabiliste de l'incertitude.

La relocalisation s'effectue par mise en correspondance entre les amers telles que le robot les perçoit et telles qu'il les connaît (modèle a priori). Cette relocalisation peut, en théorie, intervenir à tout moment. Cependant, c'est un processus coûteux dont il convient de minimiser l'utilisation. Par ailleurs, la qualité de la relocalisation dépend de deux facteurs: quelles sont les

[FM98] T. FRAICHARD, R. MERMOND, « Path planning with uncertainty for car-like robots », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1*, p. 27-32, Leuven (BE), mai 1998.

amers visibles et comment les capteurs du robot peuvent-ils les percevoir? Reprenant la notion de carte locale, *i.e.* région de l'espace à laquelle est associée l'ensemble des amers les mieux appropriés pour la relocalisation, nous l'avons enrichie en introduisant la notion de «perception uncertainty field» qui associe à chaque configuration d'une carte locale une mesure de la qualité de la relocalisation.

Nous avons alors développé une méthode qui, à partir d'un modèle géométrique de l'environnement et d'une simulation du processus de relocalisation, permet la génération automatique de ces cartes locales enrichies et leur mise en œuvre au sein d'un algorithme de planification de chemin sûr pour robot de type voiture. Cet algorithme repose sur une simulation de l'odométrie. Il calcule un chemin ainsi que la prescription d'opération de relocalisation à intervalles réguliers.

Il est important de noter que cette approche est générale, elle peut s'appliquer à tout type de robots équipé de tout type de dispositifs de localisation absolue sur amers. Ce travail s'est concrétisé en 2000 par deux publications dans des conférences internationales [28, 26].

6.2 Architecture décisionnelle pour l'autonomie de mouvement

Participants : Jorge Hermosillo, Frédéric Large, Christian Laugier, Jiangzhou Lu, Igor Paromtchik, Sepanta Sekhavat.

Nous avons développé au cours des dernières années les bases d'une architecture de contrôle visant à doter un robot mobile de type voiture de la capacité de se déplacer de façon autonome. Initialement basée sur une exécution séquentielle des étapes de planification puis d'exécution des tâches, cette architecture a été modifiée en 1998 pour permettre une meilleure intégration des fonctions délibératives et réactives. Cette nouvelle architecture repose sur les trois niveaux intégrant les fonctions précitées et sur le concept de «manœuvre référencée capteurs» (voir rapport d'activité 99). De manière très schématique, le principe général de l'approche consiste à s'appuyer sur des mécanismes réactifs couplés avec un ensemble d'«experts de contrôle» (*i.e.* de procédures de contrôle appropriées aux fonctions de base du véhicule), une bibliothèque de «manœuvres référencées capteurs génériques» et des fonctions de planification de mouvements aptes à prendre en compte des contraintes variées sur le type de solution à produire.

Les travaux réalisés au cours de l'année 2000 dans le cadre du développement de notre architecture de contrôle, portent sur trois volets classiques de la problématique du contrôle d'exécution des robots mobiles: la localisation, la connection de l'encas de contrôle, la prédiction/traitement de collisions potentielles et réaction face à l'imprévu.

Localisation Si on considère la famille d'approches classiques du type «planification de trajectoire nominale + suivi de trajectoire», la localisation absolue du robot dans le référentiel où la trajectoire est définie reste pour l'instant le maillon faible de la chaîne. Il s'agit alors d'utiliser différentes données sensorielles pour localiser correctement le véhicule dans son environnement. Une approche traditionnelle basée sur un filtre de Kalman et une approche basée sur l'intégration de réseaux de neurones artificiels ont été testées et comparées tant en simulation que sur le véhicule réel [45]. L'utilisation de réseaux de neurones artificielles n'a cependant pas donné de réelles améliorations du fait des difficultés liées à la phase d'apprentissage avec

un véhicule réel. L'utilisation d'un capteur laser (Sick) permet une précision inférieure à 10cm à l'aide de balises passives disposées dans l'environnement. Il reste cependant à prendre en compte de manière explicite les erreurs de localisation induites par le mouvement. Une autre approche applicable au cas d'un robot omnidirectionnel, a été développée en collaboration avec l'Institut Riken à Tokyo. Cette approche repose sur l'utilisation d'une loi de commande pour le suivi de cibles mobiles matérialisées sur le sol par une tâche laser et détectée par une caméra embarquée [38] [37]. Cette approche a été testée avec succès sur le robot mobile de l'Institut Riken.

Particulièrement en travaux précédents basés sur l'utilisation de balises et d'éléments artificiels nous avons commencé à développer une nouvelle approche basée sur l'utilisation de la vision embarquée (stéréovision en l'occurrence). Le chemin à suivre par le véhicule est alors donné sur la forme de séquences d'images vidéo, ce qui conduit à appliquer un mécanisme de type "asservissement sur vidéo" (par analogie à un asservissement par image). Le principe consiste à rechercher l'image vidéo la "plus proche" de l'image courante perçue par la caméra, et d'en déduire le déplacement relatif du véhicule entre ces deux images (et donc l'erreur de positionnement du véhicule à l'instant t). Le défi est d'effectuer ces calculs en temps réel (i.e. pendant le mouvement du robot) et surtout de manière robuste. Les premiers résultats obtenus par un DEA co-encadré par les projets Sharp et Movi [44] étaient suffisamment prometteurs pour décider la poursuite de ce travail.

Correction de l'erreur de contrôle Une fois l'écart par rapport à la position nominale calculée, il faut tenter de la réduire au maximum. Une manière classique d'aborder ce problème consiste à utiliser une loi de commande, permettant théoriquement de réduire cette erreur au niveau de la boucle de contrôle [33]. Comme une partie de cette erreur provient du modèle utilisé nous avons aussi cherché à attaquer le problème en amont (i.e. à améliorer ce modèle, ou plutôt son impact sur la loi de contrôle utilisée). Le principe consiste à conserver un schéma classique de rattrapage d'erreur par une boucle fermée de commande, et "affiner" en ligne le modèle cinématique du véhicule à l'aide d'un réseau de neurones artificiels [30, 29]. Cette approche s'inspire des travaux que nous avons réalisés en 1999 sur l'utilisation des réseaux neuro-flous en robotique [Gau99]. Le principe consiste à utiliser les propriétés de généralisation et d'apprentissage local des réseaux de neurones artificiels à base radiale (RBF), pour faire "apprendre" au véhicule son propre modèle cinématique au cours de l'exécution d'une manœuvre. Dans le cas du suivi de trajectoire cela permet un réglage en ligne des paramètres de contrôle, et donc une plus grande robustesse par rapport aux erreurs systématiques de perception et à certains modificateurs temporaires du modèle cinématique (changement de l'adhérence au sol ou dégonflage d'une roue).

Ceci suppose cependant une bonne estimation de l'erreur, ce qui n'est pas toujours le cas sur notre plate-forme expérimentale actuelle. Les travaux actuels visent à améliorer ce point.

Prédiction/traitement des collisions potentielles La prédiction des évolutions de l'environnement à l'exécution ainsi que l'évitement d'obstacle en milieu dynamique représente un

[Gau99] E. GAUTHIER, *Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la commande d'un véhicule autonome*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), janvier 1999.

volet importante de notre architecture de contrôle. Ceci est d'autant plus important que les véhicules que nous considérons pouvant évoluer à vitesses relativement élevées. Le travail que nous avons entrepris cette année sur le sujet, à été mené en collaboration avec le Prof. Zvi Shiller de l'université UCLA de Los Angeles. La littérature comporte quelques contributions sur ce sujet mais les temps de calcul nécessaires restent trop importants. L'approche que nous avons développée consiste à déterminer à chaque itération (avec Δt petit), une vitesse permettant *d'éviter l'ensemble des obstacles sur une période de temps donnée*, en considérant alors que ces derniers suivent toujours les trajectoires prédites pendant la période de temps considérée. La nouveauté de notre approche vient du fait que nous travaillons directement en degré 1, c'est-à-dire sur les vitesses du véhicule et des obstacles mobiles. Il en résulte des constructions d'obstacles directement dans l'espace des vitesses, avec des expressions analytiques relativement simples. Ceci permet d'obtenir à chaque instant l'espace des vitesses admissibles de notre robot (i.e. les vitesses que n'engendrent pas de collisions avec les obstacles) à partir de l'évolution des vitesses instantanées des obstacles mobiles. Les premiers résultats prometteurs obtenus en simulation nous ont amené à faire une demande de dépôt de brevet sur cette approche, le champ d'application n'étant pas limité aux véhicules mobiles mais représentant un intérêt évident pour d'autres applications réelles ou virtuelles (e.g. avions, bateaux, jeux vidéo...).

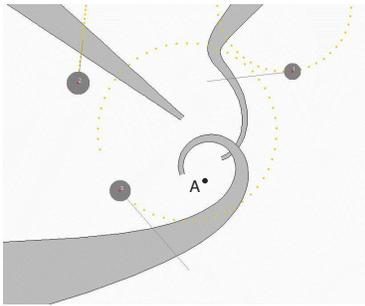


FIG. 4 – Un exemple de V-obstacles de l'espace des vitesses.

6.3 Synthèse du mouvement virtuel et interaction 3D

6.3.1 Modèles et algorithmes de base

Participants : François Boux de Casson, Diego d'Aulignac, Ivan Costa, Christian Laugier, Rémi Balaniuk.

Les derniers résultats et les différentes expérimentations menées au sein du projet ont permis de montrer qu'il est nécessaire d'utiliser une approche composite, qui mêle différents modèles pour les objets et les collisions, ainsi que différents algorithmes de calcul de distance et d'intégration des équations différentielles de la dynamique.

Modèles composites. Pour les modèles d'objets, nous nous sommes attachés à développer et intégrer au sein d'un même système des objets rigides soumis aux lois de la mécanique des

solides, et des objets déformables modélisés à l'aide de modèles "masses-ressorts". Nous avons également introduit cette année la possibilité d'utiliser les éléments finis *tetraédriques* comme autre modèle de déformation, en utilisant le tenseur de Green comme mesure de déformation :

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

ou x est la position dans le repère du monde et u le repère du matériaux. Ce tenseur a l'avantage d'être invariant à la rotation. Pour un matériaux isotrope et linéaire, on peut aussi calculer le tenseur de contrainte

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

ou λ détermine la dilatation en volume, et μ la rigidité du matériaux. Le tenseur de contrainte permet de calculer les forces sur chaque noeud, et l'intégration de ces forces dans le temps permet alors de simuler la dynamique de l'objet. La complexité du calcul pour cette dernière opération demeure néanmoins importante, ce qui ne permet pas d'atteindre les objectifs de temps réel que nous nous avons fixé pour des objets pour l'instant complexes.

Méthode LEM La méthode *LEM*¹⁵ a été conçu pour la simulation en temps réel de tissus biologiques mous (tel que le foie) dans le cadre de gestes chirurgicaux assistés par ordinateur. Une bonne approximation des tissus biologiques consiste à considérer ces derniers comme des objets déformables remplis d'un fluide incompressible. Notre approche est basée sur la recherche d'une solution statique (i.e. à force résultante nulle) pour des déformations élastiques non-linéaires. Le volume de l'objet est discrétisé par un ensemble d'Éléments Longs (LE) (voir Figure 5) ce qui permet de réduire la complexité de du modèle par rapport à une méthode classique tétraédrique. Pour chaque élément on définit une équation à l'équilibre sur les variables globales ; l'ensemble des équations statiques, associé au Principe de Pascal et à la loi de conservation des volumes, permet alors de définir un système d'équations dont les solutions caractéristiques les déformations et les forces appliqués à l'objet. L'approche consiste alors (1) à construire une discrétisation en *LE* de l'objet à modéliser, (2) à définir les équations à l'équilibre pour chaque un des éléments en utilisant le principe de Pascal et la loi de la conservation du volume, et (3) à

prendre en compte les contraintes globales afin d'obtenir un comportement globale de l'objet coherent avec les lois de la physique.

Différentes stratégies peuvent être appliquées pour discrétiser les objets. Nous avons choisi d'utiliser une discrétisation cartésienne telle que les *LE* soient parallèles aux axes cartésiens. Intuitivement on peut considérer que chaque *LE* représente un ressort non-linéaire dont une extrémité est fixe, et l'autre est attachée à un point de la surface déformable de l'objet. Il est important de souligner que dans cette approche, un *LE* n'occupe pas réellement un espace à l'intérieur de l'objet de masse. En effet le volume de l'objet est considéré comme rempli d'un

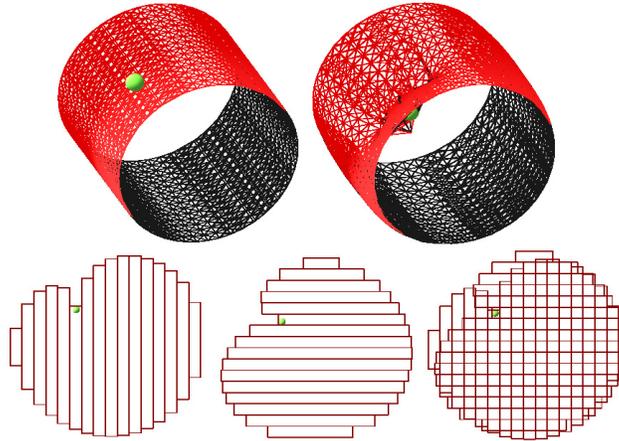


FIG. 5 – Modélisation d'un cylindre par deux maillages composés de LE

fluide incompressible d'une densité donnée ; le comportement mécanique de l'objet est alors caractérisé par celui des LE de son modèle discrétisé, en appliquant les deux conditions aux limites suivants :

1. Le principe de Pascal, qui établit que dans un fluide incompressible en équilibre, les pressions se transmettent intégralement.
2. L'incompressibilité du fluide implique que la conservation du volume doit être garantie lorsqu'il y a interaction externe et déformation de l'objet, ce qui signifie que toute déformation locale se représente sur l'ensemble de l'objet. En d'autres termes, la variation de volume des éléments modifiés par l'intérieur doit être égale à la somme des variations de volume des autres éléments.

Nous avons utilisé l'approche LEM pour concevoir et implanter une librairie générique de simulation de tissus mous. Cette librairie a aussi été implantée au cours de l'été 2000 à l'université de Stanford dans le cadre de collaboration avec l'équipe du Prof. Ken Salisbury. Une publication commune [21] a obtenu le prix du meilleur à la conférence PUG'2000. Le simulateur a été implémenté en C++ sur Windows NT, Linux et Irix. Il compte les principaux modules suivants :

1. Définition du modèle : spécification de la géométrie du modèle et de la physique des objets, calcul de la discrétisation en LE ;
2. Boucle de simulation : résolution du système d'équation pour déterminer la déformation de l'objet ;
3. Boucle de rendu et itération : gestion de l'interaction haptique avec les objets et de leurs visualisation graphique.

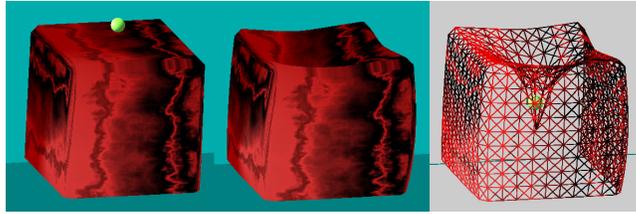


FIG. 6 – *Tissu mou déformé a l'aide d'un outil rigide*

Dans un PC 700MHz bi-processeur, une itération dans la boucle de simulation prend environ 0,05 secondes pour un maille de 600 éléments. Il faut souligner que pour un niveau de discrétisation équivalent dans une approche FEM classique (i.e. Avec des tétraèdres dans les calculs), notre approche fournit une plus grande précision sur les déformations. Les premiers résultats sont présentés dans [21]. Une publication plus complète a été soumise à la conférence Int. Conf. on Robotics and Automation 2001.

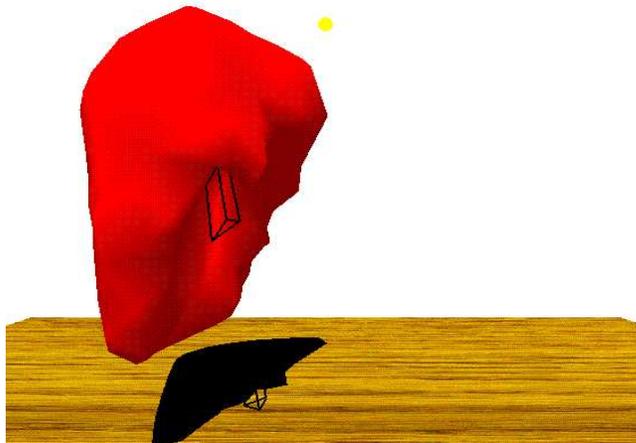


FIG. 7 – *Foie en interaction avec un outil rigide*

Les travaux actuels portent sur la modification topologique interactive (e.g. déchirer, couper) aussi que sur l'intégration de ce type de modèle dans un simulateur médicale comportant d'autres types de modèles (e.g. des systèmes articulés de corps rigides pour représenter des structures osseuse.)

6.3.2 Modélisation de corps physiques complexes et identification des paramètres

Participants : François Boux de Casson, Cenk Cavosuglu, Diego d'Aulignac, Christian

Laugier, Stephane Viera.

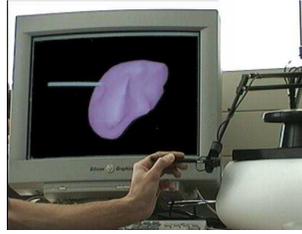


FIG. 8 – Exemple de simulation du foie avec retour de force.

Dans le cadre de l'action de recherche coopérative "AISIM" de l'INRIA et du projet CAESARE (cf. § 8.2), nous avons pu tester l'ensemble des algorithmes implantés au sein de notre simulateur dynamique *AlaDyn3D* et réaliser nos premières simulations grandeur nature. Le modèle de foie que nous avons développé a été construit à partir de données géométriques fournies par l'IRCAD. Les maillages fournis étant trop «fins» pour une simulation interactive (1500 faces et 8000 tétraèdres), une version simplifiée a été construite, elle est composée d'environ 370 faces et 1151 tétraèdres (la discrétisation volumique a été obtenue à l'aide du mailleur GHS3D développé par le projet Gamma à Rocquencourt).

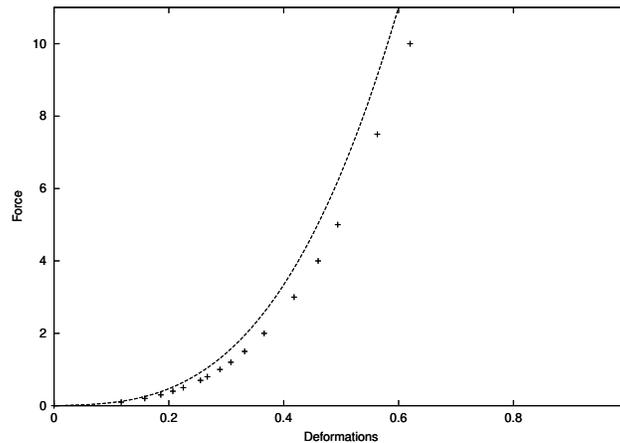


FIG. 9 – La courbe en pointillés est un tracé de la loi de comportement de chaque ressort composant le modèle et les croix sont issues d'essais effectués sur le modèle cylindrique.

En utilisant ce modèle géométrique simplifié et une implantation optimisée, nous sommes arrivé à une simulation interactive tournant à 300Hz, ce qui permet un retour de force satisfaisant. Conformément à la réalité, ce modèle du foie humain présente un comportement mécanique non-linéaire et hétérogène. La non-linéarité est obtenue par l'utilisation de ressorts répondant à une loi polynomiale de degrés trois. Les paramètres de cette loi polynomiale ont été réglés à partir de données contrainte/déformation mesurées in vivo sur un foie humain

([CFD⁺⁰⁰]). Des essais mécaniques virtuels en traction sur un modèle cylindrique ont montrés que la loi de comportement des ressorts composant un modèle se répercute bien au niveau global, ce qui valide expérimentalement notre approche (Figure 9, [23]). L'hétérogénéité du foie est modélisée en réglant différemment les paramètres de viscosité de sa peau (appelée capsule de Glisson) et de son intérieur (le parenchyme). Ces deux composantes présentent alors des comportements dynamiques très différents, dont la combinaison engendre un comportement global qualitativement réaliste (si on exclut les effets bio-mécanique de l'arbre vasculaire).

Par ailleurs, dans le cadre de la collaboration France-Berkeley (*cf.* § 8.3.4) et en coopération avec l'équipe GMCAO¹⁶ du laboratoire TIMC-IMAG¹⁷, nous avons commencé une étude de modélisation d'une cuisse humaine pour intégrer une composante tactile au sein d'un simulateur d'entraînement pour le geste échographique. L'année dernière, nous avons procédé à une phase d'acquisition de données mécaniques et géométriques sur une cuisse réelle (celle de Diego d'Aulignac), a fin de construire un modèle de la cuisse physiquement réaliste et comportant des lois de déformation non-linéaire (voir rapport d'activité 1999). Le travail actuelle consiste à affiner le modèle et a le coupler à un processus de génération des images échographiques développé par le laboratoire TIMC-IMAG.

6.3.3 Interactions 3D

Participants : François Boux de Casson, Remis Balaniuk, Anton Deguet, Diego d'Aulignac, Christian Laugier, Emmanuel Mazer, Kenneth Sundaraj, Olivier Lebeltel.

Nous étudions trois aspects différents des interactions : la caractérisation géométrique des interactions, le calcul des forces ou changements d'états engendrés par les interactions, et les effets sur les corps eux mêmes (déformations et changements de topologie telles que les "ruptures" ou les "découpes").

Caractérisation géométrique des interactions. La caractérisation géométrique des interactions comporte deux volets différents : *la détection de collision* et *la caractérisation des contacts*. La détection de collision permet de décider si deux objets sont en situation d'interaction ; la caractérisation de contacts permet de définir géométriquement les éléments en contact et le volume d'interpénétration fictive (approximation de la déformation locale physique due à la collision).

La *détection de collision* consiste à comparer les positions relatives des objets en mouvement afin de déterminer si, à un instant donné, ces objets sont en situation de collision. Les différentes méthodes envisageables dépendent des choix de modélisation des objets (surface implicite, soupe de polygones, $> \frac{1}{4}$) mais aussi de leurs propriétés géométriques (convexe/concave), et physiques (rigide/déformable).

16. Gestes Médicaux et Chirurgie Assistés par Ordinateur.

17. Techniques de l'Imagerie, de la Modélisation et de la Cognition.

[CFD⁺⁰⁰] F. CARTER, T. FRANK, P. DAVIES, D. MCLEAN, A. CUSHIERI, « Biomechanical Testing of Intra-abdominal Soft Tissues. », *in* : *Medical Image Analysis*, 2000. soumis, non publié.

Pour les objets rigides et convexes, nous avons développé une nouvelle approche qui combine l'efficacité de l'algorithme de Lin-Canny [LC91] et la simplicité de l'algorithme de Gilbert-Johnson-Keerthi [GJK88]. Elle s'appuie sur une étude systématique des problèmes de divergence numérique de ce dernier algorithme. Nous avons proposé des solutions qui rendent la méthode plus robuste [41].

Afin d'optimiser les calculs, nous avons aussi adopté une approche classique d'optimisation basée sur l'utilisation d'une hiérarchie de type arbre binaire de boîtes englobantes alignées sur les axes (AABB Tree). Cette approche permet de converger rapidement vers les régions de collisions potentielles, et ceci pour des objets convexes ou concaves, rigides ou faiblement déformables. Elle ne permet pas cependant de caractériser facilement les collisions, ce qui nécessite de coupler cette méthode avec des méthodes appropriées (e.g. l'algorithme mentionné précédemment pour les objets rigides convexes ou les objets rigides concaves décomposés en éléments convexes, ou l'algorithme que nous avons développé antérieurement pour les objets déformables).

La *caractérisation des contacts* est nécessaire pour pouvoir ensuite calculer la réponse physique à la collision ou au mouvement au contact. Les algorithmes classiques de détection de collision ne permettent pas de calculer les paramètres nécessaires, en particulier lorsque les objets sont déformables. Dans notre cas il faut déterminer *tous* les éléments géométriques du modèle qui interviennent dans le contact, ou, plus exactement, dans l'interaction fictive des objets au moment du test de collision. Ceci nécessite une analyse de la géométrie locale des parties potentiellement en collision (et pas seulement des entités géométriques en intersection). Nous avons développé une méthode qui permet de calculer les parties en interaction et de calculer une approximation du volume d'interaction fictive. Cette méthode a été publiée dans [42], et l'article a été finaliste pour le prix du meilleur papier à ICARCV'2000.

Changements de topologie. Dans un contexte de simulation d'opérations chirurgicales, il est bien entendu primordial de pouvoir simuler des opérations de découpe de façon interactive. Simuler la rupture de corps soumis à des déformations (ou des contraintes) trop importantes, relève plus du domaine des environnements virtuels et des jeux vidéo, mais peut également être utile dans une simulation médicale (e.g. pour séparer la vésicule biliaire du foie ou pour simuler les effets d'une erreur du chirurgien) [24].

Deux phases entrent en jeu pour simuler ces changements de topologie :

1. Évaluation d'un critère de rupture ;
2. Remaillage local.

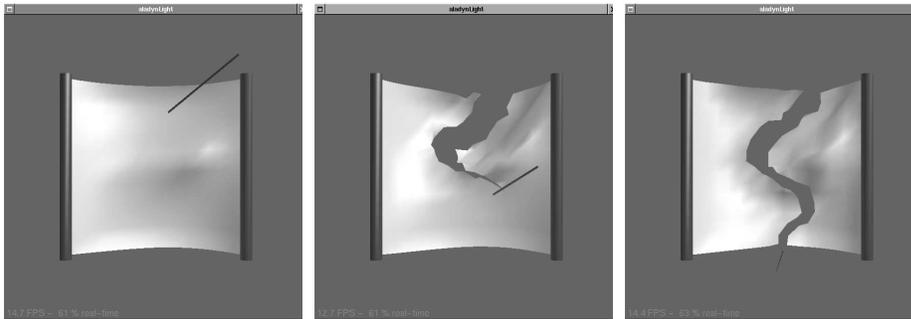
Nous avons fait le choix de traiter la simulation des découpes comme un sous problème de la simulation des ruptures, car pour les découpes, le critère de rupture est en fait limité à un

-
- [LC91] M. C. LIN, J. F. CANNY, « A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 4, p. 1008–1014, Sacramento, CA (US), avril 1991.
- [GJK88] E. G. GILBERT, D. W. JOHNSON, S. S. KEERTHI, « A Fast Procedure for Computing the Distance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space », *IEEE Journal of Robotics and Automation* 4, 2, avril 1988, p. 193–203.

test de détection de collision entre un outil virtuel, contrôlé en position par l'utilisateur, et le modèle qu'il est en train de découper.

Afin de conserver l'interactivité des modèles simulés, il est primordial de contrôler l'augmentation de la complexité de ces modèles durant les opérations de remaillage local. Les approches, dans la littérature, sont de deux types : « destruction » ou « subdivision ». Les approches « destruction » modélisent les changements de topologie en éliminant des primitives du modèle. Elles présentent l'avantage de diminuer à chaque remaillage la complexité du modèle, mais font disparaître de la matière, ce qui est préjudiciable au réalisme des simulations. Les approches « subdivision » favorisent la précision de la simulation, en subdivisant certaines primitives du modèle, le long des directions de rupture ou de découpe. Cette précision de simulation se fait au prix d'une augmentation conséquente du nombre de primitives composant le modèle, et est incompatible avec une simulation interactive. Nous proposons quant à nous une troisième approche, consistant à séparer les primitives les unes des autres. La complexité du modèle reste donc constante, et autant d'opérations de découpe ou de rupture peuvent être simulées, sans dégrader les performances du simulateur. Bien entendu, les principales propriétés physiques des modèles dont la topologie est modifiée sont conservées (volume, masse, élasticité). Pour l'instant ces opérations de déchirement et découpe fonctionnent de manière très satisfaisante sur des tissus surfaciques. Il reste encore quelques problèmes de cas limite à résoudre dans les cas 3D (cas arête-arête sur de tétraèdres internes) pour obtenir des résultats identiques en 3D).

FIG. 10 – *Découpe interactive d'un modèle dynamique surfacique.*



Interface Haptique. L'interaction haptique nécessite des fréquences de mise à jour de l'ordre de kilohertz afin de donner une sensation véritable du toucher. La simulation dynamique de scènes complexes n'arrive pas à des fréquences de calcul supérieures à 100 Hertz. Cette différence de fréquences peut donner des problèmes de stabilité et occasionner de damage sur l'opérateur.

Au cours de l'année 1999, nous avons développé le concept de *modèle haptique tampon* pour résoudre les problèmes occasionnés pour cette différence de fréquences. Ce modèle a pour objectif d'émuler localement le système de réalité virtuelle, et d'estimer les retours d'efforts

correspondant [RKO97] [ZS95], respectant la fréquence demandée par le dispositif haptique.

Cette approche repose sur l'utilisation de modèles locaux analytiques paramètres. L'interface haptique est conçue comme un module externe du système de réalité virtuelle, et l'estimation des forces du retour haptique est faite indépendamment des modèles de collisions utilisés par le simulateur dynamique. Le modèle local que on utilise pour émuler localement les interactions entre un objet virtuel et le système haptique utilise des surfaces simples de type sphérique ou plane.

Cette ancienne approche marche bien pour des objets convexes ou qui n'ont pas très grandes déformations. Notre nouvelle approche est orientée aux objets virtuels très déformables. On continue en utilisant l'idée du modèle tampon cependant des sphères ou des planes ne sont plus utilisés comme modèles locaux.

Le modèle intermédiaire avec lequel on fait l'interaction haptique, est construit à partir de la topologie locale de l'objet virtuel et l'estimation des forces haptiques est fait en utilisant le modèle du "proxy" [RKO97] [ZS95].

Pour obtenir la topologie locale de l'objet on attache une bar infinie à l'outil virtuel. La bar identifie la facette la plus probable à être touchée. Puis, les facettes voisines sont trouvées pour former le modèle locale de manière typologique. L'interface haptique interagit avec les planes qui correspond à chaque facette. Puisque on travaille avec des objets déformables, les équations des planes changent et sont mis à jour à la fréquence de simulation.

Le retour d'effort est obtenu à partir de la loi de Hooke en considérant la distance minimal entre la position haptique et la position de l'outil sur le modèle intermédiaire de l'objet virtuel.

$$Force = K(\min distance = \|\vec{x} - \vec{x}_{haptic}\|)$$

On résoudre le problème de minimisation en utilisant les multiplicateurs de Lagrange (voir [36]) en respectant les contraintes du modèle local.

$$L = \frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{x}_{haptic})^T(\vec{x} - \vec{x}_{haptic}) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i [\vec{n}_i(\vec{x} - \vec{p}_i)]$$

La simulation physique, le rendu graphique et la détection de collision sont fait en utilisant Aladyn3D-L.

Cette approche à été utilisée pour l'interaction haptique avec un foie virtuel [10] et aussi avec une cuisse humaine virtuelle dans le cadre d'un simulateur échographique [25].

Calcul des forces d'interaction Le calcul des forces d'interaction que nous avons souhaité étudier est basé sur les modèles dit de pénalité. Ces modèle utilisent une approximation des modèles de déformation visco-élastiques de Kelvin-Voigt et nous nous intéressons plus particulièrement à une variante non linéaire validée en mécanique. Ces travaux ont déjà été publiés au sein du projet SHARP, plus particulièrement pour des objets rigides.

[RKO97] D. RUPINI, K. KOLAROV, K. O., « Haptic Interaction in Virtual Environments », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Grenoble (FR), septembre 1997.

[ZS95] C. ZILLES, J. SALISBURY, « A Constraint-based God-object Method For Haptic Display », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, PA (US), octobre 1995.

Pour des objets déformables, il faut calculer plusieurs forces et ces forces doivent être réparties de manière convenable sur les surfaces en interaction. La première approche consiste à calculer des forces pour chaque paire de facettes, pour toutes les facettes contenues dans l'interaction (complexité quadratique, mais ne nécessite pas le calcul du contour). La seconde approche consiste à calculer explicitement une surface médiane entre les surfaces en interaction (par calcul itératif de surface de Voronoï) puis déduire localement la profondeur de l'interpénétration (complexité pratique linéaire mais nécessite le contour). Ces deux méthodes sont en cours d'implémentation afin de les tester et les comparer.

6.3.4 Synthèse du mouvement

Participants : David Raulo, Juan-Manuel Ahuactzin, Christian Laugier.

Il s'agit ici de définir des mécanismes aptes à engendrer automatiquement certaines classes de mouvements et de comportements pour un agent virtuel (ou "Robot virtuel"). On considère alors que l'agent virtuel est doté de capacités de mouvement autonome.

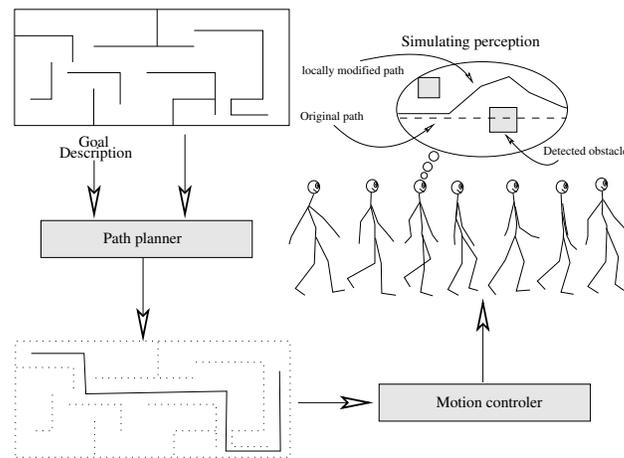


FIG. 11 – *Structure décisionnelle pour un agent autonome virtuel.*

Ces deux dernières années, nous avons développé les principes de base d'une fonction de déplacement autonome en environnement virtuel. Cette fonction comporte un mécanisme de planification de trajectoires sans collision dérivé de la Robotique, un contrôleur de mouvement permettant de suivre de manière réactive une trajectoire donnée et des mécanismes de perception simplifiés. Au cours de l'année 2000, ce principe a été implanté dans notre plate-forme logicielle AlaDyn3D et utilisé pour donner un comportement de type "footballeur" à un personnage articulé. Celui-ci évolue dans un environnement virtuel soumis aux lois de la Physique de Newton et pouvant comporter des corps déformables.

Le personnage ou "Robot Virtuel" est alors représenté par une hiérarchie de chaînes cinématiques et de corps solides (voir rapport d'activité 1999) : chaque segment correspond à un solide (e.g. l'avant-bras gauche), et chaque noeud à une articulation, pouvant comprendre chacune de 1 à 3 degrés de liberté (des rotations). A chaque instant, la *position* du personnage

dans le monde virtuel est définie par le repère associé à la racine de l'arbre cinématique, et sa *posture* est décrite par l'ensemble des valeurs articulaires. Sa position relative par rapport aux obstacles et objets d'intérêt (i.e. le ballon) est alors calculée en fonction de sa perception de l'environnement (perception globale pour l'instant). Afin d'accélérer le calcul des collisions, des boîtes englobantes ont été associées à cette structure (voir Figure 12).

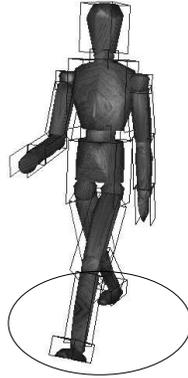


FIG. 12 – *Modèle du Robot Virtuel (chaînes cinématiques, corps rigides articulés, boîtes englobantes pour le calcul des collisions).*

Le “contrôleur de mouvement” comporte deux fonctions complémentaires : la fonction de “locomotion” qui assure la coordination du mouvement des divers éléments du robot virtuel lors d’un déplacement réalisé dans un mode prédéfini, et la fonction de “suivi de chemin” qui génère les paramètres globaux (orientation, vitesse, accélération) du déplacement.

Pour la fonction de *locomotion* (marche ou course), nous avons utilisé une méthode classique consistant à coupler des données issues de capture du mouvement humain avec un algorithme d’interpolation par courbes de Bézier (les travaux des projets Bip et Imagis sur ce sujet pouvant parfaitement s’intégrer dans cette approche).

En ce qui concerne le “*suivi de chemin*”, nous avons utilisé dans un premier temps un simple contrôleur de type PID auquel ont été ajoutées quelques contraintes simples sur les vitesses et accélérations linéaires et angulaires. Dans la version actuelle la réactivité par rapport aux obstacles proches est réalisée par un comportement de type “évitement” qui fait appel au planificateur de trajectoires (voir Figure 11)

Le chemin à suivre est fourni en temps réel par un planificateur géométrique. Dans l’implantation actuelle, celui-ci consiste en une version générique de l’algorithme *ACA* [7]. Ce planificateur est implanté orienté objet et permet de définir un problème de planification de trajectoires grâce à la dérivation de quatre classes appelées *path driver*, *goal predicate*, *obstacle discriminator* et *local planner*. Ces quatre classes contiennent des fonctions virtuelles à être écrites par l’utilisateur en fonction du problème de planification de trajectoires à résoudre. De cette façon, notre planificateur peut chercher une solution au problème sans s’occuper du type de trajectoires utilisées, du but à atteindre, des obstacles de l’environnement ou du planificateur local utilisé. L’idée générale du planificateur générique est de pouvoir écrire facilement et rapidement des planificateurs pour des tâches différentes ou similaires des robots virtuels. En

plus, l'information obtenue lors de la résolution d'un problème de planification de trajectoires (i.e. un ensemble de balises dans l'espace de recherche du problème) pourrait être utilisée pour atteindre des buts de caractéristiques différentes.

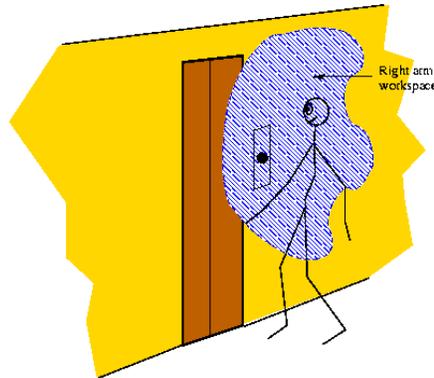


FIG. 13 – *Espace de travail pour une tâche de cinématique inverse.*

Notre approche a été validée expérimentalement avec un environnement simulé dynamique comportant des obstacles rigides (murs), des objets déformables (drapeaux que l'on peut déformer et/ou déchirer), un ballon dont le comportement est soumis aux lois de la physique de Newton, et un personnage articulé autonome ayant la capacité de "jouer au ballon" de manière automatique (et en temps réel). Ainsi, la version générique de l'ACA a déjà permis de planifier des trajectoires pour un personnage virtuel autonome qui cherche à atteindre des buts fixes ou en mouvement, de même que pour un véhicule holonome (*cf.* § 6.1.1). Actuellement nous développons les classes dérivées pour résoudre les problèmes suivants : (1) amener une extrémité du personnage virtuel (e.g sa main) vers une position déterminée (cinématique inverse, voir Figure 13) (2) déplacer un objet d'une position à une autre (manipulation).

Le travail actuel porte aussi sur le développement des fonctions de "perception virtuelle" mentionnées précédemment, ainsi que sur le développement de mécanismes pour le codage et la gestion de comportements réactifs. Nous essayons d'utiliser pour cela l'approche Bayésienne qui avait été utilisée avec succès sur des petits robot mobiles (par O. Lebeltel dans le cadre de sa thèse). Cette approche devrait permettre de compléter l'architecture décisionnelle actuelle (voir Figure 11) et de générer des comportements et mouvements plus réalistes.

6.4 Outils probabiliste pour la géométrie et la robotique

Participants : Pierre Bessière, Emmanuel Mazer, Kamel Mekhnacha, Olivier Lebeltel, Ruben Garcia.

Plusieurs moteurs d'inférence probabilistes ont été développés dans le passé en collaboration avec le laboratoire Leibniz. Ces moteurs ont été utilisés dans le domaine de la programmation des robots et dans celui de la CAO robotique. Ces travaux ont fait l'objet de deux thèses obtenues

avec les félicitations du jury. [Leb99][Mek99], le papier de Kamel Mekhnacha [34] sur le modèleur CAO probabiliste ayant été nommé pour le prix du meilleur papier de IROOS 2000.

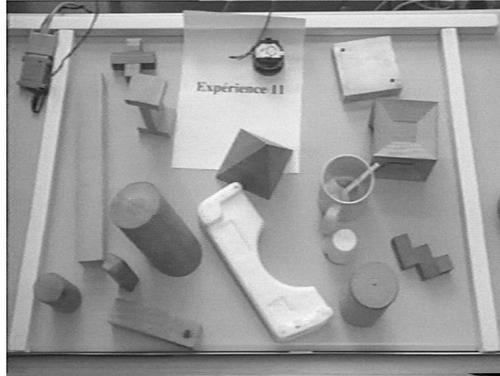


FIG. 14 – *Reconnaissance d'objet par le moteur d'inférence (collaboration Leibniz)*



FIG. 15 – *Une copie d'écran du modèleur probabiliste (collaboration Leibniz)*

Le nouveau moteur d'inférence OpenPI a été testé sur la plateforme "portique + bras" mise à disposition par les moyens robotiques de l'INRIA. L'objet de ce test était la poursuite d'une cible par une caméra embarquée.

Par ailleurs, le moteur d'inférence a été utilisé dans le projet CARSENSE pour la fusion multi-modale. Dans ce projet il s'agit de fusionner au mieux des informations provenant de plusieurs sources (radar, laser, ultra-son, vision) dans le but de construire incrémentalement une carte de l'environnement.

Ces deux tests doivent être considérés comme préliminaire. Ils ont cependant le mérite de montrer l'intérêt pratique de l'API développée.

Des expérimentations utilisant l'inférence bayésienne ont été menées pour la calibration caméra-robot. Le moteur a été intégré avec le simulateur dynamique Aladyn pour la com-

[Leb99] O. LEBELTEL, *Programmation bayésienne des robots*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), octobre 1999.

[Mek99] K. MEKHNACHA, *Méthodes probabilistes bayésiennes pour la prise en compte des incertitudes géométriques: application à la CAO-robotique*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juillet 1999.

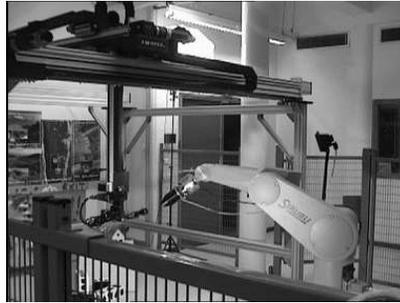


FIG. 16 – Application de l'inférence probabiliste au contrôle de robot: suivit par la tête mobile (portique) d'une cible portée par un bras

mande probabiliste d'avatar. L'intérêt de l'approche étant d'injecter une part d'incertain dans le comportement des joueurs virtuels.

D'autres application du moteur d'inférence sont en cours notamment dans le domaine médical et plus spécialement dans l'aide à la pose de prothèse du genou(collaboration avec AESCULAP). L'intégration du moteur dans le système de navigation d'aide au chirurgien permettra à celui-ci de tenir compte des incertitudes lors de son intervention.

Citons enfin une application du moteur d'inférence au "profiling". Cette application est envisagée dans le cadre d'une collaboration avec la société TEAMLOG et la société MONARX. Elle consiste à inférer en probabilité une offre de service au sens large. Par exemple la page web susceptible d'intéresser au plus l'utilisateur (application au e-commerce), le patch le plus pertinent pour une configuration matériel (application au serveur de tété-maintenance) le produit financier le plus adapté (application au marketing bancaire).

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Actions de développement Praxitèle et LaRA

Le projet Sharp a participé activement à l'action de développement Praxitèle <http://www-rocq.inria.fr/praxitele/> [1994-1997] portant sur le concept du transport urbain public et individuel. Nous participons maintenant à une nouvelle action de développement baptisée LaRA <http://www.lara.prd.fr> sur le thème de la « route automatisée », qui implique des organismes de recherche (Inrets, Inria, LCPC, ENCPC, ENSMP, ENST) et des partenaires industriels (Thomson-Detexsys, EDF, PSA, Renault, etc.). Dans LaRA, tout comme dans Praxitele, la contribution de Sharp porte sur l'aspect « conduite automatique ».

7.2 Projet Priamm « Studio virtuel »

Le projet Sharp participe activement au programme PRIAMM¹⁸ du ministère de l'industrie dans le cadre du projet VISTÉO¹⁹. Ce projet a commencé en mai 2000 pour une durée de

18. Programme pour l'Innovation dans l'Audiovisuel et le Multimédia.

19. Système temps-réel intégrant vidéos et mondes virtuels

24 mois. L'objectif de ce projet est de développer un ensemble d'outils logiciels permettant la mise en œuvre de studios virtuels physiquement réalistes incluant des interactions « physiques » entre le personnage réel et le studio virtuel dans lequel il est plongé. Ce projet, pour lequel la société Getris Image GDI est maître d'œuvre, implique les projets Sharp et Movi de l'INRIA.

7.3 Robosoft

Dans le cadre de nos travaux dans le domaine du transport urbain public et individuel, nous avons initialisé un accord portant sur l'industrialisation de véhicules de type Cycab, dont trois exemplaires ont été vendus à NTU (Singapour). Depuis, Robosoft a été choisi par l'INRIA, suite à un appel d'offre, pour industrialiser les véhicules Cycab. En 1999, nous avons également répondu avec Robosoft à un appel d'offre de la région Rhône-Alpes.

7.4 Carsense

Projet européen IST 12224 Carsense, "Sensing of Car Environment at Low Speed Driving" <http://www.carsense.org> <http://www.cordis.lu/ist/projects/99-12224.htm> [janvier 2000-décembre 2003]. Ce projet européen porte sur la mise au point d'un système de perception multi-capteurs destiné à être embarqué sur un véhicule automobile. Il implique un certain nombre d'industriels européens du secteur automobile (Renault, BMW, Lucas Varity, Thomson Detexys, Ibeo, etc.) et des instituts de recherche (Inria, Inrets, Livic). Dans ce projet, nous traitons la partie fusion de données.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions régionales

Groupement Scientifique d'Établissement « Véhicule Électrique ». Ce GSE de l'Institut National Polytechnique de Grenoble a démarré en juillet 1994. Nous y avons la responsabilité de l'axe « Véhicule Intelligent » et nous participons dans ce cadre à l'organisation de la conférence bisannuelle C-Velec.

Projet Gravir-Leibniz. Ce projet sur la prise en compte de l'incertitude (avec le laboratoire Leibniz) a reçu le label Imag pour quatre ans et obtenu pour cela un soutien financier de l'Imag.

8.2 Actions nationales

Pôles CNRS Structures et Machines Intelligentes. Nous sommes impliqués dans quatre de ces pôles : « Robots autonomes d'intervention sur site non-coopératif » (coordinateur : Laas à Toulouse), « Coopération homme-machine pour l'aide à la conduite automobile » (coordinateur : laboratoire Heudiasyc à Compiègne), « Aide au geste chirurgical » (coordinateur : laboratoire TIMC à Grenoble) et « Téléopération et Réalité Virtuelle » (coordinateur : Commissariat à l'Énergie Atomique).

GDR Coopération Homme-Machine pour l'Assistance à la Conduite Ce GDR du CNRS a démarré en septembre 1999. Il a pour mission l'étude de l'activité de conduite automobile et l'identification et la mise au point de fonctions d'assistance destinées à en améliorer le confort et la sécurité. Nous y sommes impliqués en compagnie de chercheurs issus des secteurs des Sciences pour l'Ingénieur, des Sciences de la Vie et des Sciences Humaines et Sociales.

paragrapheAction de Recherche Coopérative Inria AISIM²⁰ et projet Caesar. Cette action de recherche, dont l'objectif est la modélisation d'organes pour la chirurgie virtuelle, a démarré en novembre 1997 pour une durée de deux ans. Nous y sommes impliqués en compagnie l'IR-CAD²¹ de Strasbourg et des projets Inria Inria Epidaure, Sinus, Imagis, Mostra et M3n. Cette action s'est terminée en novembre 1999 et les résultats obtenus ont permis d'obtenir un projet de 2 ans sur la simulation chirurgicale soutenu par le ministère de la Recherche (programme «Télémédecine»). Ce projet baptisé Caesar implique les cinq projets Inria précédents, l'Ircad et la société ESI. Durant l'année 2000, un stagiaire de DESS a secondé François Boux de Casson dans ses travaux de thèse sur les changements de topologie interactifs dans les modèles déformables. L'objectif de ces travaux est de proposer des méthodes et algorithmes pour modéliser de la façon la plus précise possible, tout en garantissant une simulation interactive, des opérations de découpe et de déchirement sur des modèles dynamiques. L'implantation des méthodes est terminée pour les objets surfaciques et en cours de finition pour les corps volumiques.

GDR I3. C. Laugier est responsable, avec R. Alami du Laas (Toulouse), de l'axe transversal «Robotique» du GDR I3, créé en 1997.

Collaborations internes à l'INRIA - Avec le groupe IMAGIS sur le thème de l'animation et de simulation dynamique.

- Avec le service des Moyens Robotiques de l'UR, sur le Cycab et intégration de capteurs.
- Avec le projet Movi, sur le thème du Studio Virtuel (financement Priamm).

8.3 Relations bilatérales internationales

8.3.1 Europe

8.3.2 Russie et Asie Centrale

Institut Franco-Russe Liapunov. L'institut Liapunov qui est un institut commun de l'Inria et de l'Académie des Sciences de Russie, nous a accordé son soutien pour une collaboration de deux ans avec l'université de St. Petersburg (équipe du Prof. V. A. Yakubovich) sur le thème *Controller design for autonomous car steering* [juillet 2000 – juin 2002]. Ce projet est consacré au problème de la conception d'un régulateur qui assure le mouvement stable et robuste d'un véhicule le long d'un chemin imposé et inconnu d'avance. Les entrées du régulateur sont la distance au point le plus proche du chemin et la courbure locale du chemin en ce point. La sortie du régulateur est l'angle de rotation du mécanisme de direction. Les formules explicites décrivant la famille de tous les régulateurs destinés à résoudre ce problème ont été obtenues. Les généralisations de ce problème sont considérées.

20. Action Incitative SIMulation de chirurgie.

21. Institut de la Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif.

8.3.3 Pacifique et Asie du Sud

Collaboration avec le Japon. Depuis octobre 1997, une collaboration dans le domaine des systèmes multi-robots a démarré avec l'institut Riken de Tokyo. Igor Paromtchik a effectué dans ce cadre trois séjours de plusieurs mois à Riken.

Collaboration avec Singapour. Le laboratoire commun entre l'Université Technologique Nanyang de Singapour (NTU) et l'Inria a été inauguré en novembre 1998, dans le cadre de la collaboration scientifique sur le thème des véhicules autonomes signée par les présidents des deux institutions 2 mois plus tôt. Baptisé *Intelligent Vehicle Lab*, il représente, avec les 3 véhicules Cycab achetés par NTU, l'aspect matériel de la collaboration.

Dans ce cadre, un symposium sur le transport intelligent, a été organisé en novembre 1999 (par S. Sekhavat et C. Laugier), avec le support de l'ambassade de France et la participation d'industriels français. De nombreux échanges ont également eu lieu depuis la signature, et plusieurs membres de l'équipe Sharp (Th. Fraichard, A. Lambert, F. Large, C. Laugier, A. Scheuer et S. Sekhavat) ont effectué des séjours à NTU, de courte durée pour des conférences ou des réunions d'avancement (5 en 1999 et 3 en 2000), ou de plusieurs mois pour des transferts de connaissances (3 en 1999 et 1 en 2000). Il est à noter également que Dr. JianZhou Lu, qui effectuait un post-doc au sein du projet Sharp est maintenant chercheur assistant à NTU au sein du laboratoire commun, où il travaille sur les Cycab.

Dans le cadre des relations internationales, le projet Sharp a également accueilli 2 stagiaires ingénieurs de NTU sur une période de 6 mois (Kok Hin Chan, Priscilla Pek) ainsi que des chercheurs invités pour une période d'un mois (Dr. M. Xie en 1999 et Dr. M. Pasquier en 2000).

Deux nouveaux stagiaires ingénieurs de NTU sont attendus en janvier 2001 pour des stages de 6 mois (Emy Sukowo, Pok Kiam Tan).

Enfin, le groupe "simulation dynamique" de Sharp inclut depuis 2 ans (en tant que stagiaire puis étudiant DEA), Kenneth Sundaraj qui effectue maintenant sa thèse.

8.3.4 Amérique du Nord

Collaboration avec l'université de Vancouver (Canada). La collaboration sur les aspects manipulation dextre, commencée lors de la visite du professeur K. Gupta à Grenoble en 1995, s'est poursuivie par plusieurs séjours longs de Moëz Cherif, et par des visites croisées. K. Gupta était en visite en juin de cette année et plusieurs publications communes sont apparues en 2000. D'autres publications apparaîtront l'année prochaine.

Collaboration avec l'université de Californie, Berkeley (USA). Dans le cadre du programme France-Berkeley, une collaboration d'un an sur le thème de la simulation dynamique avait été menée en 1997-1998. Cette collaboration s'est poursuivie cette année dans le cadre d'un nouveau projet sur les simulateurs de chirurgie soutenu par le fond France-Berkeley (avec l'équipe de S. Sastry). Plusieurs échanges entre les deux organismes ont été effectués: R. Balaniuk et D. d'Aulignac, séjour à Berkeley; M. Cavusoglu, séjour à l'INRIA.

Collaboration avec l'université de Stanford. L'étude de retour d'effort dans des environnements virtuels et les déformations élastiques non-linéaires ont été les sujets de collaboration avec le Centre de Technologie Avancée en Chirurgie de l'Université de Stanford. Trois stages ont été effectués (C. Mendoza, R. Balaniuk et I. Ferreira-Costa) dans l'équipe dirigée par le Professeur Salisbury.

Collaboration avec le Mexique. Le réseau thématique Image & Robotique est un réseau qui a été mis en place à la suite des journées Franco-Mexicaines d'informatique et de d'automatique (JFMIA'99) qui ont eu lieu à Xalapa au Mexique en Mars 1999. Le principal objectif du réseaux Image & Robotique est de promouvoir et d'accroître les coopérations Franco-Mexicaines dans le domaine de l'Image et de la Robotique, et ceci au niveau des aspects scientifique, académique, et industriel. En 2000 nous avons participé activement dans le développement de ce réseaux en tant que enseignants et organisateurs d'une première édition d'une école d'été en Image & Robotique. Cette école a eu lieu en France à l'INRIA Rhône-Alpes. La formation a été faite sur une période de deux semaines (du 26 juin 2000 au 7 juillet 2000), avec un volume horaire de 63 heures de cours. La participation à cette école était de 72 étudiants (46 venant du Mexique, 18 de France, et 8 du reste de l'Europe). Un appel d'offre pour des bourses pour des étudiants des Universités Mexicaines a été publié sur le site Internet de l'école: Espagnol: <http://www.inrialpes.fr/sharp/people/ahuactzi/verano.html> Anglais: <http://www.inrialpes.fr/sharp/people/ahuactzi/summer.html> Un total de 114 demandes ont été reçues de diverses institutions Mexicaines. Quatorze enseignants français et trois mexicaines ont participé dans cette manifestation scientifique. Un rapport du déroulement de l'école peut être trouvé à : <http://www.inrialpes.fr/sharp/people/ahuactzi/SSIR/RapportEcole.html>

8.3.5 Amérique du Sud et Amérique Centrale

Coopération avec l'université de Brazilia (Brésil). Dans le cadre du programme de coopération Inria-Brésil, nous collaborons avec l'université de Brazilia sur les thèmes robotique mobile et programmation des robots. L'action contractuelle sur le thème du parking automatique a donné lieu à deux missions l'une de S. Skehavat payée par Fiat ayant pour objectif de définir des objectifs techniques et l'autre de Jorge Hermosillo ayant pour objectif l'installation d'un logiciel d'odométrie sur le véhicule termique du Graco.

8.4 Accueils de chercheurs étrangers

En 2000, le projet Sharp a accueilli les chercheurs suivants :

- Pr. Zvi Shiller, Professeur à University of California, Los Angeles (juillet 2000).
- Dr. Michel Pasquier, Professeur associé à Nanyang Technological University, Singapour (Juin 2000).

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

- T. Fraichard a participé à l’organisation d’une session invitée *Tools for future transport systems* pour l’Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapour, décembre 2000.
- T. Fraichard a participé dans le comité de programme de la conférence IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu (JP), novembre 2000.
- C. Laugier et J-M. Ahuactzin ont participé en tant que responsable principal et organisateur local respectivement de l’Ecole d’été en Image & Robotique effectuée à l’INRIA Rhône-Alpes, Grenoble, France, juin-juillet 2000.

9.2 Enseignements universitaires

Outre des interventions ponctuelles en second cycle universitaire, les membres du projet ont assuré les enseignements suivants :

- Cours “Motion planning” : Ecole d’été en Image & Robotique, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble (FR) [juin 2000]. *Enseignants : J-M Ahuactzin et T. Fraichard.*
- TD de bases de données relationnelles (MySQL + PHP) : deug STPI 2^e année. TD de langage objet (UML/Java) : deug MIAS 2^{ième} année *Enseignant F. Large.*
- Cours invité “Robotique et planification de mouvement” : 5^eme année, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologies (ISSAT), Damas (SY) [février 2000]. *Enseignant T. Fraichard.*
- TD en Robotique en DEA “Image, Vision, Robotique” : INPG²², Grenoble, (FR). *Enseignant : Th. Fraichard.*
- Cours “Direct/Inverse kinematics, path generation, robot programming and applications” : Ecole d’été en Image et Robotique, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble (FR) [juin 2000]. *Enseignant C. Laugier.*
- Cours “Architecture et programmation des robots” : DEA “Image, Vision, Robotique”, INPG, Grenoble (FR). *Enseignant : C. Laugier.*
- Cours “Modélisation et planification de tâches en robotique” : DEA “Image, Vision, Robotique”, INPG, Grenoble, (FR). *Enseignant : C. Laugier.*
- Cours “Robotique” : en valeur C du Cnam. *Enseignant : C. Laugier et J. Troccaz.*
- “Tutorial on Motion Autonomy and Advanced Man-Machine Interface Technologies in New Robotics Applications” : Int. Conf. in Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV’2000), Singapour, décembre 2000. *Enseignant : C. Laugier.*

22. Institut National Polytechnique de Grenoble.

- Cours “Bayesian robot programming” : Ecole d’été en Image et Robotique, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble (FR) [juin 2000]. *E. Mazer, P. Bessière & O. Aycard*
- Cours “Geometrical Modeling” : Ecole d’été en Image et Robotique, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble (FR) [juin 2000]. *E. Mazer, P. Bessière & O. Aycard*

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

La diffusion des résultats et la participation active à des manifestations scientifiques internationales représentent deux aspects essentiels de l’activité du projet. On se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste. Concernant les invitations aux différentes manifestations scientifiques :

- D. d’Aulignac a fait un séminaire sur invitation à Pennsylvania State University en May 2000 sur le sujet *Modeling human tissue for medical simulators, Invited Seminar*.
- E. Mazer C. Laugier, S. Sekhavat et J-M Ahuactzin ont présidé des sessions dans les principales conférences internationales en robotique (IROS’2000, ICRA’2000, ISRA’2000, EU-US workshop on Motion Planning).
- E. Mazer C. Laugier ont participé en tant que conférenciers invités au “Joint EU-US Workshop on Key Research Issues and Opportunities in Motion Planning” en juin 2000 à Toulouse. C. Laugier a participé avec la conférence “Real Time Motion and Deformation Generation for VR Applications”. E. Mazer a intervenu également avec la conférence “Issues to Robot Motion Planning”
- C. Laugier a fait une conférence sur invitation à “International Mechatronics Forum” à IRIS 2000, Takamatsu, Nov. 2000 sur le sujet “Real-Time Motion Generation and Haptic Interaction in Virtual Reality Technology”.
- C. Laugier a fait une conférence sur invitation dans le *workshop* “Reality-Based Modeling” à ICRA’2000.
- C. Laugier a présenté un tutorial à San Francisco, à ICARCV, en may 2000 sur le sujet “Medical Simulation and Human Tissues Modeling”.

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l’équipe

- [1] C. BARD, C. LAUGIER, C. MILÉSI-BELLIER, J. TROCCAZ, B. TRIGGS, G. VERCELLI, «Achieving dextrous grasping by integrating planning and vision based sensing», *Int. Journal of Robotics Research* 14, 5, octobre 1995, p. 445–464.
- [2] M. CHERIF, «Motion planning for all-terrain vehicles: a physical modeling approach for coping with dynamic and contact interaction constraints», *IEEE Trans. Robotics and Automation* 15, 2, 1999, p. 202–218.

- [3] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Models and Algorithms for the Collision of Rigid and Deformable Bodies», *in: Robotics: the algorithmic perspective*, P. K. Agarwal, L. E. Kavraki, et M. T. Mason (éditeurs), A K Peters, 1998, p. 327–338, Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. Houston, TX (US). March 1998.
- [4] T. FRAICHARD, «Trajectory planning in a dynamic workspace: a ‘state-time’ approach», *Advanced Robotics 13*, 1, 1999, p. 75–94.
- [5] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Dynamic Simulation: Model, Basic Algorithms, and optimization», *in: Proc. of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, Toulouse (FR), juillet 1996.
- [6] C. LAUGIER, P. GARNIER, T. FRAICHARD, I. PAROMTCHIK, A. SCHEUER, «Motion Planning and Sensor-Guided Manœuvre Generation for an Autonomous Vehicle», *in: Field and Service Robotics*, A. Zelinsky (éditeur), Springer, 1998, p. 60–67.
- [7] E. MAZER, P. BESSIÈRE, J.-M. AHUACTZIN, «The Ariadne’s Clew Algorithm», *Journ. of Artificial Intelligence Research 9*, July-December 1998, p. 295–316.
- [8] A. SCHEUER, T. FRAICHARD, «Continuous-Curvature Path Planning for Car-Like Vehicles», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2, p. 997–1003, Grenoble (FR), septembre 1997.
- [9] B. TRIGGS, C. LAUGIER, «Automatic Task Planning for Robot Vision», *in: Proc. of the Int. Symp. on Robotics Research*, G. Giralt, G. Hirzinger (éditeurs), Munchen (DE), octobre 1995.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [10] F. BOUX DE CASSON, *Simulation dynamique de corps biologiques et changements de topologie interactifs*, Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry (FR), décembre 2000.

Articles et chapitres de livre

- [11] M. CHERIF, K. K. GUPTA, «Global Planning for Dexterous Reorientation of Rigid Objects: Finger Tracking with Rolling and Sliding», *Int. Journal of Robotics Research 20*, 1, janvier 2001, p. 57–84.
- [12] M. CHERIF, M. VIDAL, C. LAUGIER, «A Roadmap-based Algorithm for Planning Handling Operations in Changing Industrial Plants», *Int. Journ. of Robotics and Automation*, 2001, à paraître.
- [13] I. F. COSTA, R. BALANIUK, «Static Solution for Real Time Deformable Objects with Fluid Inside», *ERCIM News 44*, janvier 2001, p. 44–45, http://www.ercim.org/publication/Ercim_News/enw44.
- [14] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «A validation of the penalty model for collisions», *Advanced Robotics 13*, 7, 2000, p. 691–702.
- [15] T. FRAICHARD, P. GARNIER, «Fuzzy Control to Drive Car-Like Vehicles», *Robotics and Autonomous Systems 34*, 1, décembre 2000, p. 1–22.
- [16] T. FRAICHARD, «Motion Planning for Autonomous Car-like Vehicles», *ERCIM News 42*, juillet 2000, p. 26–28, http://www.ercim.org/publication/Ercim_News/enw42.

- [17] C. LAUGIER, T. FRAICHARD, «Decisional architectures for motion autonomy», *in: Intelligent vehicle technologies*, L. Vlacic, Harashima, et M. Parent (éditeurs), Arnold, 2001, à paraître.
- [18] C. LAUGIER, M. PARENT, «Towards Motion Autonomy for Future vehicles», *in: Robotics Research*, J. M. Hollerbach et D. E. Koditschek (éditeurs), Springer, 2000.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [19] J.-M. AHUACTZIN, A. PORTILLA, «A Basic Algorithm and Data Structures for Sensor-Based Path Planning in Unknown Environments», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [20] J.-M. AHUACTZIN, D. RAULO, C. LAUGIER, «A Multi Purpose Object Oriented Path Planner», *in: Proc. of the Int. Symp. on Robotics and Automation*, Monterrey (MX), novembre 2000.
- [21] R. BALANIUK, I. F. COSTA, «Physically based soft tissue simulation suitable for haptic interaction», *in: Proc. of the PHANTOM Users Group Workshop*, 2000.
- [22] R. BALANIUK, C. LAUGIER, «Haptic interfaces in generic virtual reality systems», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [23] F. BOUX DE CASSON, D. D'AULIGNAC, C. LAUGIER, «An interactive model of the liver», *in: Proc. of the Int. Symp. on Experimental Robotics*, Honolulu, HI (US), décembre 2000.
- [24] F. BOUX DE CASSON, C. LAUGIER, «Simulating 2D Tearing Phenomena for Interactive Medical Surgery Simulators», *in: Proc. of Computer Animation*, Philadelphia, PA (US), mai 2000.
- [25] D. D'AULIGNAC, R. BALANIUK, C. LAUGIER, «A Haptic Interface for a Virtual Exam of the Human Thigh», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3, p. 2452–2457, San Francisco, CA (US), avril 2000.
- [26] T. FRAICHARD, A. LAMBERT, «Planning Safe Paths for Nonholonomic Car-Like Robots Navigating Through Computed Landmarks», *in: Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, p. 447–454, Venezia (IT), juillet 2000.
- [27] D. GUO, T. FRAICHARD, M. XIE, C. LAUGIER, «Color Modeling by Spherical Influence Field in Sensing Driving Environment», *in: Proc. of IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, p. 249–254, Dearborn, MI (US), octobre 2000.
- [28] A. LAMBERT, T. FRAICHARD, «Landmark-Based Safe Path Planning for Car-Like Robots», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3, p. 2046–2051, San Francisco, CA (US), avril 2000.
- [29] F. LARGE, J. HERMOSILLO, S. SEKHAVAT, C. LAUGIER, «Using Artificial Neural Networks to Improve Sensor-Based Maneuvers for a Car-Like Vehicle», *in: Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, p. 1033–1040, Venezia (IT), juillet 2000.
- [30] F. LARGE, S. SEKHAVAT, C. LAUGIER, E. GAUTHIER, «Towards Robust Sensor-Based Maneuvers for a Car-Like Vehicle», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 4, p. 3765–3770, San Francisco, CA (US), avril 2000.
- [31] C. LAUGIER, D. D'AULIGNAC, F. BOUX, «Modeling Human Tissues for Medical Simulators», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.

- [32] O. LEBELTEL, J. DIARD, P. BESSIÈRE, E. MAZER, «A Bayesian framework for robotic programming», in: *Proc. of the Int. Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering*, Paris (FR), juillet 2000.
- [33] J. LU, S. SEKHAVAT, M. XIE, C. LAUGIER, «Sliding Mode Control for Nonholonomic Mobile Robot», in: *Proc. of the Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, p. 465–470, Singapore (SG), décembre 2000.
- [34] K. MEKHNACHA, E. MAZER, P. BESSIÈRE, «A Robotic CAD system using a Bayesian framework», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [35] C. A. MENDOZA, C. LAUGIER, «Issues in Deformable Virtual Objects Simulation with Force Feedback», in: *Proc. of the Int. Advanced Robotics Program Conf.*, Rome (IT), décembre 2000.
- [36] C. A. MENDOZA, C. LAUGIER, «A Solution for the Difference Rate Sampling Between Haptic Devices and Deformable Virtual Objects», in: *Proc. of the Int. Symp. on Robotics and Automation*, Monterrey (MX), novembre 2000.
- [37] I. E. PAROMTCHIK, H. ASAMA, «Motion Control of Visually-Coupled Mobile Robots», in: *Proc. of the Asian Control Conference*, Shangai (CN), juillet 2000.
- [38] I. E. PAROMTCHIK, H. ASAMA, «A Motion Generation Approach for an Omnidirectional Mobile Robot», in: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2, p. 1213–1218, San Francisco, CA (US), avril 2000.
- [39] D. RAULO, J.-M. AHUACTZIN, L. C., «Controlling Virtual Autonomous Entities in Dynamic Environments Using an Appropriate Sense-Plan-Control Paradigm», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [40] S. SEKHAVAT, J. HERMOSILLO, «The Cycab robot: a differentially flat system», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [41] K. SUNDARAJ, D. D'AULIGNAC, E. MAZER, «A new algorithm for computing minimum distance», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu (JP), novembre 2000.
- [42] K. SUNDARAJ, C. LAUGIER, «Fast contact localisation of moving deformable polyhedras», in: *Proc. of the Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore (SG), décembre 2000. Finalist du «best paper award».

Rapports de recherche et publications internes

- [43] K.-H. CHAN, «Integrating a path planner within the Cycab control system», *Industrial attachment program report*, Nanyang Technological University, Singapore, juin 2000.
- [44] P. KOEBEL, «Navigation d'un robot mobile avec la vidéo indexée», *Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies*, Ecole Nat. Supérieure d'Electronique et de Radioélectricité de Grenoble (FR), septembre 2000.
- [45] P. PEK, «Utilising Neural Networks for Localisation», *Industrial attachment program report*, Nanyang Technological University, Singapore, juin 2000.