

Projet Sharp

*Programmation automatique et systèmes décisionnels en
robotique*

Rhône-Alpes

THÈME 3B



*R*apport
d'Activité

1999

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	Mouvement dans le monde réel	6
3.1.1	Planification de mouvement	6
3.1.2	Structure décisionnelle pour l'autonomie de mouvement	11
3.2	Mouvement dans le monde virtuel	12
3.3	Programmation probabiliste des robots	16
4	Domaines d'applications	17
4.1	CAO-robotique	17
4.2	Route automatisée	17
4.3	Réalité virtuelle	18
5	Logiciels	19
5.1	Aladyn3D	19
5.2	Système de CAO probabiliste	20
5.3	Système de programmation probabiliste pour robot mobile	20
6	Résultats nouveaux	21
6.1	Mouvement dans le monde réel	21
6.1.1	Contraintes cinématiques	21
6.1.2	Contraintes additionnelles de l'environnement	23
6.1.3	Incertitudes	24
6.1.4	Manipulation dextre	26
6.1.5	Architecture de contrôle pour l'autonomie de mouvement	26
6.2	Mouvement dans le monde virtuel	28
6.2.1	Modèles et algorithmes de base	28
6.2.2	Modélisation d'objets complexe et identification	31
6.2.3	Interactions	33
6.2.4	Génération du mouvement	35
6.3	Programmation probabiliste des robots	36
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	37
7.1	Actions de développement Praxitèle et LaRA	37
7.2	Société Getris Image GDI	37
7.3	Projet Priamm «Studio virtuel»	37
7.4	Robosoft	37
7.5	Carsense	38

8	Actions régionales, nationales et internationales	38
8.1	Actions régionales	38
8.2	Actions nationales	38
8.3	Actions financées par la Commission Européenne	39
8.4	Relations bilatérales internationales	39
8.4.1	Europe	39
8.4.2	Russie et Asie Centrale	39
8.4.3	Pacifique et Asie du Sud	39
8.4.4	Amérique du Nord	40
8.4.5	Amérique du Sud et Amérique Centrale	40
8.5	Accueils de chercheurs étrangers	40
9	Diffusion de résultats	40
9.1	Animation de la communauté scientifique	40
9.2	Enseignements universitaires	41
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	42
10	Bibliographie	43

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Christian Laugier [DR Inria]

Secrétariat

Danièle Herzog [TR Inria, jusqu'en juillet 1999]

Benedicte Fluxa [Salarié ADR]

Personnel Inria

Thierry Fraichard [CR]

Sepanta Sekhavat [CR]

Personnel CNRS¹

Emmanuel Mazer [DR]

Ingénieur expert Inria

Igor Paromtchik [dont 8 mois à Riken (Japon)]

Collaborateurs extérieurs

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

Moëz Cherif [Univ. Simon Fraser de Vancouver (CA) (jusqu'à fin mars 1999)]

Ammar Joukhadar [Enseignant à l'ISSAT³, Syrie]

Chercheurs post-doctorants

Jiangzhou Lu [post-doctorat Inria (jusqu'en septembre 1999)]

Alexis Scheuer [Ater⁴ à l'UJF⁵ (jusqu'à fin août 99)]

Rémis Balaniuk [post-doctorat Inria]

Alain Lambert [post-doctorat Inria (septembre-octobre 1999)]

1. Centre Nat. de la Recherche Scientifique.

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

3. Institut Supérieur de Sciences Appliquées et de Technologie.

4. Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche.

5. Univ. Joseph Fourier (Grenoble I).

Chercheurs doctorants

François Boux de Casson [allocataire MENESR⁶]
Diego d'Aulignac [allocataire MENESR]
Anton Deguet [boursier Inria]
Ruben Garcia [boursier du gouvernement mexicain]
Éric Gauthier [allocataire MENESR, doctorant Inria-Leibniz (jusqu'en février 1999)]
Frédéric Large [boursier Inria]
Olivier Lebeltel [contractuel Leibniz]
Kamel Mekhnacha [boursier du gouvernement algérien (doctorant Leibniz), thèse soutenue en juillet 1999]
César Mendoza-Serrano [boursier du gouvernement mexicain]
Luis Alberto Muñoz [boursier du gouvernement mexicain, thèse soutenue en juin 1999]
David Raulo [allocataire MENESR]
Jorge Hermosillo Valadez [boursier du gouvernement mexicain]

Stagiaires

Nelson Barata [étudiant de l'IUP de Toulouse]
Laurent Caponi [thésard Cnam⁷ (jusqu'en mars 1999)]
Richard Desvigne [étudiant de l'École des Hautes Etudes Industrielles de Lille (mai-octobre 1999)]
Cyril Guilloud [étudiant de l'UJF magistère informatique, (jusqu'en septembre 1999)]
Pauline Milhe [étudiante de l'Inst. Nat. des Sciences Appliquées Toulouse (juillet-septembre 1999)]
Gaëlle Perino [étudiante de l'Univ. Paul Sabatier de Toulouse (février-août 1999)]
André Romain [étudiant de l'École Supérieure d'Electricité (mai-juin 1999)]
Jean-Charles San-Severino [étudiant de l'UJF (jusqu'en septembre 1999)]
Kenneth Sundaraj [étudiant de Nanyang Technical Univ. of Singapore (de sept. 1998 à sept. 2000)]

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

7. Conservatoire Nat. des Arts et Métiers.

Visiteurs

Oussama Al Chami [Professeur à l'Issat de Damas, Syrie (juin 1999)]

Ming Xie [Professeur à Nanyang Technical Univ. of Singapore (mai 1999)]

Alain Lambert [Ater de l'Univ. Technologique de Compiègne (avril-août 1999)]

2 Présentation et objectifs généraux

2.1 Présentation et objectifs généraux

Sharp est un projet de recherche commun entre l'Inria, le CNRS, l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et l'université Joseph Fourier de Grenoble depuis 1991 ; il est localisé à l'Inria Rhône-Alpes, et appartient également au laboratoire Gravir⁸ de la fédération Imag.

Le projet Sharp centre son activité de recherche sur l'étude des problèmes liés à la *modélisation et à la génération automatique du mouvement et des interactions physiques* 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 autonome (ou semi-autonome) dans un monde virtuel possédant des lois physiques semblables à celles du monde réel. Sharp développe dans ce cadre :

1. une algorithmique pour la *planification de mouvements* avec prise en compte explicites de contraintes classiques de non collision, mais aussi de contraintes additionnelles provenant de la nature physique du monde dans lequel les robots (réels ou virtuels) évoluent (*e.g.* contraintes cinématiques et dynamiques, incertitude) ;
2. une méthodologie pour le développement *d'architectures décisionnelles* pour le contrôle «intelligent» des mouvements, actions, et interactions de robots évoluant dans des environnements dynamiques peu ou pas connus a priori ;
3. des modèles et algorithmes pour *gérer les interactions physiques et simuler la dynamique des corps complexes en mouvement et en interaction* (déformations, collisions, forces...), en traitant de manière unifiée les mécanismes graphiques et haptiques d'interaction avec l'opérateur humain ;
4. des *outils de modélisation et de calcul probabiliste pour la géométrie*, afin de pouvoir 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 les problèmes d'interprétation de données sensorielles que nous rencontrons (ce dernier sujet étant traité en collaboration étroite avec l'équipe Laplace du Laboratoire Leibniz de l'Imag).

8. Laboratoire d'Informatique Graphique, Vision et Robotique.

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 prototypes de recherche et expérimentations réelles (*e.g.* sur des robots manipulateurs industriels, des véhicules autonomes, où des systèmes de vidéo professionnelle et de production d'images) sont ainsi réalisés en relation avec les moyens robotique de l'Inria Rhône-Alpes et des industriels ; certains de ces prototypes ont déjà donné lieu à des transferts de technologies (en CAO-Robotique et en Vidéo professionnelle en particulier).

Les applications plus particulièrement visées par cette activité de recherche sont celles de la robotique non manufacturière (*e.g.* maintenance d'équipements ou intervention en milieu hostile ou lointain, robotique de service...), en mettant l'accent sur les domaines du transport et du médical ; l'autre secteur d'application concerné par nos travaux sur le mouvement dans le monde virtuel est celui de la réalité virtuelle et du multimédia, en mettant actuellement l'accent sur les domaines des effets spéciaux en vidéo et des outils de création de jeux vidéos.

3 Fondements scientifiques

3.1 Mouvement dans le monde réel

Il semble maintenant acquis que l'autonomie de mouvement dans le monde réel doit 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). Ceci nous amène à aborder les deux problématiques suivantes :

Niveau délibératif : nous travaillons sur le problème de la *planification de mouvement*, *i.e.* le calcul préalable d'un *mouvement nominal* tenant compte des connaissances a priori sur l'environnement.

Niveau réactif : outre le développement des fonctions réactives requises, se pose surtout le problème de la gestion des interactions entre les fonctions délibératives et réactives au sein d'une *structure décisionnelle* capable d'assurer effectivement l'autonomie de mouvement.

3.1.1 Planification de mouvement

La planification de mouvement est un problème fondamental en Robotique. A ce titre, il a fait et continue de faire l'objet d'un nombre important de travaux de recherche [Lat90]. Du fait de la complexité intrinsèque du problème général de la planification de mouvement, de nombreux 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

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

contrainte géométrique de non-collision habituellement considérée. Ces contraintes découlent d'une part de la nature physique (et pas seulement géométrique) du monde réel (cinématique et dynamique des systèmes considérés, interaction 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. Dans chaque cas, l'un de nos objectifs reste la maîtrise de la complexité additionnelle. Nos efforts se portent principalement sur les aspects suivants :

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.

Dans nos activités antérieures, nous avons abordé le problème de planification pour un système composé de plusieurs bras articulés. L'approche consistait à planifier itérativement et incrémentalement les trajectoires de chaque agent (portion de bras) après avoir effectué la mise à jour du modèle d'environnement due au déplacement élémentaire de l'agent précédent [ML96]. Plus récemment, nous avons abordé le problème de redistribution spatiale d'un grand ensemble d'objets par une flotte réduite de robots. Les robots se déplaçant dans le même environnement, notre solution consiste à pré-calculer un réseau de chemins (appelé *roadmap*) utilisable par les différents robots (avec ou sans les objets qu'ils doivent transporter), et couvrant toutes les positions atteignables avec une précision donnée. Actuellement, nous nous intéressons au problème posé par les manœuvres de formation et déformation, ainsi que la navigation, en trains de véhicules à accrochages immatériels, que ce soit dans un environnement protégé (où tous les véhicules sont automatisés) ou non (les autres véhicules et les piétons ont alors un comportement "imprévisible").

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

[ML96] A. McLEAN, C. LAUGIER, « Update and Repair of a Roadmap after Model Error Discovery », in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2, p. 917-924, Osaka (JP), novembre 1996.

la communauté robotique depuis qu'il est apparu pour la première fois en 1986 [Lau86]. Nos travaux dans ce domaine se concentrent plus particulièrement sur les robots de type voiture et sur le robot « Cycab » qui est la dernière plateforme expérimentale de l'Inria commercialisée par Robosoft, et au développement de laquelle le projet Sharp a largement contribué [LB97].

La 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.

Pour le cas de la voiture, nous utilisons des chemins dont la courbure est continue et dont la dérivée de la courbure est bornée⁹ [SF97]. Les chemins ainsi obtenus représentent un très grand intérêt pratique et sont quasi-optimaux pour de nombreuses situations. Ils correspondent cependant à un problème sur-contraint. Une exploitation complète du domaine de commande de la voiture, nécessite la considération d'un modèle cinématique plus fin de la voiture incluant les roues avant et la commande en rotation de ces roues. C'est le travail que nous avons entrepris en étudiant le système de chariot à une remorque qui représente le modèle cinématique de la voiture (le chariot correspondant aux roues avant et la remorque au train arrière). Nous avons cherché à caractériser les chemins optimaux en temps pour ce système. Notez que l'étude du système de chariot à remorque a en dehors de son intérêt pratique un intérêt théorique plus général. En effet, il est démontré que tout système plat sans dérive à deux entrées est équivalent à un système de chariot à n remorques et il en est de même pour un système chaîné à deux entrées sous la forme de Goursat. Ainsi toute étude sur les système de chariot à remorque peut avoir une répercussion sur une meilleure compréhension de systèmes plus généraux.

Nous portons également nos efforts sur le problème de la planification de chemin pour le robot « Cycab » de l'Inria. Ce système possède un modèle cinématique très particulier du fait

9. 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.

-
- [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.
- [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.
- [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.

de la rotation couplée de ses roues avant et arrière. Cette architecture mécanique procure une plus grande manœuvrabilité au système mais pose des problèmes nouveaux par rapport à la planification de chemin. A notre connaissance, il n'existe de travaux portant sur la planification de chemin pour ce type de système. C'est pourquoi nous avons entrepris récemment l'étude de la cinématique de ce système en commençant plus particulièrement par l'étude de sa platitude différentielle afin de pouvoir ramener le problème de la planification pour ce système 3D à un problème de recherche de courbe plane, comme c'est le cas pour les voitures.

Contraintes additionnelles de l'environnement Un robot mobile est soumis à des contraintes non holonomes, se traduisant par une modélisation de la cinématique du système par une famille d'équations différentielles non intégrables. Cependant l'environnement dans lequel évolue le robot sont à l'origine de contraintes qui rendent cette formalisation insuffisante (par exemple par la présence dans l'environnement d'obstacles et/ou d'autres robots) ou inadaptée (comme dans le cas de robots évoluant sur un terrain accidenté ou à adhérence irrégulière).

En ce qui concerne l'évitement d'obstacle il existe essentiellement deux familles d'approche :

1. Les approches basées sur la construction (probabiliste ou heuristique) d'un réseau de chemin capturant la topologie de l'espace libre.
2. Les méthodes dites par approximation.

Dans la majorité des cas, des planificateurs dits « locaux » prenant en compte les contraintes non holonomes de déplacement mais ignorant les obstacles sont intégrés dans des schémas algorithmiques dits « globaux » pour permettre l'évitement des obstacles. Dans la première famille d'approches, les planificateurs locaux sont utilisés pour calculer les branches d'un graphe dont les noeuds sont des points de l'espace de configuration. Le but est de construire un *roadmap* dans l'espace de configuration et de faire plus tard une recherche dans un graphe pour résoudre une instance du problème de la planification de chemin. La deuxième approche, repose sur le pré-calcul d'un chemin non nécessairement faisable pour le système, mais géométriquement sans collisions. Ce chemin géométrique est ensuite approché par une concaténation de sous-chemins faisables et sans collisions, calculés par le planificateur local. Les algorithmes de ce type sont, à ce jour, les plus efficaces pour les systèmes non holonomes de grande dimension [LE98]. Néanmoins, la difficulté de la phase d'approximation, ainsi que la complexité du chemin final obtenu, dépendent fortement de la « qualité » du premier chemin géométrique. C'est pourquoi, nous nous intéressons particulièrement dans cette approche au problème de calcul d'un « bon » chemin géométrique initial.

Le contexte de la locomotion en milieu tout-terrain est un cas typique de la difficulté 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

[LE98] J.-P. LAUMOND (ED.), *Robot motion planning and control, Lecture Notes in Control and Information Science*, Springer-Verlag, 1998.

le relief du terrain dont la géométrie ne peut se limiter au modèle polyédrique. L'analyse du problème de la planification tout-terrain montre qu'une solution non simpliste doit permettre la combinaison de plusieurs types de modèles (géométriques et physiques) et de techniques calculatoires. Aussi, une telle solution doit pouvoir gérer la combinatoire induite par le grand nombre de degré de liberté du robot et la diversité des contraintes à traiter. Ce sont ces aspects que nous avons abordé ces dernières années.

Incertitudes géométriques. 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 et ceci 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 d'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 est donc nécessaire de considérer ces incertitudes dès la planification, afin d'engendrer des solutions sûres.

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 généralement 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 d'incertitude plus complexes et de nouvelles techniques de planification.

Manipulation dextre par main articulée Nous avons concentré nos efforts sur deux problèmes fondamentaux : la planification de mouvement et le contrôle/commande avec asservissement visuel. Ces deux problèmes sont importants : la planification de mouvement est une composante clé dans le processus de programmation hors-ligne des mains robotiques et l'introduction de l'asservissement basé sur la vision est essentiel pour l'exécution de tâches réelles tout en prenant en comptant des aléas du contexte d'exécution. Afin de bien appréhender la complexité réelle de la manipulation dextre, notre approche a été de considérer des instances de tâches de manipulation qui soient les plus proches du contexte réel (*i.e.* objets tri-dimensionnels, différentes géométries de contact et de modes de manipulation, frottement,

[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.

et dynamique, hypothèses réalistes). Ceci nous a conduit à traiter de plusieurs aspects algorithmiques de fond qui ont été peu abordé dans la littérature.

Le problème général de la planification de mouvement pour la manipulation dextre consiste à *trouver une trajectoire (incluant les forces de contact) à appliquer aux doigts permettant d'amener le système main-objet d'une prise initiale à une prise finale désirée (incluant la configuration de l'objet et la configuration des bouts des doigts sur l'objet)*. La résolution de ce problème doit tenir compte du grand nombre de degrés de liberté du système main-objet et la forte influence des interactions de contact sur l'évolution du système. Les rares travaux qui ont abordé la planification de mouvement se sont inscrits dans des cadres locaux et/ou simplifiés tels que: la réorientation de polyèdres dans le plan avec ou sans frottement, la réorientation dynamique de polyèdres en absence de frottement par des bout de doigts ponctuels, et l'étude de l'impact de contraintes cinématiques de roulement des doigts sur la génération de mouvements. Ces travaux ont toutefois montré dans des contextes différents que le problème de la planification est complexe et que différents aspects doivent être pris en compte. Dans notre contexte, le problème de la planification est enrichie de difficultés supplémentaires liées à la *cinématique* et *dynamique* des chaînes des doigts, aux *structures géométriques* et *propriétés physiques* des objets, et enfin aux *modes* et *interactions* de contact.

Notre activité en contrôle/commande a pour objectif le traitement des incertitudes en manipulation dextre par la prise en compte d'informations sensorielles fournies pour les capteurs de force et plus particulièrement par la vision. Ce problème a été également peu abordé dans la littérature. Le schéma opératoire que nous avons développé est assez originale et consiste à contrôler les doigts de la main articulée afin de réaliser les mouvements spécifiés de l'objet manipulé (ces contraintes de mouvement pouvant être produites par un planificateur ou engendrées en téléopération).

Il faut noter pour finir que parmi les sujets traités au sein du projet, cette thématique est en extinction.

3.1.2 Structure décisionnelle pour l'autonomie de mouvement

Dans ce domaine, notre objectif est de développer une architecture de contrôle visant à doter un véhicule de type voiture de la capacité de se déplacer de façon autonome. Comme indiqué précédemment, l'autonomie de mouvement dans le monde réel passe par le couplage de deux types de fonctions : des *fonctions délibératives* utilisant des modèles et des raisonnements de complexités variées, ainsi que des *fonctions réactives* qui se basent uniquement sur les données des capteurs (sans construire de modèle) pour calculer rapidement un résultat (à l'aide de raisonnements simples). Ce couplage se réalise par le biais d'une structure décisionnelle (ou architecture de contrôle) qui gère les interactions entre ces différentes fonctions. On peut distinguer trois grandes classes de structure décisionnelle pour l'autonomie de mouvement : les architectures *délibératives* et *réactives* qui privilégient respectivement les fonctions délibératives ^[Nil84] et réactives ^[Bro90], et les architectures *hybrides* qui tentent d'intégrer ces

[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.

deux types de fonctions. Cette intégration peut se faire de multiples manières, cependant les travaux les plus récents en matière d'architectures hybrides s'orientent vers des architectures à trois composantes [ACF⁺98] :

1. *la composante fonctionnelle* regroupe un ensemble de fonctions temps-réel de base liées à la commande et aux moyens de perception du système ;
2. *la composante exécutive* gère et coordonne l'exécution des fonctions de la composante fonctionnelle compte tenu de la situation courante et de la tâche à réaliser ;
3. *la composante décisionnelle* produit des plans pour la réalisation de la tâche et supervise la composante exécutive.

La composante exécutive constitue l'interface entre les niveaux réactifs et délibératifs. L'architecture que nous développons s'inscrit dans cette philosophie. L'originalité de notre approche réside dans 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 manœuvres type) associés à chaque contexte (par exemple parking, évitement d'obstacle, etc.) et paramétrés par des informations capteurs (par exemple vitesse du véhicule, distance aux obstacles, etc.) [LGF⁺98]. Cette approche permet d'intégrer correctement les différentes couches décisionnelles, tout en assurant un meilleur contrôle des mouvements exécutés par le véhicule (trajectoire, vitesses, accélérations). Par ailleurs, cela permet d'améliorer l'efficacité de la composante décisionnelle du système.

3.2 Mouvement dans le monde virtuel

Les applications en *Réalité Virtuelle*, que ce soit dans le domaine de la robotique, de la médecine ou encore des loisirs dits multimédia, nécessitent un degré de réalisme élevé, aussi bien au niveau du rendu graphique que de celui de la dynamique des scènes traitées. L'approche généralement mise en œuvre pour tenter d'obtenir ce réalisme au niveau de la dynamique des scènes virtuelles (*i.e.* des mouvements, des déformations, et des interactions entre objets virtuels), 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 le *mouvement et les interactions* dans le monde virtuel, 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 œuvre en vue de la synthèse d'images animées (approches basées sur les modèles physiques). Cependant, la variété des applications que nous considérons, dont certaines mettent en jeu des processus du monde réel (*e.g.* en robotique ou dans le domaine médical), nous conduit à aborder le sujet sous un angle un peu différent de celui généralement utilisé en animation graphique : nous devons mettre l'accent sur le *réalisme physique*,

[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.

[LGF⁺98] 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.

sur l'utilisation de *modèles composites* (incluant des composantes géométriques, dynamiques, physiques, et logiques) au niveau des algorithmes qui gèrent le mouvement, sur l'*interaction 3D multimodale* (graphique + haptique) entre l'utilisateur et le système, et sur l'*efficacité des algorithmes* qui doivent dans certains cas satisfaire des contraintes de temps réel (comme par exemple lors de l'utilisation d'interfaces haptiques).

Compte tenu de la présence de nombreuses similitudes avec les problèmes de robotique, nous avons choisi de mettre en œuvre 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 dotés de capacités de mouvements propres (appelés « agents autonomes » ou encore « robots virtuels »), possédant des propriétés physiques comme la masse ou l'inertie, des caractéristiques mécaniques (*e.g.* systèmes articulés ou mobiles soumis à des contraintes cinématiques particulières), des capacités de contrôle du mouvement, et des mécanismes décisionnels aptes à assurer une autonomie des déplacements ainsi que des comportements prédéfinis. Plusieurs des techniques habituellement développées dans le cadre de la robotique entrent naturellement dans le cadre d'une telle approche (en particulier : contrôle de mouvements, planification de trajectoires, détection de collisions), tout en se combinant avec des méthodes généralement développées dans le cadre de la synthèse d'images animées (comme par exemple les modèles physiques et le traitement des collisions entre corps solides [Bar92] ou déformables [BW92]).

Cette analyse, que nous avons faite dès 1990 (*i.e.* lors de nos premiers travaux en coopération avec l'Acroe pour la prise en compte des interactions roue-sol lors de la planification des mouvements et de la simulation des comportements dynamiques d'un véhicule tout-terrain [LJL94]), a été aussi faite plus récemment par des chercheurs en robotique aux USA qui ont apportés des contributions intéressantes qui vont dans le même sens (en particulier les travaux de B. Mirtich et J. Canny à l'université de Californie à Berkeley sur les collisions entre objets rigides [MC94], ceux de D. Ruspini et O. Khatib à l'université de Stanford [RKK97] et de V. Hayward [AH98] sur la simulation dynamique en robotique et sur les systèmes haptiques).

L'approche que nous mettons en œuvre pour la modélisation et la génération du mouvement

-
- [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.
 - [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.
 - [RKK97] D. C. RUSPINI, 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.
 - [AH98] O. ASTLEY, V. HAYWARD, « Multirate Haptic Simulation Achieved by Coupling Finite Element Meshes through Norton Equivalents », *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1, p. 989-994, Leuven (BE), mai 1998.

dans le monde virtuel nous conduit donc à aborder quatre sujets complémentaires dont les orientations sont guidées par les contraintes énoncées précédemment :

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, tout en conservant une certaine cohérence physique. Nous nous inspirons pour cela des résultats connus en animation graphique et en mécanique, en mettant l'accent sur les problèmes d'efficacité et de contrôle des erreurs (en particulier celles dues à l'intégration numérique des équations de la dynamique). L'approche mise en œuvre est pour cela de type multi-modèles et multi-méthodes, afin de pouvoir s'adapter 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...). On utilisera par exemple la composante géométrique du modèle composite pour détecter des collisions entre objets rigides, à l'aide d'algorithmes optimaux de calcul de distances dérivés de la robotique (*e.g.* les algorithmes de Lin & Canny ou ceux de Gilbert & Johnson) ; on utilisera ensuite les caractéristiques mécaniques des objets mis en jeu ainsi que des modèles issues de la mécanique des solides pour calculer les effets de la collision. Le rendu haptique de la scène virtuelle demande aussi des algorithmes appropriés.

Modélisation d'objets complexes et identification des paramètres. Le problème abordé ici est celui du choix du modèle approprié et des paramètres nécessaires, pour représenter les différentes caractéristiques (géométriques, mécaniques, et dynamiques) d'un objet complexe susceptible de subir certaines déformations. Nous nous inspirons pour cela des travaux réalisés d'une part en mécanique (dont les modèles sont très réalistes, utilisés depuis des décennies, et associés à des tables de propriétés des matériaux, mais dont les performances algorithmiques sont plutôt médiocres), et d'autre part en animation graphique (dont les modèles variés ont naturellement privilégié les aspects visuels, sans réellement maîtriser les mécanismes de choix et de réglage des paramètres nécessaires). Notre approche consiste à partir du modèle géométrique 2D ou 3D souvent plus facile à construire, à réaliser un maillage 2D ou 3D dont les caractéristiques dépendent des propriétés de déformabilité de l'objet, à plaquer un modèle physique de déformation sur ce maillage, puis à identifier les paramètres de ce modèle sur la base de comportements requis ou de mesures faites sur les objets réels. De premiers résultats très encourageants ont déjà été obtenus lors de la modélisation d'un ligament croisé de genou, ou lors de la simulation des déformations d'une cuisse humaine soumise à des pressions appliquées par un sonde échographique.

Modèles d'interactions. Il s'agit ici de développer des modèles et des algorithmes qui permettent de reproduire le comportement dynamique et mécanique 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 consti-

tuent 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 auteurs aient tentés d'étendre artificiellement leurs modèles de collision au traitement d'autres types d'interactions (voir par exemple Mirtich ^[MC94]). Jusqu'à présent, nos efforts ont surtout porté sur la modélisation et le traitement des collisions et des contacts non restants (*e.g.* contacts de type roue-sol). Notre approche sur ce sujet consiste d'une part à rechercher des algorithmes efficaces de détection de collisions (en partant de techniques développées en robotique et en CAO), et d'autre part à mettre en œuvre des algorithmes de traitement des collisions (rigides ou visco-élastiques) qui utilisent les lois connues de la mécanique et qui prennent en compte les problèmes d'intégration numérique associés. Les modifications de structures topologiques engendrées par certaines actions mettent en jeu des procédures complexes de remaillage et de redistribution des propriétés physiques que nous commençons à étudier. L'interaction haptique nécessite des fréquences d'échantillonnage de l'ordre du kilohertz (afin d'être effectivement 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 haptiques tampon » restituant en temps réel les principales propriétés topologiques et mécaniques locales des scènes considérées.

Algorithmes pour la génération du mouvement. Le problème abordé ici est celui de la génération du mouvement pour les 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 ici est de tenter d'appliquer des techniques que nous développons par ailleurs pour les robots réels (planificateurs géométriques, architectures décisionnelles, contrôleur de trajectoires), tout en exploitant le fait que le monde virtuel permet dans certains cas de réduire la complexité algorithmique (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 ^[LJL94], ou en introduisant un modèle physique simplifié d'interaction roue-sol au niveau de la composante locale d'un planificateur de trajectoire pour véhicule tout-terrain ^[CL95]. D'autres résultats plus récents concernent le contrôle temps-réel de personnages animés, l'approche adoptée consiste à modéliser ceux-ci comme des robots se déplaçant dans un environnement virtuel, perçu au moyen de pseudo-capteurs. Les aspects les plus bas-niveau (dynamique du mouvement) peuvent être

-
- [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.
- [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.
- [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.

avantageusement approximés par des techniques d'infographie (« motion capture » et cinématique inverse). Les capteurs virtuels pouvant être modélisés comme parfaits, les problèmes de bruit et de catégorisation ne se présentent pas, ce qui facilite le développement de l'architecture décisionnelle, autorisant la spécification de comportements de haut niveau.

3.3 Programmation probabiliste des robots

Comme nous l'avons déjà vu, 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 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.

Les fondements théoriques de notre approche sont ceux des probabilités bayésiennes. Une formalisation rigoureuse et synthétique de cette approche peut être trouvée dans [Jay95]. Edward 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. C'est ainsi que nous avons développé deux moteurs d'inférence probabiliste originaux. Ces moteurs servent de bases à un système de CAO robotique probabiliste et à un système probabiliste de programmation de robot mobile. Ils visent à être l'équivalent probabiliste des moteurs d'inférence logique tel que PROLOG. 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.

-
- [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.
 - [Jay95] E. JAYNES, *Probability theory - The logic of science*, <<http://bayes.wustl.edu>>, 1995.

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.

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.

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-Inrets¹⁰ 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.

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

Si la route automatisée est encore un concept assez large, on peut cependant distinguer deux grandes orientations :

- des scénarii 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 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'entraînement 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'acquies 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*¹¹ développé comme une généralisation du système *Robot- Φ* ¹² : 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, *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 (de type Gilbert) qui a été construit de manière à pouvoir calculer l'amplitude « d'interpénétration fictive » des objets ; elles sont ensuite modélisées à l'aide de liaisons visco-élastiques non linéaires et de modèles de collision de type impulsif et pénalité.

Sur le plan fonctionnel, l'utilisateur du système dispose de différents intégrateurs pour la résolution des équations différentielles de la dynamique : des méthodes de type explicite (Newton-Euler ou Runge-Kutta), ou 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.

11. 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.

12. *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 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>).

5.2 Système de CAO probabiliste

Nous avons développé (en collaboration avec l'équipe Laplace du laboratoire Leibniz) un système de CAO probabiliste permettant de modéliser et de résoudre de nombreux problèmes géométriques en présence d'incertitude. Ce système a pour objectif d'illustrer les aspects les plus importants de notre approche concernant la prise en compte de l'incertitude en géométrie.

Dans ce modèleur, la position des entités géométriques est représentée par des distributions de probabilité conditionnelles. Les connaissances préalables que nous avons sur une scène robotique nous permettent de fixer la forme de ces distributions. Ces connaissances peuvent exprimer la certitude (Dirac), l'incertitude de mesure (loi de Gauss) ou encore l'ignorance (loi uniforme). Elles concernent les relations mécaniques comme la position relative de deux entités ou les liaisons mécaniques. Mais elles peuvent aussi traduire les relations géométriques virtuelles introduites par les capteurs.

En utilisant cette modélisation, le moteur d'inférence développé nous permet d'inverser tout problème se posant en terme des variables utilisées dans le modèle. Ainsi, en utilisant cette approche, on peut résoudre des problèmes aussi variés que : la cinématique inverse, la calibration, le positionnement par fusion multi-capteurs ou la conception de cellule.

Ce système a pour objectif d'illustrer les aspects les plus importants de notre méthode à savoir: la généralisation de la notion de contrainte géométrique pour la spécification de problème sous incertitude et le couplage de méthodes d'intégration et d'optimisation pour leur résolution.

5.3 Système de programmation probabiliste pour robot mobile

Nous avons réalisé (en collaboration avec l'équipe Laplace du laboratoire Leibniz) un système original de programmation pour la robotique fondé sur l'approche bayésienne. L'apport principal de ce travail est une méthode générique reposant sur la notion centrale de « description ». Dans le cadre de cette méthode, une tâche robotique est représentée sous la forme d'une relation de dépendance probabiliste (distribution conjointe) entre différentes variables choisies par le programmeur. Cette relation n'est pas quelconque ; elle est le fruit d'un ensemble de connaissances préalables fourni par le programmeur et d'un ensemble de données expérimentales. La description est l'objet formel faisant la synthèse de ces connaissances préalables et de ces données expérimentales. Elle peut être interrogée pour réaliser une tâche robotique afin, par exemple, de déterminer la valeur de certaines variables motrices, connaissant la valeur de certaines variables sensorielles.

6 Résultats nouveaux

6.1 Mouvement dans le monde réel

6.1.1 Contraintes cinématiques

Participants : Richard Desvigne, Thierry Fraichard, Jorge Hermosillo, Christian Laugier, Alexis Scheuer, Sepanta Sekhavat.

Nos travaux sur les contraintes cinématiques des robots mobiles se sont portés cette année sur trois types de plateformes : les robots de type voiture, les robots manœuvrables¹³ et le Cycab.

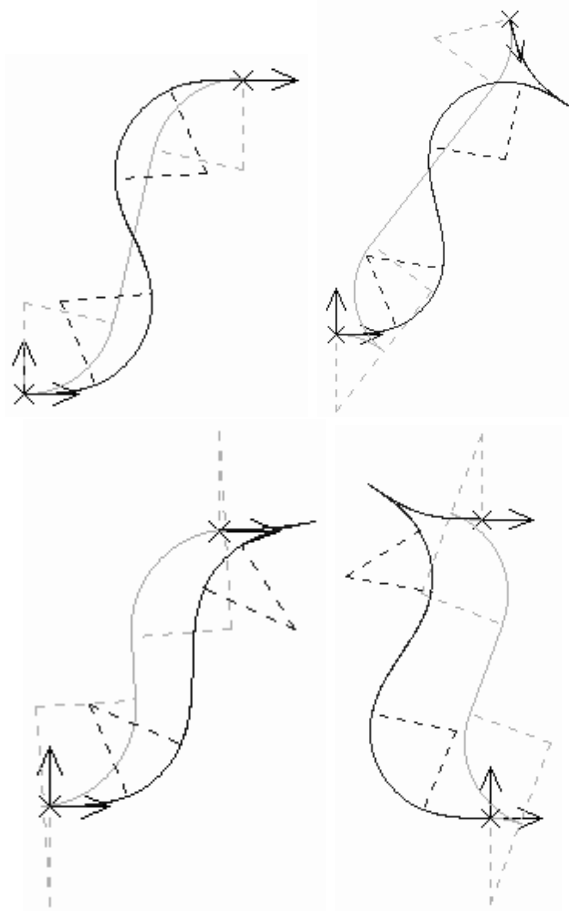


FIG. 1 – Chemins à courbure continue vs. chemin de Reeds et Shepp.

En 1998, nous avons défini un nouveau problème de planification de chemin pour robot mobile de type voiture. En plus des contraintes cinématiques usuelles, qui sont la continuité de la direction tangente et une borne de la courbure, ce problème prend en compte deux nouvelles

13. Un robot est dit *manœuvrable* si et seulement si son déplacement est contraint uniquement par son orientation, par opposition aux robots de type voiture qui présentent une contrainte de déplacement supplémentaire (leur rayon de giration minoré).

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. Dans le cas où la voiture ne se déplace qu'en marche avant, nous avons montré que les chemins optimaux étaient composés de segments de droite, d'arcs de cercle et de portions de clothoïde. Malheureusement, ces chemins optimaux sont irréguliers dans la plupart des cas (accumulation d'un nombre infini de clothoïdes), d'où le développement d'un planificateur de chemin sous-optimaux formés seulement d'un nombre fini de segments, d'arcs de cercle et de clothoïdes.

En 1999, nous nous sommes penchés sur le cas où la voiture peut passer de la marche avant à la marche arrière. D'un point de vue théorique, nous avons montré que, outre les segments de droite, arcs de cercle et portions de clothoïde, les chemins optimaux comportent des spirales [46]. L'impossibilité d'utiliser en pratique ce type de chemin nous a conduit à nous limiter, pour la voiture pouvant passer de la marche avant à la marche arrière, au développement d'un planificateur de chemin sous-optimaux formés seulement d'un nombre fini de segments, d'arcs de cercle et de clothoïdes [28]. Après comparaison avec le planificateur de chemins optimaux (composés de segments et d'arcs de cercle) de Reeds et Shepp ^[RS90], il s'avère que notre algorithme est capable de calculer des chemins à courbure continue qui sont en moyenne seulement 1% plus long et ce pour un surcoût (en terme de temps de calcul) de 33% en moyenne. Sachant que les chemins à courbure continue peuvent être suivis par une voiture avec une précision dix fois plus grande que les chemins composés de segments et d'arcs de cercle (*cf.* le rapport d'activité 1998), ces résultats démontrent l'intérêt pratique de disposer de ce type de planificateur. La figure 1 illustre quelques exemples de chemins calculés par notre algorithme.

Parallèlement, afin de pouvoir exploiter plus finement le domaine des commandes admissibles du système, nous avons entrepris l'étude du modèle de la voiture dans lequel l'angle de braquage des roues avant est pris explicitement en compte. Ceci est équivalent à considérer le modèle du chariot avec une remorque classique (*i.e.* à attache centrée sur l'essieu du chariot). Le chariot représente alors les roues avant et la remorque les roues arrière de la voiture. Nous avons étudié pour ce système les chemins optimaux en temps en utilisant le Principe du Maximum de Pontryagin. Nous avons caractérisé les chemins extrémaux et commencé l'étude de la synthèse optimale et la concaténation des extrémaux [23]. Une fois terminés, ces travaux pourront permettre par exemple de rattraper de manière optimale l'écart par rapport à un chemin nominal tout en respectant la continuité de l'angle de braquage à la jonction.

Un autre système que nous avons commencé à étudier l'année passée est le robot manœuvrable Nomad 200 (une des plateformes mobiles les plus répandues). Ce robot a un modèle cinématique différent de la voiture. Il est monté sur trois roues parallèles contrôlées en accélération de translation et de braquage. Ainsi, contrairement à la voiture ce robot n'a pas de borne sur son rayon de giration. Cependant nous avons tenu compte dans notre étude de contraintes supplémentaires telles que des bornes sur les accélérations et les vitesses de translation et braquage. Nous avons étudié pour ce système les chemins optimaux en temps. Après

[RS90] J. A. REEDS, L. A. SHEPP, «Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards», *Pacific Journal of Mathematics* 145, 2, 1990, p. 367–393.

avoir vérifié leur existence, nous nous sommes encore une fois servis du Principe du Maximum de Pontryagin appliqué séparément à la frontière et à l'intérieur de l'espace des configurations libres pour déduire les chemins extrémaux pour ce système. Nous nous sommes alors limités à une sous-famille d'extrémaux et avons utilisé le planificateur développé dans le cas de la voiture pour en déduire un pour notre système manœuvrable [37]. Les trajectoires ainsi obtenues peuvent être poursuivies à vitesse maximale, contrairement aux trajectoires composées de segments de droite qui nécessitent des arrêts aux jonctions. Elles peuvent être par ailleurs suivies avec une précision au moins dix fois supérieure aux trajectoires dont la courbure est discontinues.

Le dernier système non holonome auquel nous nous sommes intéressés cette année est le robot Cycab. 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. Il existe plus exactement une liaison mécanique entre les deux essieux, ce qui introduit un rapport linéaire entre l'angle de braquage avant et arrière. Il existe à ce jour très peu de travaux sur ce système et plus particulièrement aucun travail sur la planification. Après avoir vérifié la commandabilité du Cycab nous avons établi sa platitude. La détermination des sorties linéarisantes du système nous permettra de ramener le problème de planification pour ce système à une étude de courbe de dimension deux.

6.1.2 Contraintes additionnelles de l'environnement

Participants : Moëz Cherif, Christian Laugier, Sepanta Sekhavat.

Nous regroupons ici les travaux effectués sur les contraintes imposées par l'environnement sur les robots mobiles. Ces travaux portent essentiellement sur l'évitement des obstacles dans l'environnement et l'appréhension d'un terrain accidenté et irrégulier mettant à défaut la formalisation classique du problème de la planification basée sur le « roulement sans glissement » des roues. Le travail effectué dans ce cadre cette année correspond à une meilleure formalisation des problèmes et des techniques algorithmiques mises en œuvre, ainsi qu'à la publication des résultats associés obtenus ultérieurement.

Il existe dans la littérature différentes approches traitant du problème de planification parmi les obstacles pour un système non holonome. Une technique classique consiste à calculer d'abord un chemin dit *géométrique*, sans collision mais non nécessairement faisable par le système. Ce chemin est ensuite approché par une concaténation de sous-chemins faisables et sans collision [18]. Afin de réduire la complexité de la phase d'approximation, nous avons développé un planificateur géométrique intégrant comme critère la facilité de l'approximation postérieure. Ce planificateur est basé sur la construction d'un champ de potentiel, qui attire le robot vers son but à travers les obstacles tout en privilégiant les directions de mouvement qui sont plus faciles à suivre pour le système géométrique augmenté de ses contraintes cinématiques [38]. Ce travail est le premier de cette famille pouvant s'appliquer à une famille générale de systèmes non holonomes.

Concernant les contraintes liées à l'environnement extérieur et au terrain accidentés, notre contribution a porté sur la formalisation d'un schéma général de planification de mouvement

pour des robots à roues qui sont à châssis articulés. Notre approche se base sur une hiérarchisation du processus de recherche de trajectoires afin de combiner de manière cohérente le traitement de modèles géométriques classiques que de modèles physiques nouveaux dans le domaine de la robotique. Ces modèles physiques permettent de contourner le problème de la formulation « closed form » des contraintes environnementales sur le robot. Une présentation complète du planificateur que nous avons développé est donnée dans [15, 22].

Un dernier type de contrainte environnementale est celui imposé par la présence d'autres robots. En effet, la solution (centralisée) consistant à considérer l'ensemble des robots comme un seul système pose des problèmes combinatoires. Typiquement, le problème devient NP-complet si on ajoute des contraintes de borne de vitesse sur les agents. Une alternative consiste à considérer un ensemble de systèmes élémentaires interagissant par des protocoles de coordination. Nous avons finalisé nos travaux de 1998 en proposant : (1) un protocole de coordination pour une flotte d'avions garantissant la sécurité du système et cherchant l'optimalité de l'ordonnement [39], et (2) un schéma de coopération et de coordination basé sur une roadmap coloriée dans le contexte de la préparation d'opérations de maintenance dans des sites industriels [42].

6.1.3 Incertitudes

Participants : Thierry Fraichard, Alain Lambert.

Le problème de la planification de chemin en présence d'incertitude consiste à déterminer des chemins *sûrs*, *i.e.* pour lesquels le robot est assuré d'atteindre son but et ceci 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 d'une mesure capteur, etc.). Dans ce cadre, notre objectif principal est d'aborder la prise en compte de l'incertitude dans la planification de chemin en s'intéressant à des cas plus réalistes que ceux considérés habituellement (robot ponctuel, déplacements rectilignes, etc.). Nous nous sommes donc intéressés au cas d'un robot mobile à roues soumis à des contraintes non-holonomes, équipé d'un système de localisation odométrique et capable de percevoir son environnement au moyen d'un capteur télémétrique.

La sûreté d'un chemin est essentiellement liée à l'incertitude sur la configuration du robot quand celui-ci se déplace pour suivre ce chemin. Un préalable à tout processus de planification en présence d'incertitude est donc de modéliser cette incertitude ainsi que son évolution lorsque le robot se déplace. Par ailleurs, du fait du caractère relatif du processus de localisation odométrique, cette incertitude évolue de manière croissante et non bornée quand le robot se déplace. La relocalisation absolue à intervalles réguliers est donc nécessaire.

En 1998, nous avons fait l'hypothèse que le robot se relocalisait au moyen de dispositifs particuliers, des *balises*, placées dans l'environnement et détectables par le robot. Une balise était alors caractérisée par sa région de détectabilité et par son incertitude de relocalisation, *i.e.* la nouvelle incertitude sur la configuration du robot après détection de la balise. Nous avons aussi proposé un modèle ensembliste d'incertitude et sa fonction d'évolution pour un robot de type voiture. Partant de ce modèle, nous avons développé l'un des premiers planificateur de

chemin sûr pour robot non-holonyme [FM98].

En 1999, nous avons souhaité tout d'abord nous affranchir des balises artificielles et utiliser des caractéristiques 'naturelles' de l'environnement, des *primitives*, pour effectuer la relocalisation. 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.

Classiquement, nous avons choisi de modéliser l'incertitude de configuration par une distribution de probabilité représentée par le couple (espérance, covariance). La mise en œuvre d'un filtre de Kalman étendu nous a permis de définir la fonction d'évolution de l'incertitude quand le robot se déplace (simulation de l'odométrie) ou quand il se relocalise (simulation de la perception et du processus de relocalisation sur primitives). La relocalisation sur primitives s'effectue par mise en correspondance entre les primitives 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.

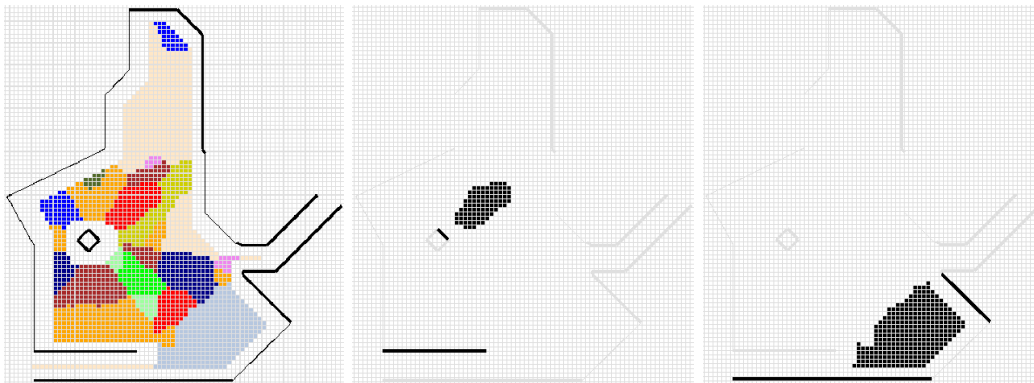


FIG. 2 – (a) cartes locales pour un environnement polygonal donné, (b) et (c) deux cartes locales particulières et les primitives associées.

La qualité de la relocalisation dépend de deux facteurs: quelles sont les primitives 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 primitives 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, permet la génération automatique de ces cartes locales enrichies (Fig 2) et leur mise en œuvre au sein d'un algorithme de planification de chemin sûr pour robot non-holonyme. Cet algorithme calcule un chemin ainsi que la prescription d'opération de relocalisation à intervalles réguliers. Un article sur ce travail a été soumis à la conférence internationale IEEE Robotics and Automation 2000.

[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.

6.1.4 Manipulation dextre

Participants : Moëz Cherif, Luis Alberto Muñoz.

Planification de mouvements dextres. Notre contribution a porté sur la formalisation d'un schéma général pour la résolution du problème de la planification de mouvements dextres quand la prise finale n'est pas totalement spécifiée. Nos travaux ont donné lieu à un planificateur applicable à des tâches dites de *reconfiguration* et de *réorientation* d'objets 3D (polyèdres et objets convexes à surface lisse). Afin de pallier la grande dimensionalité de l'espace des configurations et l'espace des contrôles du système main-objet, notre approche a été de définir une hiérarchisation de la recherche en prenant avantage de la structure de ces espaces cités plus haut et en se basant sur le problème inverse (*i.e.* trouver les mouvements des doigts permettant de manipuler l'objet le long d'une trajectoire donnée). Cette hiérarchisation a permis de limiter la combinatoire de la planification en alternant de manière incrémentale et cohérente plusieurs processus de recherche situés à différents niveaux de raisonnement (niveau global, niveau local, et niveau instantané) et surtout de combiner plusieurs techniques de résolution (recherche de graphe, échantillonnage aléatoire, outils de programmation et d'algèbre linéaires). Une première description des différents algorithmes et de l'implantation mise en oeuvre a été présentée dans le rapport d'activité 1998. Les résultats nouveaux de cette année ont porté essentiellement sur la formalisation de l'algorithmique de planification sur laquelle nous travaillons depuis 1996. Les modèles-algorithmes et implantations correspondantes ont été largement publiés cette année dans des revues internationales de robotique [14, 13, 41]. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Université Simon Fraser (Canada).

Contrôle-commande avec asservissement visuel en manipulation dextre. Nous avons explorées deux approches en 1998 : l'une « basée image » et l'autre « basée position ». Dans l'approche basée image, l'asservissement est effectué en utilisant directement l'information visuelle (on cherche à amener un point de l'image à une position but exprimée dans le repère image). Dans l'approche basée position, l'asservissement est effectué dans un repère global, l'image est utilisée pour déterminer la position de l'objet dans le repère de référence. L'ensemble de ces travaux ainsi que les résultats obtenus sur ce sujet sont décrits dans la thèse de Alberto Muñoz soutenue cette année [10]. Le travail concernant ce sujet est actuellement poursuivi par Alberto Muñoz à l'Université de Oxford (UK) dans le cadre d'un séjour postdoctoral.

6.1.5 Architecture de contrôle pour l'autonomie de mouvement

Participants : Thierry Fraichard, Éric Gauthier, Jorge Hermosillo, Frédéric Large, Christian Laugier, 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

illustrés par la figure 3, et sur le concept de « manœuvre référencées capteurs ». Son mode de fonctionnement, ainsi que les implantations et expérimentations qui ont été réalisées pour différents types de manœuvres automatiques (parking automatique, évitement d'obstacles) ont été largement publiés cette année [19, 31, 34, 33, 32].

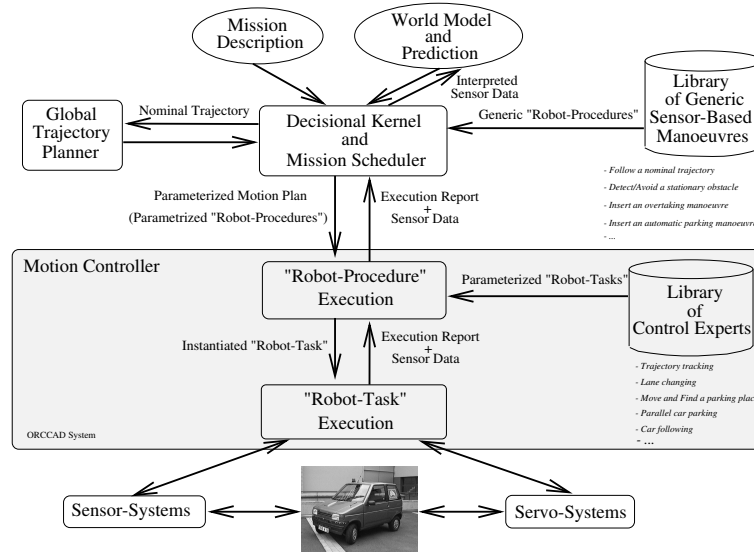


FIG. 3 – Schéma de l'architecture Sharp.

De manière très schématique, le principe général de l'approche consiste à s'appuyer sur des mécanismes réactifs complés avec un ensemble d'« expert 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 (voir § 6.1.1 § 6.1.2 § 6.1.3). Au cours de l'année 1999, nous avons surtout porté nos efforts sur la formalisation et la validation expérimentale de l'ensemble, ainsi que sur la robustification de fonctions de base pour le contrôle du véhicule.

Sur le plan du contrôle, nous avons appliqué la théorie des « régulateurs universels »¹⁴ pour la stabilisation du mouvement du véhicule le long d'une trajectoire de référence. Le problème de contrôle considéré concerne alors les systèmes non-holonomes comportant des paramètres dynamiques inconnus. Lorsque les paramètres diffèrent de manière significative de leurs valeurs nominales, les régulateurs adaptatifs sont employés de manière à stabiliser le mouvement par rapport à une trajectoire de référence, et une évaluation en-ligne des paramètres inconnus est effectuée. Nous avons montré qu'une telle stratégie de contrôle/commande assure la stabilisation de mouvement avec une précision désirée. L'approche est basée sur une méthode d'inégalités récursives de but (*recursive aim inequalities*), qui nous permet de résoudre le problème de la stabilisation adaptative en présence des perturbations uniformément liées. Contrairement aux

14. La notion de « régulateur universel » introduite par V.A. Yakubovich [Yak95] a été élaborée pour des systèmes avec incertitudes. Ils garantissent une précision donnée à l'exécution malgré des perturbations sur les paramètres du système tant qu'elles restent uniformément bornées.

travaux antérieurs, l'algorithme présenté est donné sous forme d'équation différentielle au lieu d'un algorithme en temps discret [45, 29]. Ainsi malgré les imprécisions sur les paramètres, le contrôleur que nous avons développé permet à la voiture de converger asymptotiquement vers la trajectoire de référence. Ce contrôleur a été testé avec succès sur notre véhicule expérimental. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet franco-russe Liapunov.

En parallèle, nous avons étudié une autre approche utilisant les modes glissants associés à des ensembles flous. Nous avons ainsi obtenu un contrôleur à structure variable flou donnant de bons résultats expérimentaux en simulation sur des exemples simples [36]. La validité de l'approche sur des cas plus complexes reste cependant à vérifier.

En collaboration avec l'équipe Réseaux d'Automates du laboratoire Leibniz, nous avons aussi utilisé des réseaux de neuro-flous pour identifier les paramètres des fonctions de contrôle de la couche basse de notre architecture (afin d'adapter celles-ci aux caractéristiques du véhicule contrôlé et pour caractériser certains types de manœuvres). Cette approche permet de tirer parti des capacités d'apprentissage des réseaux neuronaux pour affiner le comportement du véhicule. Le principe de la méthode avait déjà été posé au cours de l'année 1998. Sa formulation complète, ainsi que la présentation détaillée des résultats obtenus sont décrits dans la thèse d'Eric Gauthier [7] ayant reçu les félicitations du jury. Les résultats mentionnés ont été obtenus en simulation; ils portent sur l'exécution de plusieurs types de manœuvres de base (par exemple, le dépassement d'un autre véhicule) à partir des données capteurs simulées. Des tests sur notre véhicule expérimental sont actuellement en cours. La figure 4 illustre l'amélioration obtenue sur l'erreur de suivi de notre contrôleur lorsqu'un apprentissage en ligne est effectué (le véhicule simulé comportant alors une erreur de perception importante sur l'angle de braquage). La figure 5 illustre différents types de dépassement d'un véhicule en mouvement à différentes vitesses, avec et sans obstacle sur la file de gauche.

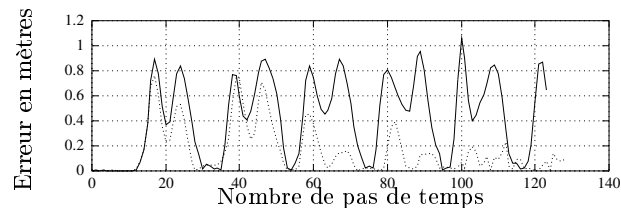


FIG. 4 – Amélioration par apprentissage en ligne des paramètres du contrôleur de suivi de trajectoire. La courbe en trait plein représente l'évolution de l'erreur de suivi.

6.2 Mouvement dans le monde virtuel

6.2.1 Modèles et algorithmes de base

Participants : Diego d'Aulignac, Anton Deguet, Ammar Joukhadar, Remis Balaniuk, Christian Laugier.

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



FIG. 5 – *Différents contextes de dépassement de véhicules en mouvement avec et sans obstacle sur la file de gauche.*

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 et algorithmes. Pour les modèles d'objets, nous nous sommes attachés à développer et intégrer au sein d'un même simulateur des objets rigides grâce à la mécanique des solides et des objets déformables modélisés à l'aide de modèles "masses-ressorts" (nous envisageons d'étudier l'année prochaine la possibilité d'introduire aussi d'autres modèles de déformation tels que les éléments finis). Ces recherches, ainsi que les problèmes liés à l'identification des paramètres sont détaillées dans le § 6.2.2 à partir de deux exemples concrets.

Pour les modèles d'interactions, qui dépendent fortement de la nature des objets en interaction, nous avons développé une approche qui permet de faire cohabiter un modèle de type impulsif (que ce soit de Newton ou Poisson) et un modèle de type pénalité (linéaire ou non linéaire visco-élastique, Hunt et Crossley). Ces travaux sont détaillés dans § 6.2.3.

Les algorithmes de calculs de distance sont quant à eux implantés en fonction de la nature des objets mis en jeu (rigides/déformables, convexes/concaves) afin d'adapter la complexité algorithmique au problème particulier considéré.

En ce qui concerne la simulation de corps rigides nous avons développé les techniques de calcul de matrice d'inertie et de diagonalisation des dites matrices (méthode de tridiagonalisation de Givens et recherche des valeurs propres par la méthode de bisection) [47]. Pour l'orientation des corps, nous utilisons des quaternions. Ce choix permet d'obtenir une complexité de calcul moindre, mais aussi plus de stabilité et facilite la sauvegarde au format VRML. L'utilisation des quaternions pose cependant quelques problèmes pour la résolution des équations différentielles du mouvement. Ces problèmes ont été résolus et l'ensemble a été implanté dans notre simulateur.

Méthodes d'intégration. Pour chaque modèle, différentes méthodes d'intégration des équations différentielles sont possibles, numériques de type Newton-Euler ou Runge-Kutta, ou implicites (à pas de temps δt fixe ou adaptatif).

Après avoir testé une méthode de type Newton-Euler avec un pas de temps adaptatif basé sur le critère d'énergie mécanique du système (cf. rapport d'activité de 1998), nous avons effectué une étude comparative avec des méthodes de Runge-Kutta de différents ordres. Pour chacune de ces méthodes, nous avons testé des critères d'adaptation du pas de temps basé soit sur une estimation de l'erreur par comparaison avec un Runge-Kutta d'ordre supérieur, soit sur le critère d'énergie. En général, ces méthodes permettent d'augmenter le pas de temps δt en présence de non-linéarités, tout en limitant les erreurs d'intégration. Cependant, ces approches restent très sensibles à la moindre rigidité dans le système (*e.g.* ressort rigide ou collision entre solides).

Afin de remédier aux problèmes d'instabilité liés à la rigidité des équations différentielles, nous étudions des solutions à partir de méthodes dites implicites. Ces méthodes permettent de prendre en compte une dérivée supplémentaire par le biais d'une approximation (calcul de la jacobienne du système ∇f) de la dynamique de l'ensemble de l'objet. Mathématiquement, cela est représenté par l'équation :

$$\Delta Y \left[\frac{1}{\Delta t} I - \lambda (\nabla f)|_{Y=Y_0} \right] = f(Y_0)$$

où I est la matrice d'identité, $\lambda \in [0, 1]$ définit le point d'approximation de la dérivée sur l'intervalle δt . Si $\lambda = 0$, les dérivées sont approximées à $t + 0$ et on obtient une méthode explicite de type Newton-Euler, alors que si $\lambda = 1$, les dérivées sont évaluées à $t + \delta t$. En pratique, la stabilité est obtenue pour $\lambda \geq 0.5$.

Les premiers résultats confirment la stabilité de ces méthodes et montrent aussi que pour des systèmes de grande taille, la matrice jacobienne explose (pour n degrés de libertés, matrice en n^2). Nous devons donc utiliser le fait que ces matrices sont très creuses pour implanter des structures de données et des algorithmes de résolution de systèmes linéaires de type $Ax = b$ qui soient optimisés (actuellement, nous utilisons une méthode de résolution directe, alors qu'une méthode de type descente de gradient convient mieux pour des systèmes de grande taille)[26].

Interface Haptique Les systèmes de réalité virtuelle sont des systèmes temps-réel par définition. En ce qui concerne l'interface visuelle cela signifie que le système doit être capable de mettre à jour son monde virtuel à une fréquence d'au moins 30 Hz pour que son utilisateur puisse avoir une sensation visuelle réaliste et continue. La sensation du toucher, par contre, demande des fréquences de mise à jour beaucoup plus élevées, qui vont de 300 Hz pour le toucher d'objets mous à 10 KHz pour le toucher d'objets rigides. La simulation dynamique ne pouvant arriver à des fréquences de calcul aussi élevées, il fallait mettre au point une approche capable de pallier à ces différences de fréquences de calcul. Un deuxième problème concerne les modèles de collisions utilisés. Les modèles de type impulsions et pénalités utilisés par la simulation dynamique ne sont pas bien adaptés pour l'estimation des forces du retour haptique, le meilleur modèle étant le "proxy" [RKO97] [ZS95].

[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 résoudre ces problèmes nous avons proposé le concept de modèles haptiques tampons [20]. Ces modèles ont comme but d'émuler localement le système de réalité virtuelle et d'estimer les retours d'efforts correspondants utilisant l'approche "proxy", respectant la fréquence demandée par le dispositif haptique. 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 la simulation dynamique de l'environnement. Cela suppose la gestion d'un modèle numérique de l'environnement dont le comportement est localement compatible avec celui de l'environnement du simulateur dynamique, mais dont la fréquence de mise à jour est supérieure. Ce modèle numérique doit être simple, basé sur un nombre réduit de paramètres et ayant une forme géométrique capable de s'accorder localement aux objets de l'environnement virtuel. Nous utilisons des sphères ou des plans. La figure 6 illustre un objet virtuel (le grand tetrahedron) représenté localement (au point de contact entre les deux tetrahedra) par un modèle tampon (la sphère).

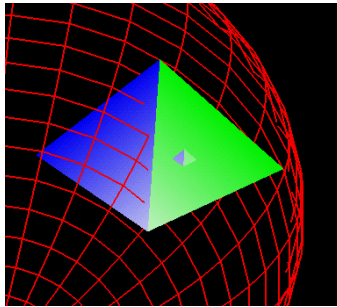


FIG. 6 – *Objet virtuel et modèle tampon.*

Nous avons implémenté cette approche et l'utilisé pour effectuer le rendu haptique de la simulation dynamique d'un modèle de la cuisse humaine [24] (voir § 6.2.2).

6.2.2 Modélisation d'objets complexe et identification

Participants : François Boux De Casson, Cenk Cavosuglu, Diego d'Aulignac, Ammar Joukhadar, Remis Balaniuk, Christian Laugier.

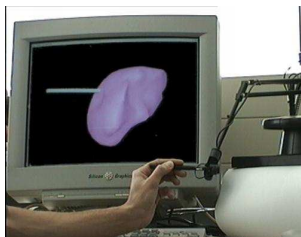


FIG. 7 – *Exemple de simulation du foie avec retour de force.*

Dans le cadre de l'action incitative AISIM (*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. En effet, le modèle de foie que nous utilisons est basé sur les données géométriques fournies par l'IRCAD et contient environ 1500 facettes et 8000 tétraèdres (discrétisation volumique fournie par le mailleur GHS3D développé par le projet Gamma à Rocquencourt). Pour des objets de cette complexité, le modèle de déformation que nous utilisons conserve ses avantages pour ce qui est de la découpe, mais reste encore relativement lourd (10 à 1000 fois le temps réel sur une machine grand public de type Pentium II 300).

En utilisant un modèle géométrique simplifié (370 faces et 1151 tétraèdres) et une implantation optimisée, nous sommes arrivé à une simulation temps réel à 60Hz, permettant un retour de force satisfaisant. Ce dernier modèle présente également l'intérêt d'être hétérogène, c'est à dire que la peau du foie (capsule de Glisson) et l'intérieur du foie (le Parenchyme) présentent des comportements dynamiques différents (la peau étant beaucoup plus rigide que le parenchyme) [21]; ceci est important sur le plan de réalisme physique.

Par ailleurs, dans le cadre de la collaboration France-Berkeley (*cf.* § 8.4.4) et en coopération avec l'équipe GMCAO¹⁵ du laboratoire TIMC-IMAG¹⁶, 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. Dans un premier temps, nous avons procédé à une phase d'acquisition de données mécaniques et géométriques sur une cuisse réelle (celle de Diego D'Aulignac). Les données mécaniques correspondant aux forces statiques de réaction de la cuisse en fonction d'un déplacement fixé (enfoncement), ont été mesurées grâce à un robot de type PUMA doté d'un capteur d'efforts mis à notre disposition par le LIRMM¹⁷. Les données géométriques (forme de la cuisse) ont été mesurées grâce au capteur optique 3D (optotrack) de l'équipe GMCAO [25].

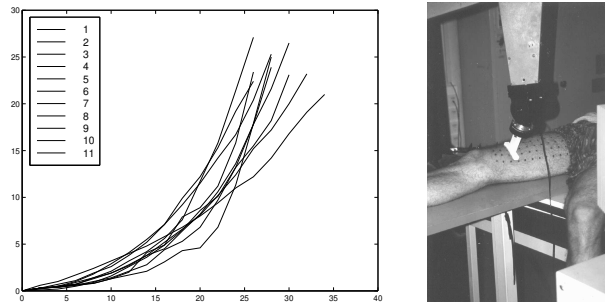


FIG. 8 – Résistance de la cuisse à la pénétration.

Ces données confirment le comportement non-linéaire de la cuisse soumise à des forces extérieures. Pour reproduire un comportement physique correct, nous utilisons un modèle qui prend en compte l'hétérogénéité de la cuisse par une discrétisation en couches superposées. Chaque couche possède des propriétés distinctes en fonctions des tissus modélisés ; les tissus gras et les muscles peuvent être représentés par des ressorts non-linéaires, et la peau par un modèle visco-élastique.

15. Gestes Médicaux et Chirurgie Assistés par Ordinateur.

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

17. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique de Montpellier

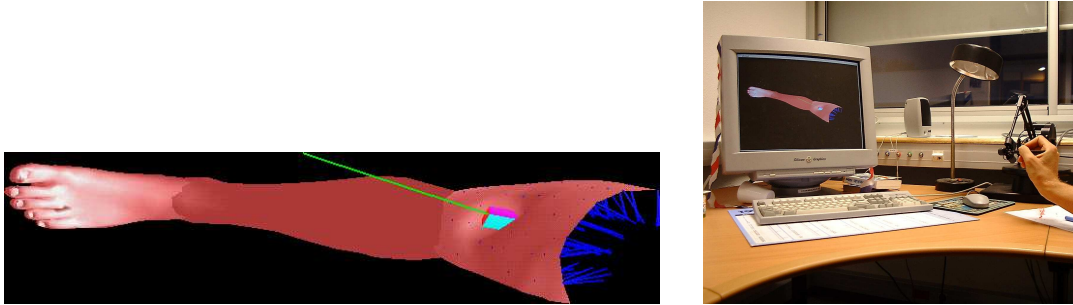


FIG. 9 – *Interaction en temps réel avec le modèle.*

6.2.3 Interactions

Participants : François Boux De Casson, Anton Deguet, Ammar Joukhadar, Christian Laugier, Emmanuel Mazer, Kenneth Sundaraj.

Nous étudions trois aspects différents des interactions : la détection des interactions, le calcul des forces ou changements d'états engendrés par les collisions, et les effets sur les corps eux mêmes (déformations et changements de topologie tels que fractures ou découpes).

Détections des interactions En ce qui concerne des calculs de distance et la détection des collisions, un travail important a été effectué afin de rendre plus robustes les algorithmes existants et de conceptualiser de nouvelles méthodes pour traiter la collision dans le cas d'objets rigides ou déformables.

Notre nouvelle approche combine l'efficacité de l'algorithme de Lin et Canny et la simplicité de l'algorithme de Gilbert-Johnson-Keerthi. Elle s'appuie sur une étude systématique des problèmes de divergence numérique de ce dernier algorithme, afin de proposer des solutions permettant de rendre la méthode plus robuste. De premiers résultats encourageants ont été obtenus sur ce point mais il reste encore un travail important pour obtenir d'une part des algorithmes robustes et efficaces, et d'autre part être en mesure de traiter dans les mêmes conditions des objets déformables (pour lesquels il existe très peu de travaux dans la littérature). Une première approche permettant de traiter des collisions entre objets déformables en temps linéaire a été proposée et implantée dans notre système Aladyn-3D [30]. Nous travaillons actuellement sur cette approche, afin de la rendre plus robuste sur le plan numérique. Nous pensons aussi pouvoir améliorer l'efficacité de l'algorithme pour la détermination quantitative des interpénétrations (travaux en cours).

Pour les types d'interactions qui le permettent (pour le retour de force en particulier), nous utilisons la carte OpenGL pour optimiser la détection des collisions. Cela nous permet de déterminer les polygones en interaction d'une manière rapide et robuste. Cette approche a été initialement développée dans le cadre de l' AISIM^[LCN99].

[LCN99] J.-C. LOMBARDO, M.-P. CANI, F. NEYRET, « Real-time collision detection for virtual surgery », *in: In Computer Animation'99*, mai 1999.

Modèles de collisions. Pour la modélisation des collisions elles-mêmes, notre problème principal est de faire cohabiter des modèles adaptés aux collisions entre objets rigides et des modèles adaptés aux collisions avec des corps déformables.

En effet, les modèles pour des collisions entre objets rigides peuvent partir de l'hypothèse que les collisions sont instantanées et donc utiliser des approches qui ne sont pas basées sur une intégration des forces de collisions au cours du temps: les effets des collisions sont alors calculés en "forces impulsives" (unité Ns^{-1}).

Les collisions avec des objets déformables (que ce soit rigide/déformable ou déformable/déformable) ne peuvent pas partir de la même hypothèse d'instantanéité. En effet, l'ensemble des déformations du corps déformable va influencer sur la quantité d'énergie accumulée puis restituée. Il faut donc avoir un modèle continu dans le temps (par opposition à instantané) des forces de collision: on utilise alors un modèle de "pénalité" (unité N).

Il est important de noter que les modèles de type pénalité sont bien moins adaptés que les modèles impulsifs pour les collisions entre objets rigides. En effet, l'intégration continue des forces au cours du temps pour un phénomène très court et intense pose de sérieux problèmes d'intégration numérique. Nous proposons donc une approche algorithmique qui permet d'utiliser l'une ou l'autre des familles de modèles suivant la nature des objets en collision.

Cette combinaison reste physiquement correcte pour deux raisons: premièrement, les deux modèles n'opèrent jamais simultanément puisque que le simulateur prend en compte les impulsions aux instants des collisions rigides, et les pénalités dans les intervalles de temps entre ces instants; deuxièmement, les changements d'états produits par les modèles impulsifs (positions et vitesses) n'influent pas sur les variables utilisées par le modèle de pénalité (forces).

Les derniers travaux sur ce sujet ont été publiés dans [16],[27].

Changements de topologie. Pour des manipulations interactives de corps virtuels, et ce en particulier pour des applications médicales, les déformations seules ne suffisent pas. Il faut aussi avoir la possibilité de couper, casser ou déchirer, bref modifier la topologie du corps modélisé. Pour un objet discrétisé en 3D par des tétraèdres, cela signifie que des éléments de volumes doivent être subdivisés et détachés, tout en respectant les propriétés physiques de la matière (volume, masse, inertie, élasticité et plasticité).

Les modèles de type masses-ressorts classiques permettent de simuler la découpe en supprimant simplement une liaison entre deux masses. Le modèle masses-ressorts que nous avons développé utilise quant à lui une représentation volumique distincte dans la mesure où nous considérons des tétraèdres de matière dont la forme (via les arêtes) est régie par des fonctions visco-élastiques.

Nous avons développé des outils qui permettent de diviser dynamiquement un tétraèdre en deux tout en respectant les volumes, les masses et les propriétés de visco-élasticité. La couche géométrique de notre simulateur *AlaDyn3D* utilise une représentation de type DCEL («Doubly Connected Edge List») qui permet de retrouver en temps constant tous les voisins d'une arête, ce qui est nécessaire pour le type de remaillage que nous effectuons.

Nous nous intéressons également actuellement aux deux problèmes corollaires du critère de rupture et du remaillage. En effet dans le cadre d'une problématique de rupture (contrairement à ce qui se passe dans un contexte de découpe) c'est le matériau simulé qui doit se rompre de lui-même, lorsqu'il est trop contraint. Différents critères de rupture sont actuellement en

cours d'étude (critères basés sur les déformations ou sur les forces subies par le matériau). Nos travaux actuels portent également sur le problème de changement de topologie (i.e. de remaillage).

6.2.4 Génération du mouvement

Participants : David Raulo, Christian Laugier.

Il s'agit ici de définir des mécanismes aptes à engendrer automatiquement certaines classes de mouvements et de comportements. Le concept utilisé ici est alors celui de "Robot Virtuel". On considère alors l'entité rigide ou articulée à doter de capacités de mouvement autonome, comme un robot virtuel ayant des capacités classiques de contrôle, de perception, et de planification de mouvement.

Comme dans le cas de la robotique, une scène virtuelle est définie comme un ensemble de polyèdres rigides dans l'espace euclidien à trois dimensions, ceux-ci constituant par exemple le sol, les murs et obstacles de l'environnement dans lequel le robot virtuel doit se déplacer. Les éclairages et paramètres de surface des objets peuvent ensuite être pris en compte par le matériel pour le rendu graphique final.

Au cours de l'année 1999, 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 et un contrôleur de mouvement classique permettant de suivre une trajectoire donnée.

Dans l'implantation actuelle, le planificateur de mouvement utilise une technique de recherche globale (type A* dans l'espace des configurations du modèle), qui permet de prendre en compte des obstacles statiques et dynamiques dans des espaces de configuration de faible dimension (ce qui est le cas pour une entité mobile évoluant dans un espace bi ou tridimensionnel). 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. Cette approche a été appliquée et testée dans le cas d'un personnage articulé se déplaçant dans un environnement 3D d'intérieur.

Le personnage est alors modélisé de manière traditionnelle à l'aide de chaînes articulées comportant 19 segments rigides (tête, cou, torse, abdomen, bassin, épaules, bras, avant-bras, mains, cuisses, jambes et pieds). Sur le plan de la locomotion (marche ou course), nous avons utilisé pour un tel personnage 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).

Cette méthode étant extrêmement rapide, il est possible de replanifier à chaque modification de l'environnement sans perte de fluidité dans l'animation du personnage : pendant le déroulement de l'animation, un opérateur modifie interactivement la scène (e.g déplacer un obstacle ou le but à atteindre et contraindre ainsi le personnage virtuel à changer de chemin si nécessaire).

Le travail actuel porte d'une part sur le développement de capacités de planification et de contrôle plus complètes utilisables par des entités mobiles plus complexes. Il porte égale-

ment sur le développement des fonctions de “perception virtuelle” mentionnées précédemment. Comme en robotique, cette fonction de perception, une fois intégrée dans une architecture décisionnelle appropriée, devrait permettre d’obtenir les capacités réactives nécessaires à une réelle autonomie en environnement dynamique.

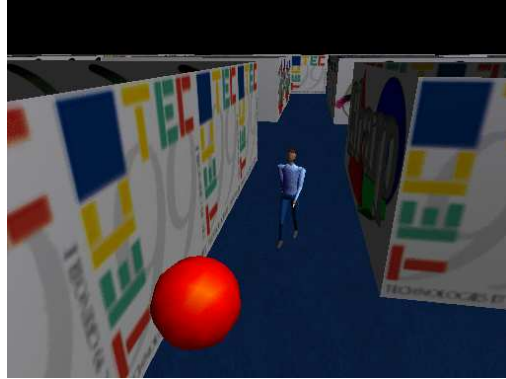


FIG. 10 – *Agent autonome dans une scène virtuelle.*

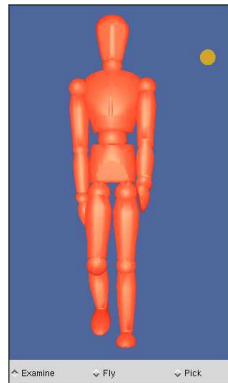


FIG. 11 – *Robot virtuel articulé.*

6.3 Programmation probabiliste des robots

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

Les travaux menés nous ont permis de proposer une approche cohérente de la prise en compte de l’incertitude en robotique au travers de deux thèses toutes obtenues avec les félicitations du jury [9, 8]. Cette année a vu les premiers résultats concrets obtenus.

- En CAO, en proposant un outil permettant de modéliser une scène (par exemple de robotique) avec toutes ses incertitudes et offrant la possibilité de résoudre plusieurs problèmes inverses[9].

- En robotique, en développant un système de programmation des robots mobiles autonomes permettant de travailler malgré les incomplétudes et les incertitudes inhérentes à la modélisation d'un environnement « naturel » [8].

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 [1994-1997], qui impliquait la CGEA¹⁸, EDF, Renault et Dassault Électronique, sur un programme de recherche sur le concept du transport urbain public et individuel (la contribution de Sharp porte sur l'aspect « conduite automatique »).

Nous participons maintenant à une nouvelle action de développement baptisée LaRA sur le thème de la « route automatisée », qui implique des organismes de recherche (École des Ponts et Chaussées, École des Mines de Paris, Inrets¹⁹, Inria, LCPC) et qui impliquera très prochainement des constructeurs automobiles, des exploitants d'autoroute et de transports en commun, et des sociétés de technologie (Robosoft, Cose et Frog Navigation en particulier).

7.2 Société Getris Image GDI

Un premier contrat de recherche a été conclu en 1996 avec cette société dans le but d'assurer l'intégration du système de simulation dynamique *Robot- Φ* dans la future machine vidéo-graphique de Getris Image. Cette collaboration s'est poursuivie en 1996-1997 par un postdoctorat industriel (A. Joukhadar) et en 1998 par des développements coordonnés (« plug-in » 3D Studio Max pour la machine « Psy » de Getris Image), et par des réponses communes à des appels d'offres. Cette année, un stagiaire a été co-encadré entre Getris et l'équipe SHARP, afin de développer un module d'animation physique temps-réel d'objets 2D [40], pour la machine d'effet spéciaux PSY.

7.3 Projet Priamm « Studio virtuel »

Le projet Sharp est à l'origine d'un projet « Studio virtuel » qui est soutenu dans le cadre du programme Priamm²⁰ du ministère de l'industrie. Ce projet, pour lequel la société Getris Image GDI est maître d'œuvre, implique les projets Sharp et Movi de l'Inria. 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.

7.4 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

18. Compagnie Générale d'Entreprise Automobile

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

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

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.

7.5 Carsense

Ce projet européen faisant partie du 5ème PCRD va démarré en janvier 1999. Il porte sur la mise au point de système de perception multi-capteurs pour véhicule automobile. Il implique un certain nombre d'industriels européens du secteur automobile (Lucas Varsity, BMW, Thomson Detecsyst, Ibeo, etc.) et des instituts de recherche (Inria, Inrets, LCPC). Dans ce projet, nous allons aborder les aspects fusions de données perceptives pour la conduite automobile.

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 (C-Velec'99 cette année).

Projet Gravier-Leibniz. Ce projet sur la prise en compte de l'incertitude (avec le laboratoire Leibniz) à 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, qui a véritablement démarré en septembre 1999, 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.

Action de Recherche Coopérative Inria AISIM²¹ et projet Caesar. Cette action de recherche, dont l'objectif est la modélisation d'organes pour la chirurgie virtuelle, a démarré en

21. Action Incitative SIMulation de chirurgie.

novembre 1997 pour une durée de deux ans. Nous y sommes impliqués en compagnie l'IRCAD²² 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.

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 sur la réalisation d'un simulateur fonctionnel de robots [44] en collaboration avec le projet Bip.

- Avec le projet Movi, sur le thème du Studio Virtuel (financement Priamm).

8.3 Actions financées par la Commission Européenne

Projet « Multi-agent robot systems for industrial applications in the transport domain ». Nous participons à ce projet européen Inco-Copernicus d'une durée de deux ans [1997-1999]. Il est coordonné par l'université de Karlsruhe et inclut des partenaires hongrois, polonais, russes et biélorusses.

8.4 Relations bilatérales internationales

8.4.1 Europe

Institut Franco-Allemand pour l'Automatique et la Robotique. Cet institut commun à la région Rhône-Alpes et au Wurtemberg nous a accordé son soutien pour une collaboration de quatre ans avec l'université de Karlsruhe sur les aspects saisie autonome [1995-1999].

8.4.2 Russie et Asie Centrale

Institut Franco-Russe Liapunov. L'institut Liapunov qui est un institut commun à l'Inria et à l'Académie des Sciences de Russie, nous a accordé son soutien pour une collaboration d'un an avec l'université de Saint-Petersbourg sur le thème « Régulateurs universels pour le contrôle de mouvements de véhicules non-holonomes » [juillet 1998- juin 1999]. Dans le cadre de ce projet, Igor Paromtchik a rendu visite à l'université de Saint-Petersbourg en janvier 1999.

8.4.3 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 deux séjours de plusieurs mois à Riken.

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

Collaboration avec Singapour. Une collaboration active avec l'université Technologique Nanyang de Singapour (NTU) a démarré depuis septembre 1997 (tenue d'un séminaire, participation à Tech Connect'97). Un accord de coopération mettant en avant le thème «Transport intelligent» a été signé par les présidents de l'Inria et de NTU en septembre 1998. Plusieurs véhicules Cycab, développés par l'Inria et commercialisés par la société Robosoft, ont été achetés par NTU comme support matériel à la collaboration scientifique mise en place, et des membres du projet Sharp (A. Lambert, C. Laugier, F. Large et A. Scheuer) y ont effectué des séjours en 1999. Un symposium sur le transport intelligent a été organisé dans ce cadre en novembre 1999, avec le support de l'ambassade de France et la participation d'industriels français.

8.4.4 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 au cours de l'année 1999. M. Cherif, après avoir travaillé en 1997 à l'Inria Rhône-Alpes, a passé l'année 1998 à Vancouver. Il est actuellement de retour à l'Inria Rhône-Alpes, et plusieurs publications communes ont été réalisées cette année.

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 va se poursuivre en 1999-2000 dans le cadre d'un nouveau projet soutenu par le fond France-Berkeley (avec l'équipe de S. Sastry). Une publication commune a été réalisée cette année.

8.4.5 Amérique du Sud et Amérique Centrale

Coopération avec l'université de Brézia (Brésil). Dans le cadre du programme de coopération Inria-Brésil, nous collaborons avec l'université de Brézia sur les thèmes robotique mobile et programmation des robots. L'action contractuelle sur le thème du « parking automatique » a été jugée satisfaisante pour 1999 et est reconduite pour l'année 2000.

8.5 Accueils de chercheurs étrangers

En 1999, le projet Sharp a accueilli les chercheurs suivants :

- Dr. Ming Xie, Professeur à Nanyang Technical Univ. à Singapour (mai-juin 1999)]
- Dr. Oussama Al Chami, Professeur à l'Issat de Damas en Syrie (juin 1999).

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

- C. Laugier a participé aux comités de programme de principales conférences internationales en robotique pour l'année 1999 : *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (ICRA'99) à Detroit, *IEEE-RSJ Intelligent Robots and Systems* (IROS'99) à Kyongju

(Corée du Sud), *Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC'99)* à Tokyo, *Conf. sur les Véhicules Electriques (C-Velec'99)* à Grenoble, *Int. Conf. on Field and Service Robotics (FSR'99)* et *IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning (ISATP'99)*.

- C. Laugier et S. Sekhavat ont activement participé à l'organisation du "Symposium on Intelligent Transportation Systems" à Singapour, 29-30 decembre 1999, (organisé par le laboratoire commun "NTU-INRIA Joint Intelligent Vehicle Laboratory") en assumant la responsabilité de l'organisation du côté européen.
- C. Laugier est membre du comité éditorial de la Revue d'Intelligence Artificielle.
- C. Laugier est membre du « Steering Advisory Committee » de la conférence internationale *IEEE-RSJ Intelligent Robots and Systems*.
- C. Laugier est membre du conseil d'administration de l'AIP²³, ainsi que du nouveau conseil de surveillance de la société Getris Image GDI.
- M. Cherif, Th. Fraichard, C. Laugier, E. Mazer et S. Sekhavat sont des lecteurs réguliers pour les revues *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, *Int. Jour. on Robotics Research*, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, *Jour. of Robotics and Autonomous Systems* et *Revue d'Intelligence Artificielle*, ainsi que pour de nombreuses conférences internationales.
- C. Laugier et E. Mazer participent régulièrement à des jurys de thèses et d'habilitation en tant que président, rapporteur ou examinateur. En 1999, ils ont participé à des jurys de thèses à Grenoble, Montpellier, Paris et Toulouse.
- E. Mazer est rapporteur pour l'Union Européenne sur les projets Amira (Advanced man-machine interfaces for robot systems applications [1997-1998]) et Amateur (Advanced mechatronics technology for turbine blades repair [1997-1998]).
- E. Mazer est consultant auprès de Deneb Robotics Inc. (Detroit, USA) sur les aspects géométriques de la planification de mouvement.

9.2 Enseignements universitaires

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

- « Tutorial on Intelligent Robots and Autonomous Vehicles » lors du Summer School in Robotics and Computer Vision, 7-8 juillet 1999, Oxford Univ. *Enseignant: C. Laugier*.
- « Tutorial on Autonomous Systems », Xalapa (Mexique), mars 1999. *Enseignant: C. Laugier*.
- Cours « Architecture et programmation des robots » en DEA Image-Vision-Robotique de l'INPG²⁴. *Enseignant: C. Laugier*.

²³. Atelier Inter-établissements de Productique de Grenoble.

²⁴. Institut National Polytechnique de Grenoble.

- Cours « Modélisation et planification de tâches en robotique » en DEA Image-Vision-Robotique de l'INPG. *Enseignant: C. Laugier.*
- Cours de « Robotique » en valeur C du Cnam. *Enseignant: C. Laugier et J. Troccaz.*
- Travaux dirigés en Robotique en DEA Image-Vision-Robotique de l'INPG. *Enseignant: Th. Fraichard.*
- Colles d'informatique en prépa-bio au lycée Champollion. *Enseignant: François Boux de Casson.*
- TD/TP de bases de données relationnelles (MySQL + PHP): deug STPI 2^{ieme} année. TP d'algorithmique: deug Sciences de la Vie, 1^{ere} année. *Enseignant: Frédéric Large.*

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 :

- E. Mazer, L. A. Muñoz, C. Laugier, I. Paromtchick et S. Sekhavat ont présidé des sessions dans les principales conférences internationales en robotique (IROS'99, ICRA'99, ITSC'99).
- C. Laugier a donné un séminaire sur la simulation dynamique aux Journées Nationales de la Recherche en Robotique à Montpellier en octobre 1999.
- C. Laugier a fait une conférence sur invitation sur la "simulation dynamique et le prototypage virtuel" au "Workshop on motion support in virtual prototyping" organisé à l'Université de Stanford par J.C. Latombe (mai 1999).
- C. Laugier a donné trois séminaires sur des thèmes liés à "l'autonomie de mouvement en robotique mobile". Le premier dans le cadre de Journées Franco-mexicaines à Xalapa (Mexique, mars 1999). Le deuxième à l'Université de Monterrey (Mexique, mai 1999). Le troisième à Nanyang Technological University à Singapour (juin 1999).
- C. Laugier a fait une conférence sur invitation sur les "véhicules autonomes" à International Symposium on Robotics Research (ISRR'99), à Salt Lake City (USA, octobre 1999).
- En 1999, Th. Fraichard a donné trois séminaires invités sur des thèmes liés à la planification et l'autonomie de mouvement pour véhicules. Le premier devant le GDR CHMAC à Cluny en septembre. Le deuxième à l'université de Tsukuba au Japon en novembre et le troisième à l'institut Riken au Japon en novembre.

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] T. FRAICHARD, «Trajectory planning in a dynamic workspace: a 'state-time' approach», *Advanced Robotics* 13, 1, 1999, p. 75–94.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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

- [7] 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.
- [8] O. LEBELTEL, *Programmation bayésienne des robots*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), octobre 1999.
- [9] 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.
- [10] L. MUNOZ UBANDO, *Vers la manipulation autonome avec main articulée*, Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble (FR), juin 1999.

Articles et chapitres de livre

- [11] P. BESSIÈRE, E. DEDIEU, O. LEBELTEL, E. MAZER, K. MEKHNACHA, «Interprétation ou Description (I): Proposition pour une théorie probabiliste des systèmes cognitifs sensori-moteurs», *Intellectica* 26–27, 1–2, 1999, p. 257–311.
- [12] P. BESSIÈRE, E. DEDIEU, O. LEBELTEL, E. MAZER, K. MEKHNACHA, «Interprétation ou Description (II): Fondements mathématiques de l'approche F+D», *Intellectica* 26–27, 1–2, 1999, p. 313–336.
- [13] M. CHERIF, K. K. GUPTA, «A Global Planner for In-Hand Dextrous Re-Configuration of Rigid Objects», *Advanced Robotics* 13, 4, décembre 1999.

- [14] M. CHERIF, K. K. GUPTA, «Planning Quasi-static Fingertip Manipulations for Re-configuring Objects», *IEEE Trans. Robotics and Automation* 15, 5, octobre 1999, p. 837–848.
- [15] 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.
- [16] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «A Collision Model for deformable bodies», *Advanced Robotics*, décembre 1999.
- [17] T. FRAICHARD, «Trajectory planning in a dynamic workspace: a ‘state-time’ approach», *Advanced Robotics* 13, 1, 1999, p. 75–94.
- [18] F. LAMIRAUX, S. SEKHAVAT, J.-P. LAUMOND, «Motion Planning and Control for Hilare Pulling a Trailer», *IEEE Trans. Robotics and Automation* 15, 4, août 1999, p. 640–652.
- [19] C. LAUGIER, T. FRAICHARD, P. GARNIER, I. E. PAROMTCHIK, A. SCHEUER, «Sensor-based control architecture for a car-like vehicle», *Autonomous Robots* 6, 2, mai 1999.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [20] R. BALANIUK, «Using Fast Local Modeling to Buffer Haptic Data», in : *Proc. of the PHANToM Users Group Workshop*, Boston, MA (US), octobre 1999.
- [21] 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.
- [22] M. CHERIF, J. IBANEZ-GUZMAN, C. LAUGIER, T. GOH, «Motion planning for an all-terrain autonomous vehicle», in : *Proc. of the Int. Conf. on Field and Service Robotics*, p. 104–109, Pittsburgh, PA (US), août 1999.
- [23] M. CHYBA, S. SEKHAVAT, «Time optimal Paths for a mobile robot with one trailer», in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3, p. 1669–1674, Kyongju (KR), octobre 1999.
- [24] D. D’AULIGNAC, R. BALANIUK, «Providing reliable force-feedback for a virtual, echographic exam of the human thigh», in : *Proc. of the PHANToM Users Group Workshop*, Boston, MA (US), octobre 1999.
- [25] 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.
- [26] D. D’AULIGNAC, C. LAUGIER, M. C. CAVUSOGLU, «Towards a realistic echographic simulator with force feedback», in : *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2, p. 727–732, Kyongju (KR), octobre 1999.
- [27] A. DEGUET, A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Modèles et algorithmes pour la simulation dynamique de corps rigides et déformables», in : *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, p. 95–108, Montpellier (FR), septembre 1999.

- [28] T. FRAICHARD, A. SCHEUER, R. DESVIGNE, «From Reeds and Shepp's to continuous-curvature paths», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, p. 585–590, Tokyo (JP), octobre 1999.
- [29] S. V. GUSEV, I. M. MAKAROV, I. E. PAROMTCHIK, V. A. YAKUBOVICH, «Adaptive Stabilization of Mechanical System with Nonholonomic Constraints», *in: Proc. of the Conf. on Adaptive Systems*, Saint Petersburg (RU), septembre 1999.
- [30] A. JOUKHADAR, A. SCHEUER, C. LAUGIER, «Fast Contact Detection between Moving Deformable Polyhedra», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3, p. 1810–1815, Kyongju (KR), octobre 1999.
- [31] C. LAUGIER, M. PARENT, «Automated vehicles for future urban transport systems», *in: Proc. of the Int. Conf. on Field and Service Robotics*, p. 191–196, Pittsburgh, PA (US), août 1999.
- [32] C. LAUGIER, M. PARENT, «Towards a new Urban Transport System involving Automated Vehicles», *in: Actes de la conf. sur les Véhicules Electriques*, p. 146–150, Grenoble (FR), novembre 1999. Invited paper.
- [33] C. LAUGIER, M. PARENT, «Towards Motion Autonomy for Future vehicles», *in: Proc. of the Int. Symp. on Robotics Research*, Snowbird (US), octobre 1999. Invited paper.
- [34] C. LAUGIER, I. E. PAROMTCHIK, M. PARENT, «Developing Autonomous Maneuvering capabilities for Future Cars», *in: Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems*, p. 68–73, Tokyo (JP), octobre 1999.
- [35] C. LAUGIER, «Information Technology in Autonomous Vehicles», *in: Proc. of the Int. Conf. on Information Technology*, Damascus (SY), avril 1999. Invited paper.
- [36] J. LU, S. SEKHAVAT, C. LAUGIER, «Fuzzy variable-structure control for Nonholonomic vehicle path tracking», *in: Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems*, p. 465–470, Tokyo (JP), octobre 1999.
- [37] A. SCHEUER, M. XIE, «Continuous-Curvature Trajectory Planning for Manoeuvrable Non-Holonomic Robots», *in: Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3, p. 1675–1680, Kyongju (KR), octobre 1999.
- [38] S. SEKHAVAT, M. CHYBA, «Nonholonomic Deformation of a Potential Field for Motion Planning», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, p. 817–823, Detroit, MI (US), mai 1999.
- [39] 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.

Rapports de recherche et publications internes

- [40] N. BARATA, «Animation d'objets 2D type drapeau en temps réel», *Mémoire de fin d'études*, Univ. Paul Sabatier, I. U. P. Systèmes Intelligents, Toulouse (FR), août 1999.
- [41] M. CHERIF, K. K. GUPTA, «Global Planning for Dexterous Re-orientation of Rigid Objects: Finger Tracking with Rolling and Sliding», *Research Report n° RR-3770*, Inst. Nat. de Recherche en Informatique et en Automatique, septembre 1999.

- [42] M. CHERIF, M. VIDAL, C. LAUGIER, « A Roadmap-based Algorithm for Planning Handling Operations in Changing Industrial Plants », *Research Report n° RR-3629*, Inst. Nat. de Recherche en Informatique et en Automatique, février 1999.
- [43] R. DESVIGNE, « développement d'un logiciel de visualisation de chemins », *Mémoire de fin d'études*, Ecole des Hautes Etudes Industrielles, Lille (FR), 1999.
- [44] C. GUILLOUD, J.-C. SAN SEVERINO, « Simulateur robotique fonctionnel », *Rapport de Magistère*, Univ. Joseph Fourier, Grenoble (FR), septembre 1999.
- [45] C. LAUGIER, V. A. YAKUBOVICH, « Universal Regulators for the Motion Control of Nonholonomic Vehicles », *Rapport scientifique du projet n° 97-01*, Institut franco-russe A.M. Liapunov, Univ. de Moscou (RU), juin 1999.
- [46] P. MILHE, « Optimalité des chemins avec manoeuvres pour robot mobile de type voiture », *Mémoire de fin d'études*, Inst. Nat. des Sciences Appliquées. Département Génie Mathématique et Modélisation, Toulouse (FR), août 1999.
- [47] G. PERINO, « Etude de la simulation dynamique d'objets rigides et des modèles d'interaction », *Mémoire de fin d'études*, Univ. Paul Sabatier, I. U. P. Systèmes Intelligents, Toulouse (FR), août 1999.