

Rapport INRIA 1994 — Programme 4
Programmation automatique et systèmes
décisionnels en robotique

PROJET SHARP

3 mai 1995

PROJET SHARP

Programmation automatique et systèmes décisionnels en robotique

Localisation : *Grenoble*¹

Mots-clés : exécution de mouvement (1), interaction perception/action (1), planification de mouvement (1), programmation de niveau tâche (1), raisonnement géométrique (1), réactivité (1), téléprogrammation (1).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Christian Laugier, directeur de recherche, Inria

Responsables permanents

Christian Laugier, directeur de recherche, Inria

Emmanuel Mazer, chargé de recherche, CNRS

Secrétariat

Danièle Herzog

Personnel Inria

Thierry Fraichard, chargé de recherche, Inria (en postdoc au
CMU, USA jusqu'au 28/11/94)

Gérard Baille, ingénieur de recherche, Inria

Personnel CNRS

¹Lifa/Inria Rhône-Alpes

Emmanuel Mazer, chargé de recherche, CNRS

Personnel INPG

Pascal Di Giacomo, ingénieur de recherche, INPG

Ingénieurs experts

Christine Milési-Bellier

Chercheurs extérieurs

Pierre Bessière, chargé de recherche, CNRS

Annie Luciani, chercheur Ministère de la Culture

Jocelyne Troccaz, chargé de recherche, CNRS

Chercheur invité

Kamal Gupta, Simon Fraser University, du 15/09/93 au
15/03/94

Chercheur post-doctorant

Nicolas Mouly, Inria Sophia-Antipolis, bourse Inria, du 15/11/93
au 15/05/95

Bill Triggs, University of Oxford, bourse CHM, du 16/02/94
au 31/08/95

Chercheurs doctorants

Juan-Manuel Ahuactzin, boursier Mexique

Oussama Al Chami, contractuel Aleph Technologies

Rémis Balaniuk, boursier Brésil

Christian Bard, boursier MRES/Cnes

Dominique Casanova, boursier Dret

Moëz Cherif, boursier Crous

Eric Dedieu, boursier Inria

Fernando De La Rosa, boursier Colombie

Philippe Garnier, boursier MRES

Mouna Hassoun, boursière Syrie

Ammar Joukhadar, boursier Syrie

Alberto Munoz, boursier Mexique

José Najera, boursier Mexique

Stagiaires divers

Alexis Scheuer, scientifique du contingent jusqu'au 31/10/94

Anton Deguet, scientifique du contingent à compter du 01/09/94

Wim Witvrouw, Réseau CHM Heros du 01/11/94 au 28/02/95

Albert Castellet, Réseau CHM Eret du 01/11/94 au 28/02/95

2 Présentation du projet

L'objectif du projet Sharp est de développer les concepts de la *programmation de niveau tâche* et de *l'autonomie* en robotique. Ces concepts devraient faciliter la mise en oeuvre des robots sur des tâches nouvelles, partiellement spécifiées et non nécessairement répétitives (en particulier des tâches pour lesquelles il est difficile, voire impossible, de faire directement appel à un homme, ou encore pour des tâches d'assistance d'un opérateur humain). Cette orientation du projet nous permet de viser un vaste champ d'application potentiel couvrant la robotique de service et celle d'intervention (sans exclure pour cela certaines applications de la robotique manufacturière).

La poursuite des objectifs précédents implique d'une part de développer des techniques qui permettent de faire face à la complexité intrinsèque du problème (dimensions temporelle et spatiale du mouvement, influence des paramètres dynamiques et des interactions robot/environnement), et d'autre part de s'affranchir des problèmes qui dérivent de la nature physique de l'univers du robot (incertitudes et aléas divers). Ceci nous conduit à mettre l'accent sur les concepts clés de *planification en CAO-Robotique*, de *modèles physiques pour la Robotique* et d'*autonomie des véhicules*. Notre approche pour résoudre ces problèmes consiste à appliquer une double démarche visant à la fois à développer des techniques originales et à tenter d'intégrer et d'améliorer certaines techniques existantes lorsque cela s'avère possible. Cette démarche méthodologique s'accompagne de manière naturelle d'un processus de validation expérimentale de ces techniques grâce à un support matériel important (manipulateurs, main articulée, véhicule électrique, capteurs divers, cartes spécialisées et système multi-processeurs temps réel). Quelques applications typiques des problèmes abordés sont alors considérées à la fois comme source d'inspiration et comme support de validation de nos travaux : le copilote électronique d'aide à la conduite de véhicules automobiles (projet Eurêka Prométhéus et projet Inria/Inrets Praxitèle), la robotique d'intervention sur site planétaire (Groupement Scientifique Risp), et la robotique de maintenance d'équipements (projet soutenu par la Dret).

3 Actions de recherche

3.1 Planification et CAO-Robotique

3.1.1 Stratégies perceptives pour placer une caméra

Participants : Oussama Al Chami, Bill Triggs

Un bon positionnement du capteur (caméra, laser, ...) est indispensable pour une bonne perception. Dans le but de réaliser des tâches perceptives telles que la localisation, l'inspection, la modélisation d'un objet, la servocommande visuelle et le contrôle visuel de tâche, nous travaillons sur des planificateurs heuristiques de placements d'une caméra montée sur un bras de robot.

Les contraintes considérées sont de quatre types différents: **la tâche**: distance et direction caméra-tâche; **la caméra**: champs de vision, focal; **le robot**: accessibilité cinématique; **l'environnement**: collisions robot/environnement, occlusion et encombrement visuel de tâche.

La méthode utilisée se base sur une recherche heuristique avec une fonction d'évaluation. L'évaluation d'un positionnement est la somme des résultats de plusieurs tests indépendants. Chaque test quantifie heuristiquement un seul aspect de la vue, et les diverses contraintes de tâche sont pondérées lors de la somme.

Nous avons implanté deux planificateurs qui utilisent deux techniques de recherche différentes pour produire les positionnements candidats:

- **Recuit simulé.** On recherche les meilleurs positionnements 3D de la caméra en faisant des petits mouvements aléatoires [2, 12].
- **Décomposition récursive-géométrique** d'une région de recherche [39]. On utilise un modèle heuristique-probabiliste de variation de la fonction d'évaluation pour l'élagage des régions peu probables, et à chaque étape on décompose la région ayant l'augmentation anticipée la plus grande.

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet Esprit3-Bra Second et du projet inter-PRC VIA. Il est également partiellement supporté par une bourse post-doctorale Européenne de type CHM (bourse institutionnelle obtenue dans le cadre d'une coopération avec le projet Movi de l'Inria Rhône-Alpes). Ce travail sera poursuivi en 1995. Il devra donner lieu

sur le plan pratique à une intégration dans le démonstrateur du projet Esprit3-Bra Second.

3.1.2 Manipulation dextre autonome et intégration système

Participants: Christian Bard, Christian Laugier, Jocelyne Troccaz, Christine Milési-Bellier

Au cours des années précédentes, nous avons défini une approche pour la saisie dextre qui repose essentiellement sur une analyse morphologique de l'objet à saisir et sur le choix d'une préconfiguration, qui prennent en compte les contraintes de tâches. Cette approche a été poursuivie en 1994 (cf. thèse de C. Bard [3]) en mettant l'accent sur les aspects "stabilité" et "intégration système". Les différentes fonctions intégrées sont les suivantes :

- **Analyse visuelle de la tâche.** Elle inclue la reconnaissance et l'analyse de forme (informations venant de la vision). Nous utilisons un modèle volumique d'objets à base d'octree issu, soit d'un système CAO, soit de la vision [5]. D'une manière générale, cet octree représentatif de l'objet à saisir et de son environnement proche, subit une analyse morphologique. Il est transformé en cylindres elliptiques (CE), qui fournissent des informations pertinentes pour la saisie de l'objet : ses proportions et le moyen d'y accéder (par les axes de l'ellipse). Chaque CE est représentatif de l'objet ou d'une de ses protubérances, par lesquelles il est intéressant de le saisir.
- **Mouvements relatifs à la saisie.** Il inclut le mouvement balistique et les mouvements fins près de l'objet. La notion de préconfiguration (i.e. l'action de mise en forme des doigts autour de l'objet avant la saisie) et les informations issues de l'analyse morphologique de l'objet nous permettent d'engendrer une configuration des doigts autour de l'objet. D'un point de vue robotique, la préconfiguration (associée à un groupe de prises) est considérée comme une configuration englobante de l'objet. Elle définit le type de contact requis entre un doigt et l'objet, l'orientation du poignet, le nombre de doigts utilisés, et enfin, l'opposition entre les doigts (et/ou la paume de la main). Une stratégie de fermeture, associée à chaque préconfiguration, permet de définir la position de contact des doigts sur l'objet. Après l'analyse morphologique, on associe à chaque CE une liste de préconfigurations possibles dépendant des proportions et de la tâche à effectuer (en termes de précision et/ou de puissance). Le choix d'une prise (i.e. d'un CE , d'une préconfiguration et

d'une stratégie de fermeture associée) est effectuée suivant des critères heuristiques de tâche et des critères qualitatifs de stabilité. Cette analyse a pour résultat, la planification de la saisie d'un objet par une liste de prises possibles, en tenant compte des contraintes d'accessibilité et de tâche à réaliser.

• **Ajustement des doigts sur l'objet.** Pour cela, nous testons la faisabilité d'une prise par l'utilisation des modèles physiques tels qu'ils sont décrits dans le paragraphe 3.2.1. Les informations issues de la préconfiguration et de l'analyse morphologique sont exprimées dans le dit modèle sous la forme de contraintes de position entre les doigts et l'objet. Elles respectent la stratégie de fermeture associée à une préconfiguration et permettent de simuler les interactions entre les doigts et l'objet, en tenant compte des forces de frottements, des forces de collisions et de la viscosité interne et externe ². Cette approche permet potentiellement de traiter des objets déformables. Ce travail sera poursuivi en 1995.

• **Intégration système et expérimentations.** Ces expérimentations ont été effectuées dans une optique d'intégration globale avec la vision [29] (utilisation de modèles fournis par la vision) et avec le contrôle/commande (utilisation de paramètres communs, telles les forces, et ce, grâce aux modèles physiques).

Un démonstrateur a été réalisé dans le cadre du projet Esprit3-Bra Second [47] pour réaliser une tâche de "prendre et poser" dans une scène partiellement structurée mettant en oeuvre un manipulateur équipé d'une pince à deux mors parallèles, et un deuxième manipulateur équipé d'une tête stéréo. Pour cette tâche, notre planificateur de saisie coordonne les opérations et calcule les paramètres nécessaires à la planification et à l'exécution effective de la saisie. Une coopération avec le projet Movi a conduit à la mise en place d'une commande référencée capteur afin d'amener le robot jusqu'à la position finale de saisie par asservissement visuel [47]. Le démonstrateur final (prévu en Juin 1995) doit intégrer la main avec les interactions main/objet, le positionnement automatique de la caméra en fonction des paramètres de la tâche, le positionnement précis (au moyen de la perception) de l'objet à saisir, et la reconstruction volumique des obstacles et de l'objet.

Concernant les expérimentations avec la main de Salisbury à poste fixe, le contrôle/commande en position nous a permis de valider la partie préconfiguration et fermeture des doigts jusqu'au contact de l'objet.

²La viscosité externe est utilisée en environnement spatial pour la simulation du vide.

Les travaux en cours portent, d'une part sur la double intégration "vision-planification" et "planification-contrôle", et d'autre part sur les problèmes de manipulation des objets dans la main, une fois la saisie réalisée. Ce travail est décrit plus en détail au paragraphe 3.1.3, où la main articulée est utilisée comme un outil de compliance passive pour réaliser des tâches de manipulation fine [45].

3.1.3 Incertitude géométrique et mouvement

Participants: Fernando De la Rosa, Pascal Di Giacomo, Christian Lagier, Alberto Munoz, José Nájera, Christian Bard

Durant l'année 1993, les travaux développés avaient été concentrés sur l'intégration des fonctions de planification et de contrôle dans un contexte d'assemblage automatique [34] (travaux réalisés en collaboration avec l'université de Louvain, dans le cadre du projet Esprit3-Bra Second). Ces travaux ont été poursuivis en 1994 en considérant quelques contraintes supplémentaires associées à l'exécution des actions d'assemblage : le réglage automatique de paramètres nécessaires pour la commande du robot (travail réalisé dans le cadre d'une collaboration scientifique avec le département d'informatique de l'université de Tulane aux états-Unis). Nous avons aussi commencé, durant cette année, quelques travaux concernant les actions d'assemblage en utilisant une main articulée (manipulation dextre). Parallèlement aux travaux sur l'exécution des actions d'assemblage, nous avons complètement redéveloppé la méthode de planification locale proposée en 1993. Cette nouvelle méthode utilise des modèles géométriques plus appropriés pour estimer les effets de l'incertitude. Afin de garantir l'exécution correcte d'une tâche d'assemblage, un planificateur de mouvements fins doit considérer l'incertitude géométrique des actions pour augmenter la robustesse des actions générées. Le contrôleur du robot doit, quant à lui, combiner l'information provenant des systèmes externes de perception (capteurs de force, proximité, vision, ...) avec des stratégies de reconnaissance et de correction de position. Ces considérations ne sont pas suffisantes pour mener à terme les actions du robot. La sélection de l'ensemble de paramètres qui déterminent le fonctionnement du robot (vitesses, accélérations, forces à maintenir, ...) pendant l'assemblage joue un rôle primordial dans l'exécution des mouvements. Ces paramètres

ne sont pas connus au moment de la planification, pourtant ils sont indispensables pour exécuter correctement la tâche.

Pour déterminer les valeurs des paramètres de contrôle, nous avons développé un module d'apprentissage basé sur un système de règles heuristiques. à partir d'un tirage aléatoire de différentes valeurs de paramètres (tout en respectant les seuils de sécurité des paramètres du système de contrôle), un mécanisme de détection de terminaison détermine le résultat de l'exécution de l'action demandée. Un code de terminaison est attribué à l'action selon son succès ou son échec en comparant la position finale de l'objet manipulé avec la position initialement désirée. Le système de règles reçoit ensuite ce code et modifie ainsi les paramètres concernés en essayant de trouver un ensemble valide de valeurs pour assurer l'exécution correcte de l'action [46]. Le résultat du système de réglage de paramètres est un ensemble de courbes représentant les différentes combinaisons valides de paramètres pouvant être utilisées pour exécuter chaque action de montage. Les travaux actuels portent sur le développement d'un mécanisme "intelligent" de détection de terminaison plus générale qui permettra d'interpréter les résultats des actions à partir d'une information de force (contrairement au mécanisme précédent basé sur une information de position).

Dans le contexte de l'exécution d'actions de montage, nous avons commencé à développer un système de manipulation dextre avec une main articulée. Le but d'une telle approche est d'augmenter les capacités de manipulation du robot en ajoutant quelques degrés de liberté au niveau du poignet d'un bras manipulateur. Ceci permet de modifier la position d'un objet saisi en agissant sur la cinématique de la main sans affecter le mouvement du bras (émulation d'un outil de compliance passive). Notre méthode utilise un raisonnement géométrique pour déterminer les séquences de mouvements fins des doigts de la main ceci afin d'affecter l'orientation de l'objet manipulé. La stabilité de la saisie est garantie en considérant quelques lois physiques de base [45] [37]. Différentes stratégies de manipulation ont été testées en simulation à l'aide d'un système de visualisation CAO (voir figure 1). Les travaux actuels portent sur l'amélioration de ces stratégies de mouvement et sur le contrôle d'exécution de la main articulée de l'équipe. Ce travail est réalisé en collaboration avec l'Université de Karlsruhe (projet IAR).

Pour la planification, nous avons re-développé la méthode locale basée sur le champ de potentiel fictif en explorant maintenant l'espace des

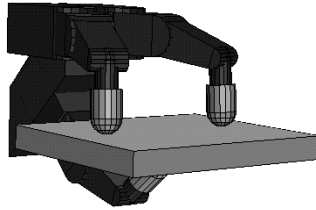


Figure 1 : Configuration de saisie d'un objet prismatique avec la main articulée de l'équipe (main de Salisbury).

configurations au lieu de l'espace de travail antérieurement utilisé. En utilisant l'espace des configurations (qui ne se calcule que partiellement ici), le problème de planification a été simplifié : la détermination des mouvements d'un robot polygonal entouré d'obstacles polygonaux se transforme en un problème de planification de mouvements d'un robot ponctuel dans un environnement composé de C -obstacles polygonaux. Ceci nous a permis d'améliorer les performances du planificateur capable de résoudre des problèmes de montage plus complexes (intégration plus complète des mouvements de translation et de rotation) tout en produisant des stratégies de mouvement plus robustes. Les incertitudes de position et de mouvement sont traitées explicitement en utilisant quelques constructions géométriques qui permettent d'estimer l'évolution des erreurs pendant l'exécution des mouvements [31][38]. Cette méthode est assez générale pour être adaptée tant à la planification des tâches d'assemblage, qu'à la planification de mouvements d'un robot mobile (voir figure 2). Ce travail est réalisé dans le cadre du projet inter-PRC VIA et sera poursuivi en 1995.

Pour l'instant, les travaux précédents ont été réalisés en simulation avec un modèle d'incertitude associé uniquement aux composantes de translation du mouvement. Les travaux en cours portent sur l'intégration de l'incertitude d'orientation dans la méthode de planification. En ce qui concerne la partie expérimentale, nous comptons réaliser quelques expérimentations avec un bras manipulateur à six degrés de liberté équipé d'un capteur de force et d'un outil de compliance passive. Des expérimentations avec un robot mobile holonome sont aussi prévues dans le cadre d'une collaboration avec le Laas à Toulouse (projet Inter-PRC VIA).

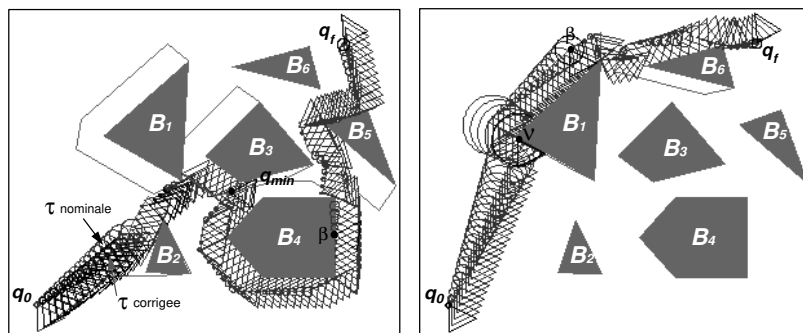


Figure 2 : La figure de gauche montre une trajectoire générée par la méthode locale pour guider un robot mobile de q_0 à q_f en explorant l'espace de configuration. Les mouvements sont planifiés aussi bien dans l'espace libre que dans l'espace de contact. La figure de droite montre une trajectoire pour la même tâche mais sous des contraintes d'incertitude plus importantes.

3.1.4 Planification pour un grand nombre de degrés de liberté

Participants : Juan-Manuel Ahuactzin, Emmanuel Mazer, Pierre Besière

Le principal résultat obtenu en 1994 sur ce sujet est la formalisation complète de l'algorithme "Fil d'Ariane" (voir rapport 1993 et thèse de J. Ahuactzin [1]). Ce travail a permis de donner une définition précise à la notion de "difficulté" d'un problème de planification de trajectoire. En effet, la difficulté d'un tel problème n'est pas forcément relié ni au nombre d'obstacles ni au nombre de degrés de liberté mais plutôt à la dimension des couloirs de l'espace des configurations qu'il faut franchir pour atteindre le but. Cette formalisation nous a permis de montrer que la partie "explore" de l'algorithme Fil d'Ariane donnait une borne inférieure à la dimension de ces couloirs.

Cette formalisation a par ailleurs ouvert de nouvelles directions de recherche concernant cet algorithme [15]. Citons par exemple l'utilisation des diagrammes de Voronoï pour accélérer le placement des balises et la planification dans l'espace de contrôle en utilisant les métriques adaptées. Sur ce dernier point nous avons obtenu des résultats encourageants en planifiant les mouvements d'un véhicule articulé.

3.1.5 Intégration perception/action et apprentissage

Participants : Rémis Balaniuk, Eric Dedieu, Emmanuel Mazer

Un des principaux résultats sur ce sujet concerne l'élaboration d'un algorithme d'apprentissage fonctionnel. La méthode utilisée suppose de faibles connaissances a priori sur la fonctionnelle que l'on cherche à apprendre. Ces conditions étant vérifiées pour la plupart des fonctionnelles utilisées en Robotique (changeur direct, jacobienne, matrice d'interaction), on peut penser pouvoir l'utiliser pour identifier expérimentalement ces fonctionnelles sans avoir recourt à un mécanisme d'identification paramétrique. La méthode a les avantages suivants : 1) elle utilise un jeu de données réduit, 2) elle fournit la fonction sous une forme qui est facilement inversible. Des tests très concluants ont été menés en simulation sur des systèmes simples [13], la prochaine étape consistera à valider l'approche sur des espaces de dimension plus grands.

Un autre aspect de ce sujet est le développement d'une méthodologie de programmation dans le cadre de la robotique autonome. Pour cela, on s'intéresse plus particulièrement à la problématique de l'ancrage symbolique des termes dans lesquels le robot est programmé [36]. Ce travail se concrétise par des expérimentations sur un système sensori-moteur simple en utilisant le calcul des probabilités [24, 23, 16].

3.2 Planification et modèles physiques

3.2.1 Le système *Robot Φ*

Participants : Ammar Joukhadar, Dominique Casanova, Nicolas Mouly, Christian Laugier, Christian Bard

Les simulations de déformation d'objets utilisant un modèle physique remontent déjà à plusieurs années. Pour ce qui est de l'application de tels modèles à la robotique proprement dite, les développements sont beaucoup plus récents. Le système de modélisation physique *Robot Φ* [11, 43] en fait partie. Ce système intègre de nouveaux concepts, plus appropriés aux problèmes rencontrés en robotique (modélisation d'objets - calcul du mouvement des particules). Il a été développé durant les années 1993, 1994 pour permettre de prendre en compte des interactions complexes entre les robots et leurs environnements.

Ces interactions peuvent fortement modifier le comportement du robot

et donc la probabilité de succès d'une tâche. C'est notamment le cas lorsqu'on manipule un objet rigide ou déformable avec une main articulée [9, 8, 3], ou encore lorsqu'on planifie le mouvement d'un véhicule sur un terrain accidenté [32]. Ce nouveau système permet donc de modéliser des objets rigides et articulés (robots) afin d'en déterminer le comportement (mouvement, déformation, interaction) face à des forces extérieures. *Robot Φ* n'est pas seulement un système de modélisation. Il sert aussi de générateur de comportement et peut être utilisé dans le domaine de la réalité virtuelle.

Représentation. Un objet physique est une agglomération de masses ponctuelles, appelées "particules", reliées entre elles par des connecteurs visco-élastiques dont le rôle est de maintenir les distances relatives entre les particules afin que l'objet conserve sa forme. Il y a trois types de connecteurs : le connecteur linéaire uni-dimensionnel *LS*, le connecteur angulaire bi-dimensionnel *TS*, et le connecteur articulaire tri-dimensionnel *JS*.

La forme générale de la force engendrée par ces connecteurs est $F = \lambda x - \mu \dot{x}$, où λ représente la rigidité de l'objet simulé, tandis que μ représente la dissipation de l'énergie due à l'interaction entre les particules qui constituent l'objet. Ces connecteurs forment une base à partir de laquelle on peut construire d'autres types de connecteurs comme par exemple les articulations prismatiques ou rotoïdes d'un robot. Les figures 3 et 4 montrent deux applications utilisées dans le domaine de la robotique.



Figure 3 : La main de Salisbury

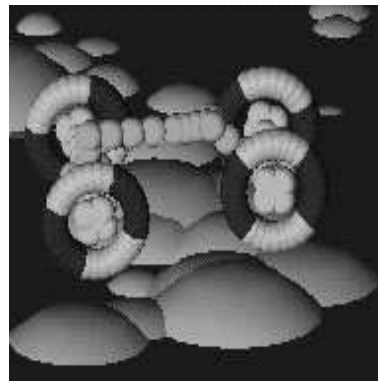


Figure 4 : Le véhicule tout terrain

Les mouvements et déformations d'un objet sont le résultat des mouvements des particules élémentaires de l'objet en appliquant la loi générale de la dynamique $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ sur chaque particule (en parallèle).

Le temps nécessaire pour passer de la position à l'instant t (\vec{P}_t) d'un objet à sa position à l'instant $t + \tau$ est de complexité linéaire en $O(n)$, où n est le nombre de particules d'un objet. L'erreur de position est de l'ordre de $O(\gamma)$. Pour éviter la divergence numérique quand la fréquence de la fonction \vec{P}_t est trop élevée, nous avons développé un algorithme basé sur deux notions : le pas de temps adaptatif et la conservation de l'énergie mécanique du système [10]. Cette approche consiste à choisir à chaque itération une valeur du pas de temps telle que la loi de la conservation de l'énergie mécanique soit respectée. Elle permet d'obtenir un gain de l'ordre du rapport entre la plus haute fréquence de la fonction \vec{P}_t et sa fréquence moyenne.

Le système *RobotΦ* prend en compte trois types d'interaction physique : la collision, le frottement (statique et cinétique) et la viscosité. Un algorithme basé sur une représentation hiérarchique d'un objet [11] nous permet d'atteindre une complexité de $O(n)$ pour retrouver les paires de particules qui sont en collision. Ce système est utilisé pour réaliser plusieurs applications: la saisie d'un objet par une main articulée [9], l'exécution de tâches de manipulation en milieu hostile à l'aide d'un système de téléprogrammation et, dans le domaine de la biomécanique, la représentation de ligaments³.

Modélisation d'environnements. Le système *RobotΦ* permet la simulation dynamique de tâches robotiques. Pour cela il faut savoir modéliser précisément le robot (articulations, éléments moteurs,...) et pouvoir générer des environnements de simulation réalistes. La modélisation des éléments constitutifs d'un robot requiert une grande compétence : elle est pour l'instant laissée aux soins d'un utilisateur averti. La modélisation de l'environnement du robot (par exemple le terrain sur lequel doit évoluer un véhicule) peut, dans la mesure où on ne cherche pas à représenter des particularités physiques précises, être réalisée automatiquement à partir d'une description géométrique et de certaines caractéristiques physiques (masse, élasticité,...).

Le coût de l'animation d'une scène dépendant du nombre de connecteurs utilisés (ce nombre varie en général linéairement avec le nombre de par-

³En coopération avec TIMC

ticules), il est important d'utiliser des représentations compactes des objets lors de la modélisation d'environnements [22]. Pour cela chaque objet est divisé en deux parties :

Un *épiderme*, constitué d'un ensemble de particules identiques uniformément réparties à la surface de l'objet, qui joue le rôle d'interface avec le robot. Il permet la détermination des forces de collision, frottement et viscosité. Les forces de frottement s'exerçant à la surface de l'objet, le rayon de ces particules doit être petit devant les dimensions de l'objet.

Un *derme*, constitué de particules situées à l'intérieur de l'objet. Les mouvements et déformations de l'objet reposent principalement sur ces particules, dont on cherche à minimiser le nombre. Pour la modélisation d'un objet peu déformable le derme est constitué de particules reposant sur le squelette de l'objet. Ces particules sont reliées par des connecteurs en un réseau quasi-rigide et jouent le rôle d'une charpente pour l'épiderme. Pour la modélisation d'objets plus fortement déformables, le derme est constitué de particules identiques distribuées uniformément dans le volume de l'objet et interconnectées en un réseau respectant les relations de voisinage. Le rayon de ces particules (et donc leur nombre) dépend de l'importance de la déformabilité de l'objet.

Des algorithmes permettant la détermination du derme et de l'épiderme d'un objet, et d'un réseau de connexion adapté, ont été développés en relation avec le système *Robot Φ* . Ces algorithmes permettent, à travers la spécification de certaines données par l'opérateur et la validation des solutions proposées, de générer (semi-)automatiquement un modèle physique d'un objet à partir d'une description de sa surface par un ensemble de points 3D [21].

L'identification des paramètres d'un modèle. Ce problème se définit simplement : déterminer, à partir de mesures sensorielles faites sur un objet réel, les paramètres de déformation, d'élasticité du modèle physique représentant l'objet en question. Il s'agit d'un problème ouvert. L'approche que nous avons choisie consiste en une procédure indépendante de la formulation du calcul du mouvement des particules du modèle. Cette procédure ne confronte que des informations, soit issues de mesures sur l'objet réel, soit provenant du simulateur (positions et vitesses des particules du modèle). La procédure d'identification est basée sur un schéma d'optimisation classique (figure 5) dans lequel les

variables \mathbf{F}_c , \mathbf{P}_c représentent respectivement la force d'interaction mesurée pour une position de contact donnée sur l'objet réel. Les distances D_{ij} définissent les distances d'interpénétration entre les objets modélisés i et j .

à l'heure actuelle les recherches investies n'ont pas apportés de résultats probants. La procédure d'identification permet de déterminer certains paramètres comme les raideurs des fonctions d'interaction entre objets, mais elle ne permet pas encore, de manière robuste, de définir la raideur des liaisons visco-élastiques du modèle physique de l'objet. La convergence de la procédure dépend fortement des conditions initiales du modèle à identifier.

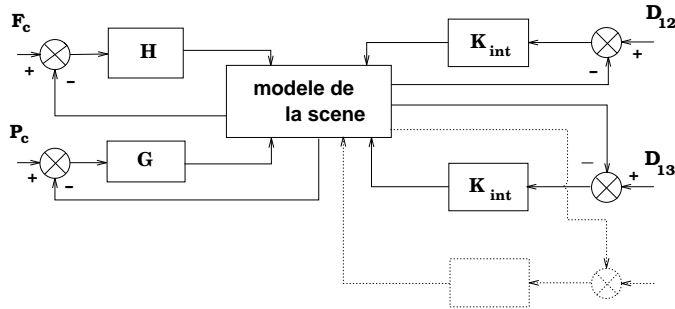


Figure 5 : Schéma d'optimisation utilisé par la procédure d'identification des paramètres d'un modèle physique. \mathbf{F}_c , \mathbf{P}_c correspondent respectivement à la force d'interaction mesurée pour une position de contact sur l'objet réel. D_{ij} représente la distance d'interpénétration des objets modélisés i et j de la scène.

3.2.2 Planification de mouvements pour véhicules tout-terrain

Participants: Moëz Cherif, Anton Deguet, Christian Laugier, Annie Luciani, Christine Milési-Bellier

Les premiers travaux concernant les aspects dynamiques du mouvement de systèmes robotiques articulés tout terrain ont débuté en 1990 par une collaboration avec l'équipe Acroe du Lifa [40]. Ils ont été focalisés dans un premier temps sur les aspects modélisation et simulation physiques et ont conduit notamment aux premiers résultats dans le cadre du projet Risp-Vap (cf. rapport 1993).

Planification de mouvements pour un véhicule articulé à roues.

Depuis deux ans, les études sur la modélisation et la simulation physiques ont naturellement conduit au développement d'une approche pour la planification de mouvements exécutables pour véhicules articulés à roues évoluant dans des environnements physiquement contraignants [18][19]. L'idée principale d'une telle approche consiste à appliquer un processus itératifs à deux niveaux (appelé "explore/déplace") combinant deux types de modèles et de raisonnement complémentaires prenant en compte les aspects aussi bien géométriques que cinématiques et dynamiques correspondant aux tâches à exécuter. Il s'agit de combiner une stratégie de recherche de graphe opérant dans l'espace des configurations du robot et une technique de génération de mouvements dynamiques continus.

Partant d'une configuration courante du robot $q_{courante}$, le niveau "explore" (qui est purement géométrique) a pour rôle de générer un ensemble de configurations intermédiaires à atteindre par le robot et constituant des points de passage potentiels situés dans le voisinage de la solution globale Γ reliant les configurations initiale q_{start} et finale q_{goal} . La recherche de ces points de passage est basée sur une formulation du problème dans l'espace des configurations et prend en compte les contraintes de non-collision et de non-holonomie définies sur le robot. Une fois la meilleure configuration intermédiaire sélectionnée, le deuxième niveau (fonction "déplace") est appliqué afin de vérifier l'atteignabilité effective d'une telle configuration partant de $q_{courante}$. Cela est effectué localement par le biais d'une technique de planification de trajectoires et de contrôle des mouvements du robot basée sur l'utilisation des modèles physiques de la tâche (robot, terrain et leurs interactions) [41]. Le problème est alors formulé dans l'espace des états du véhicule afin de tenir compte de divers facteurs et contraintes cinématiques et dynamiques. Dans le cas où une trajectoire n'existe pas, une autre configuration intermédiaire est considérée et validée par le niveau physique. L'algorithme est alors itéré en alternant les deux niveaux de planifications jusqu'à la convergence vers la configuration finale q_{goal} . Un tel processus est illustré par la figure 6. La figure 7 présente une solution produite par le système.

Génération de mouvements pour un robot à pattes. Dans le cadre du projet de coopération CNRS/Académie des Sciences de Russie (ASR) sur la robotique en environnement hostile, nous avons mené cette

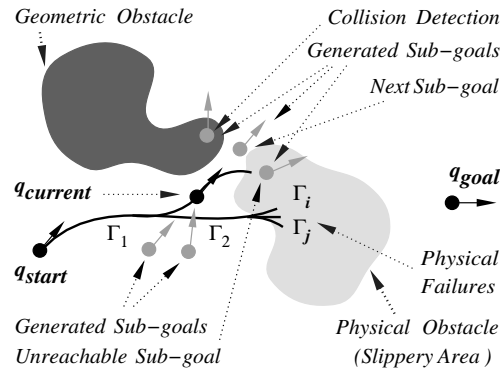


Figure 6 : Schéma général de la méthode de planification “explorer/déplacer”.

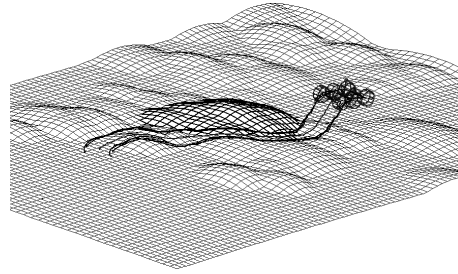


Figure 7 : évitement des zones glissantes et/ou physiquement contraignantes (région sombre).

année une étude préliminaire portant sur l’adaptabilité de la méthode des contraintes (méthode de génération de trajectoires du système Act déjà utilisée l’année dernière pour produire des mouvements pour un véhicule tout-terrain) au cas de la locomotion à pattes. Nous nous sommes concentrés sur les démarches statiques dans la mesure où le robot Marsha, conçu par L’Institut de Mécanique de l’Université de Moscou est un hexapode.

Nous avons dans un premier temps réalisé un ensemble de simulations sur un modèle purement géométrique sous Act. Ceci a permis de tester les choix de synchronisation des pattes ainsi que les stratégies de pose et de palpation basées uniquement sur les contacts. Les notions de forces (poids, frottements) ont ensuite été introduites pour tester les stratégies de maintien d’assiette et aborder les problèmes liés aux démarches dy-

namiques (frottements, inertie). Ces forces sont définies par des tâches. A chaque tâche correspond une valeur (distance du pied au point de contact, altitude du centre de gravité et distance articulaire au but) qui est minimisée grâce à la méthode des contraintes implantée sous Act. Les poids attribués à chaque tâche permettent de définir les forces appliquées. Un ensemble de routine permet de modifier les buts et poids au cours du mouvement pour maintenir les articulations commandées en position. Nous pensons utiliser ensuite le modèle *Robot Φ* pour obtenir une quantification plus précise des forces et des interactions pattes/sol.

3.3 Autonomie des véhicules

Participants : Gérard Baille, Thierry Fraichard, Philippe Garnier, Mouna Hassoun, Christian Laugier, Alexis Scheuer

Nos travaux de recherche sur ce sujet ont deux applications support liées à la circulation automobile dans un sous-ensemble du réseau routier : le projet Eurêka EU-153 Prométhéus et le projet Inria/Inrets Praxitèle. L'objectif du projet Prométhéus est le développement d'un système d'aide à la conduite dans le but d'accroître la sécurité routière. Le but du projet Praxitèle étant l'élaboration d'un système de transport urbain individuel utilisant des véhicules électriques qui peuvent être pilotés manuellement (milieu urbain) ou de manière autonome (voies propres ou parkings haute densité).

Le problème abordé ici est celui de l'autonomie de mouvement pour un (des) robot(s) plongé(s) dans un espace de travail qui comporte des obstacles fixes et mobiles (autres robots ou obstacles imprévus). L'aspect dynamique de l'espace de travail conduit à prendre en compte la dimension temporelle du problème que ce soit au niveau de la *planification de mouvement* ou à celui du *contrôle d'exécution* du mouvement planifié. La planification a pour rôle de produire une trajectoire nominale, i.e. une fonction continue du temps qui spécifie, à chaque instant, la position/vitesse du robot. Cette trajectoire est produite sur la base d'une estimation de l'évolution probable de l'environnement (obstacles mobiles en particulier) au cours du prochain intervalle de temps considéré. Cette prévision pouvant s'avérer incorrecte, il est nécessaire de doter le véhicule de capacités réactives qui lui permettent de réagir aux événements imprévus lors de l'exécution de la trajectoire nominale fournie par le planificateur : c'est le rôle du "contrôleur d'exécution".

Un troisième niveau, le “générateur de missions” a été introduit, cette année afin de pouvoir prendre en compte l’aspect “mission” présent dans l’application Praxitèle.

Planificateur. La tâche du planificateur est de fournir une trajectoire nominale au véhicule. Cette trajectoire est composée d’un chemin géométrique et d’un profil de vitesse associé. Au cours des deux années précédentes, nous avons développé, dans le cadre du projet Prométhéeus, un planificateur de trajectoire basé sur cette décomposition chemin-vitesse. Cependant, le chemin choisi peut se révéler inutilisable lors de la recherche d’un profil de vitesse approprié. Ceci peut en particulier se produire lorsque l’environnement est très contraint suite à la présence de nombreux véhicules (ce qui peut être le cas dans un parking haute densité du projet Praxitèle). Il faut alors invalider ce chemin et recommencer la totalité de la planification avec cette approche initiale. Pour éviter ce problème, nous avons conçu en 1994 une généralisation de la méthode [25] : la recherche d’un profil de vitesse ne se fait plus seulement le long d’un chemin prédéterminé, mais dans tous l’espace de travail. L’algorithme de recherche utilisé dans la version précédente (de type A* sur le graphe associé à une discrétisation de l’espace “état-temps”) n’étant pas assez rapide pour une telle exploration de l’espace de recherche, nous devons trouver une nouvelle technique mieux appropriée à la nouvelle formulation du problème (et à sa complexité algorithmique). C’est pourquoi nous envisageons d’utiliser pour cela une technique de type optimisation combinatoire (et en particulier l’algorithme “Fil d’Ariane” développé dans l’équipe). Ce travail sera poursuivi en 1995, de manière à pouvoir tester la validité de l’approche sur une base simulée dans un premier temps.

Contrôleur d’exécution. Le rôle du contrôleur d’exécution est de surveiller l’exécution par le robot de la trajectoire nominale produite par le planificateur, et d’adapter (en temps réel) les mouvements du véhicule de manière à prendre en compte les événements imprévus. Au cours des deux dernières années, nous avons développé une architecture intégrant le planificateur et le contrôleur d’exécution [4]. Le contrôleur d’exécution est composé principalement d’un module symbolique (le pilote) chargé d’adapter la trajectoire nominale et d’un module numérique (l’exécuteur) chargé de générer les commandes (en accélération) nécessaires pour exécuter la trajectoire corrigée. L’exécuteur est basé sur le

concept de champ de potentiels fictifs dans lequel le robot est attiré par son but (potentiel attractif) et répulsé par les obstacles (potentiel répulsif). La combinaison de ces potentiels nous donne une fonction globale à minimiser. Un des problèmes relatifs à cette approche est l'aspect empirique de la combinaison des différents potentiels que comporte la fonction de potentiel globale. Une solution possible à ce problème consiste à réaliser un apprentissage utilisant des réseaux de neurones pour déterminer ces paramètres. De premiers résultats intéressants ont été obtenus dans le cadre d'un DEA en collaboration avec l'équipe de réseaux neuronaux du Lifa [48]. Un autre problème de cette approche initiale réside dans la prise en compte de l'aspect "coopératif" associé à un environnement multi-véhicules dense, comme cela se produit dans le cadre de l'application Praxitèle. En 1994, nous avons donc développé une extension de l'approche précédente [44], afin de pouvoir prendre en compte ces nouvelles contraintes. La méthode développée est inspirée du travail de Karim Zeghal sur la coordination d'action, travail qui fait apparaître la nécessité d'introduire des forces dites de "glissement" qui conduisent à glisser sur les lignes équipotentielles (et ainsi à engendrer des mouvements de contournements). Cette approche permet potentiellement d'éviter des situations de blocage dynamique (cf figure 8). La figure 9 montre un exemple d'évitement coordonné, obtenu dans le cas de quatre véhicules dont les trajectoires se coupent en un même point (situation de type carrefour) [44].

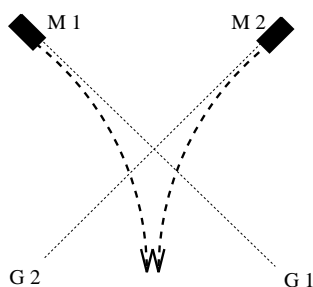


Figure 8 : Situation de blocage dynamique : M1 cherche à aller en G1 et M2 en G2. La stratégie d'évitement de collision utilisée repose uniquement sur les forces attractives et répulsives (i.e. approche classique).

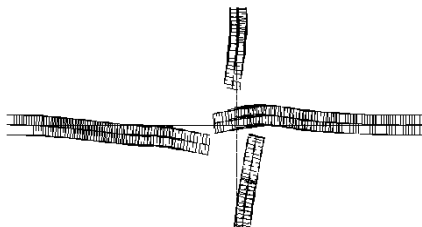


Figure 9 : évitement automatique de quatre véhicules convergeant simultanément vers un même point.

Gestionnaire de mission. Le gestionnaire de mission a comme rôle d’assigner un but (i.e. un emplacement de parking dans l’application Praxitèle) au véhicule contrôlé. L’environnement est alors représenté de manière fonctionnelle, et le système central (gestionnaire du parking en l’occurrence) doit analyser la situation courante afin d’assigner une mission au véhicule demandeur (voir figure 10 pour les zones considérées dans le parking). Dans sa forme minimale, une mission peut se ramener à une consigne du type “aller en (x, y, θ) ”, où (x, y, θ) représente une configuration du véhicule (la génération de la trajectoire nécessaire et l’exécution réactive de cette trajectoire est alors prise en charge par l’architecture de contrôle présentée précédemment).

Pour un véhicule donné, il est possible de représenter l’évolution possible de celui-ci dans le parking par un graphe d’états (figure 10). Il est à noter que ce graphe est non déterministe et s’appuie sur la notion de “force de transition”. Cela signifie que les transitions du graphe vont être pondérées par des “forces” qui déterminent l’aptitude du véhicule à franchir ces transitions. Le générateur de missions a pour rôle de déterminer ces “forces” de transition en fonction d’un certain nombre d’informations sur le véhicule (niveau de charge, distance parcourue par rapport à la moyenne de la flotte, zone courante, ...) et d’informations plus générales (moment de la journée caractérisant l’offre et la demande, taux de remplissage des diverses zones du parking, ...). Afin de réaliser la correspondance entre informations et forces de transitions du graphe, nous avons opté pour une approche basée sur l’utilisation de la logique floue (agrégation multi-critères), avec la mise au point d’une méthode d’apprentissage paramétrique supervisé basée sur la méthode du simplexe [26]. Dans le but de valider notre gestionnaire de missions, nous

avons développé un simulateur communiquant avec notre système flou par un mécanisme de boîte aux lettres (files de messages).

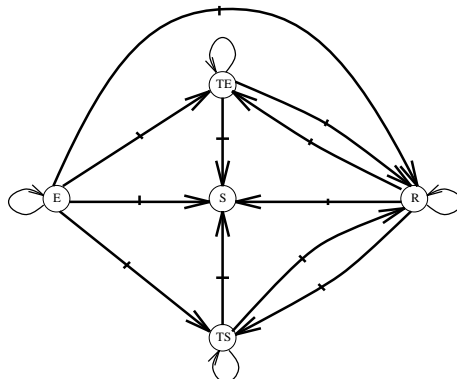


Figure 10 : Graphe d'états associé au parking pour un véhicule. états (Zones) possibles : E = Entrée, S = Sortie, TE = Tampon d'Entrée, TS = Tampon de Sortie, R = Recharge.

Applications. Comme cela a déjà été mentionné, les applications considérées sont celles de l'assistance à la conduite (démonstrateur français ProLab II dans le cadre du projet Prométhéus) et de l'autonomie des déplacements d'une flotte de petits véhicules électriques (projet Praxitèle). Un système d'aide à la conduite a été réalisé et testé sur la voiture expérimentale ProlabII (Peugeot 605). Le démonstrateur a été présenté lors de la manifestation européenne BMM (Board Members Meeting) à Paris en octobre 1994. La partie décisionnelle de ce projet (qui a comme objectif la génération des alarmes, conseils et suggestion de manoeuvres au conducteur) a été développée conjointement avec le laboratoire Heu-Diasyc de Compiègne. Dans un premier temps, nous avons implanté nos algorithmes sur la planification et le contrôle d'exécution sur une carte Motorola VME 167 et sous le noyau temps réel VxWorks (travaux de 1993 et du début de 1994). Nous avons ensuite intégré ce module avec les autres modules de la fonction de décision dans l'architecture embarquée de ProlabII [28, 30].

En ce qui concerne le véhicule expérimental de Praxitèle (véhicule Ligier équipé par la société Scholl et par la société Aleph Technologies), nous prévoyons de commencer à tester notre architecture de planification/contrôle en 1995.

4 Actions industrielles

Trois sociétés industrielles ont été créées dans la période 1982-1989 par des chercheurs de l'équipe : ITMI, Getris Images, et Aleph Technologies (cette dernière a le statut de "start-up Inria"). Deux transferts technologiques importants ont ainsi été réalisés au cours de cette période : le langage LM pour la programmation des robots, et le système Act de CAO-Robotique. Ce dernier transfert a été réalisé avec la participation de B. Faverjon du projet Prisme de l'Inria Sophia-Antipolis.

Nous entretenons toujours des relations étroites avec la société Aleph Technologies. Ces relations se traduisent essentiellement par des bourses, des contrats de recherche communs, et une activité de conseil scientifique.

Nous avons également des contrats ou des accords de recherche avec PSA, le Cnes, et le groupement d'industriels du projet Praxitèle.

Par ailleurs, la main articulée que nous utilisons pour la manipulation dextre est actuellement contrôlée par un prototype du système ORCCAD, objet d'une collaboration Inria/CMA/Aleph Technologies. Ce système est également utilisé sur le véhicule électrique Praxitèle.

5 Actions nationales et internationales

L'équipe participe depuis plusieurs années à des *projets nationaux* tels que le PRC Intelligence Artificielle. Elle participe également à un projet national inter-PRC impliquant des équipes du PRC-IA et du PRC-CHM. L'équipe fait aussi partie du Groupement Scientifique Risp (Robotique d'Intervention sur Site Planétaire) constitué par le CEA, le CNRS, l'Inria et l'Onera avec la participation du Cnes. Elle entretient par ailleurs des relations contractuelles suivies avec la Dret, et elle participe au projet national Inria/Inrets Praxitèle.

L'équipe participe aussi à des projets *Européens* : projet Eurêka Prométhéus, projet Esprit3-Bra Second, Réseau CHM Heros. Elle entretient de plus des relations suivies (séjours, échanges divers et rencontres) avec des laboratoires de recherche hors du cadre de la Communauté Européenne : Laboratoire d'Intelligence Artificielle du MIT (USA), Laboratoire de Robotique de l'Université de Stanford (USA), Electrotechnical Laboratory (Japon), et Université de Carnegie Mellon (USA). L'équipe participe à

un contrat de coopération entre le CNRS et l'Académie des Sciences de Russie ASR.

Christian Laugier est coordinateur du Réseau Européen Heros, responsable du groupe “Raisonnement géométrique pour le mouvement dans le monde physique” du PRC-IA, co-responsable avec Roger Mohr du projet inter-PRC “Perception et raisonnement géométrique pour le mouvement dans le monde réel”, membre du bureau du PRC-IA, et membre du comité de rédaction de la Revue d'Intelligence Artificielle.

Conférences invités.

- Congrès 1994 de l'Association des Ingénieurs de l'INPG, Houille blanche (Grenoble, France)
- Workshop Industrial Vision Autonomous Robots, IVAR'94 (Louvain, Belgique)
- Automation'94 (Taipe, Taiwan)
- Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, WAFR (San Francisco, USA)

Organisation de conférences ou participation à des comités de programmes.

- *Participation à des comités de programme de conférences* : Christian Laugier a participé aux comités de programmes suivants : IRS 94 (Grenoble, 1994), IROS'94 (Munich, 1994), Intelligent Vehicle 94 (Paris, 1994), 27th ISATA (1994). Emmanuel Mazer a participé au comité de programme de “From Perception to Action” (Lausanne, 1994).
- *Participation aux comités de rédaction de revues scientifiques* : Revue d'Intelligence Artificielle (Christian Laugier).
- *Participation à des expositions* : démonstrations et vidéos présentées sur le hall d'exposition de TEC'94.
- *Organisation de colloques et de sessions spéciales dans des conférences* : IROS'94 (Munich, 1994), IEEE Robotics and Automation (San Diego, 1994).

6 Diffusion des résultats

6.1 Enseignement

6.1.1 Enseignement universitaire

Les membres de l'équipe participent aux principaux enseignements universitaires suivants dans le domaine de la robotique :

- Cours sur les *Techniques de base de la robotique* en 3ème année de l'Ensimag et en DEA d'Informatique de l'INPG. Ce cours est également suivi par les étudiants de l'Année Spéciale Intelligence Artificielle de l'Ensimag. *Enseignant : Christian Laugier.*
- Travaux dirigés sur la *Programmation des Robots* en 3ème année de l'Ensimag et en DEA d'Informatique de l'INPG. *Enseignants : Christian Bard et Gérard Baille.*
- Cours sur les *Systèmes décisionnels en Robotique* en DEA d'Informatique de l'INPG. *Enseignant : Christian Laugier.*
- Cours de *Robotique mobile* en Génie Robotique et Productique de l'INSTN. *Enseignant : Christian Laugier.*
- Cours de *Robotique* en valeur "C" du Cnam. *Enseignants : Christian Laugier et Jocelyne Troccaz.*

6.1.2 Jurys de thèses

Christian Laugier et Emmanuel Mazer participent à des jurys de thèses de l'Institut National Polytechnique de Grenoble et de l'Université Joseph Fourier. En 1994, ils ont également participé à des jurys de thèses (membres et/ou rapporteurs) à Montpellier, Toulouse, Sophia-Antipolis, Poitiers, et Paris-6.

6.2 Participation à des conférences et colloques

La diffusion des résultats et la participation active à des manifestations scientifiques internationales représentent deux aspects essentiels de l'activité du projet.

7 Publications

Thèses

- [1] J.-M. AHUACTZIN, *Le fil d'Ariane : Une méthode de planification générale. Application à la planification automatique de trajectoires*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, septembre 1994.
- [2] O. AL-CHAMI, *Contribution à l'intégration Robotique/Vision en Manipulation Automatisée: Modélisation de la Tâche, Placement d'une Caméra Mobile et Localisation Fine d'Objet*, thèse de doctorat, LIFIA Institut IMAG, Grenoble, novembre 1994.
- [3] C. BARD, *Interaction sensori-motrice en Robotique : application à la préhension automatisée pour une main articulée à plusieurs doigts*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, septembre 1994.
- [4] M. HASSOUN, *Thèse de doctorat à paraître*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1994.

Articles et chapitres de livre

- [5] C. BARD, C. LAUGIER, C. MILÉSI-BELLIER, J. TROCCAZ, B. TRIGGS, G. VERCELLI, «Achieving dextrous grasping by integrating planning and vision based sensing», *International Journal of Robotics Research*, 1994, à paraître.
- [6] F. D. LA ROSA, J. NÁJERA, C. LAUGIER, «Planning Motion Strategies in the Contact Space under Geometric Uncertainty Constraints», *Revue d'Intelligence Artificielle RIA*, 1994, à paraître dans le numéro 3.
- [7] C. LAUGIER, S. JIMENEZ, A. LUCIANI, «Simulating Physical Interactions Between an Articulated Mobile Vehicle and a Terrain», *in: Robotics and Autonomous Systems*, 11, 2, Elsevier, 1994, ch. Special Issue on Telerobotics, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [8] A. JOUKHADAR, C. BARD, C. LAUGIER, «Combining geometric and physical models: the case of a dextrous hand.», *in: Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Munich, Germany, septembre 1994.
- [9] A. JOUKHADAR, C. BARD, C. LAUGIER, «Planning Dextrous Operations using physical Models.», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Diego, USA, mai 1994.

- [10] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Dynamic modeling of rigid and deformable objects for robotic task: motions, deformations, and collisions.», *in: International Conference ORIA*, Marseille, France, décembre 1994.
- [11] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «*Robot Φ* : A physical modeling system for robotic applications.», *in: Japan-France congress on MECHATRONICS*, Takamatsu, Kagawa, Japan, novembre 1994.
- [12] O. AL-CHAMI, C. LAUGIER, «Stratégie Perceptive pour Positionner une Caméra», *in: Proc. AFCET Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, 1*, p. 617-22, 1994.
- [13] R. BALANIUCK, P. BESSIÈRE, E. MAZER, «Shape: A method for surface Previson», *in: XI Brazilian Symposium On Artificial Intelligence*, Fortaleza, Brazil, octobre 1994.
- [14] C. BARD, C. LAUGIER, C. MILÉSI-BELLIER, «An integrated approach to achieve dextrous grasping from task level specification», Munik, Germany, septembre 1994.
- [15] P. BESSIÈRE, J. AHUACTZIN, E. TALBI, E. MAZER, «Planning in Continuous Spaces», *in: Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, San Francisco, Usa, février 1994.
- [16] P. BESSIÈRE, E. DEDIEU, E. MAZER, «Representing robot/environnement interactions using probabilities : the Beam in the Bin experiment», *in: Perac'94*, Lausanne, septembre 1994.
- [17] P. BESSIÈRE, E. MAZER, J. AHUACTZIN, «Planning in a continuous space with forbidden regions : The "Ariadne's clew" algorithm», *in: Geometric Reasoning about Mechanical Assembly, The First Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, A.K. Peters, Boston, MA (USA), 1994.
- [18] M. CHERIF, C. LAUGIER, C. MILÉSI-BELLIER, B. FAVERJON, «Planning the Motions of an All-Terrain Vehicle by Using Geometric and Physical Models», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, p. 2050-2056, San Diego, CA (USA), mai 1994.
- [19] M. CHERIF, C. LAUGIER, «Dealing with Vehicle/Terrain Interactions when Planning the Motions of a Rover», *in: Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Munich, Germany, septembre 1994.
- [20] M. CHERIF, «Coping with Robot/Environment Interactions for Solving Off-Road Vehicle Motion Planning», *in: IFIP TC 5 WG 5.10 Workshop on Virtual Environment*, Coimbra, Portugal, octobre 1994.
- [21] D. CASANOVA, C. LAUGIER, «Generating environments for a physical simulation of robotic tasks», *in: International Conference ORIA*, Marseille, France, décembre 1994.

- [22] D. CASANOVA, C. LAUGIER, « Modeling physical objects for the dynamic simulation of robotic tasks », *in : Japan-France congress on Mechatronics*, Takamatsu, Kagawa, Japan, novembre 1994.
- [23] E. DEDIEU, P. BESSIERE, « La caractérisation sensorielle des comportements », *in : Actes des journées neurosciences et sciences pour l'ingénieur NSI'94*, Chamonix, mai 1994.
- [24] E. DEDIEU, E. MAZER, P. BESSIERE, « La modélisation sensorielle: une approche originale de la notion de représentation dans la programmation des robots », *in : Actes des journées de Rochebrune*, Telecom Paris, Megève, janvier 1994.
- [25] T. FRAICHARD, A. SCHEUER, « Car-Like Robots and Moving Obstacles », *in : Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1*, p. 64-69, San Diego, CA (USA), mai 1994.
- [26] P. GARNIER, « Apprentissage d'une base de règles floues par la méthode du simplexe », *in : Les Applications des Ensembles Flous - Quatrième Journées Nationales*, Lille, décembre 1994.
- [27] P. GARNIER, « Apprentissage d'une base de règles floues par la méthode du simplexe : application à un gestionnaire de missions », *in : Secondes Rencontres Nationales des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle*, Marseille, septembre 1994.
- [28] M. HASSOUN, C. LAUGIER, D. MEIZEL, N. L. FORT, « An assistance system for diagnosis and monitoring of driving manoeuvres », *in : IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics And Neural Networks*, Lille, France, avril 25-27 1994.
- [29] R. HORAUD, C. LAUGIER, C. BARD, B. TRIGGS, AL., « Integrating Planning, vision and visual servoing for automatic grasping », Technology Transfer Workkshop on Industrial Vision Autonomous Robots Medical Imaging, IVAR 94, Leuven, Belgium, 9-10 juin 1994.
- [30] O. KHALED, N. FORT, M. HASSOUN, C. LAUGIER, « Real-time decision system for the Prolab II demonstrator », *in : Proc. of the IEEE Symposium on Intelligent Vehicles*, Paris, France, octobre 24-26 1994.
- [31] F. D. LA ROSA, J. NÁJERA, C. LAUGIER., « Planning Robot Motion Strategies under Geometric Uncertainty Constraints », *in : International Symposium on Intelligent Robotic Systems '94*, p. 37-44, Grenoble, France, juillet 1994.
- [32] C. LAUGIER, C. BARD, M. CHERIF, A. JOUKHADAR, « Solving complex motion planning problems by combining geometric and physical models: the cases of a rover and of a dextrous hand », *in : Workshop on The Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, San Francisco, CA (USA), février 1994.

- [33] C. LAUGIER, E. MAZER, «Recherche et Développement en Robotique non Manufacturière», Congrès 1994 de l'Association des Ingénieurs de l'INPG (Houille Blanche), Grenoble, France, 14-17 avril 1994. Conférence invité sans actes.
- [34] C. LAUGIER, «Integrating Fine Motion Planning with Compliant Motion Control», Technology Transfer Workshop on Industrial Vision Autonomous Robots Medical Imaging, IVAR 94, Leuven, Belgium, 9-10 juin 1994.
- [35] C. LAUGIER, «Solving complex task-level programming problems in robotics using physical modeling», *in: Automation'94*, Taipei, Taiwan R.O.C, July 6-9 1994. Conférence invité.
- [36] O. LEBELTEL, P. BESSIÈRE, E. MAZER, «La poubelle lumineuse : Expérience de modélisation quantitative des interactions fonctionnelles sensori-motrices», *in: Actes des journées de Rochebrune*, Telecom Paris, Megève, janvier 1994.
- [37] A. MUNOZ, C. BARD, J. NÁJERA, «Dexterous Manipulation: A Geometrical Reasoning Point of View», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1995. Submitted to *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995.
- [38] J. NÁJERA, F. D. LA ROSA, C. LAUGIER, «Planning Robot Motion Strategies under Geometric Uncertainty Constraints», *in: International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, p. 462-469, Munich, Germany, september 1994.
- [39] B. TRIGGS, C. LAUGIER, «Automatic Camera Placement for Robot Vision», *in: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1995. Submitted to *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995.

Rapports de recherche et publications internes

- [40] M. CHERIF, C. LAUGIER, A. LUCIANI, «Projet SHARP: Opération Robotique Spatiale (Télé-présence)», *Rapport de fin de contrat, projet région rhône-alpes*, Grenoble (F), novembre 1994.
- [41] M. CHERIF, «Dynamic Motion Planning of Autonomous Off-Road Vehicles», *rapport de recherche*, Lifa & Inria-Rhône Alpes, Grenoble, France, octobre 1994.
- [42] A. DEGUET, *Générateur géométrique et cinématique des mouvements d'un robot à pattes évoluant sur un terrain accidenté*, Dea informatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, juin 1994.

- [43] A. JOUKHADAR, C. BARD, «Modélisation physique pour la planification de saisie avec une main articulée.», *Rapport de recherche INRIA n° RR-2247*, INRIA, avril 1994.
- [44] P. KELLER, *Planification/Contrôle d'exécution des mouvements d'un véhicule électrique dans un parking automatisé*, Dea informatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, juin 1994.
- [45] L. A. MUNOZ, *Spécification et Contrôle d'Exécution de Stratégies de Mouvements Fins d'Assemblage avec une Main Articulée*, Mémoire, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, juillet 1994.
- [46] J. NÁJERA, A. CHRISTIANSEN, «Automatic Acquisition of Control Parameters for Assembly Tasks», *rapport de recherche*, LIFIA & INRIA-Rhône Alpes, Grenoble, France, 1994, à paraître comme rapport de recherche Inria.
- [47] U. OF GRENOBLE, AL., «SECOND: SENSory CONTROLled Dextrous robots», *Intermediate report, year 2*, Projet Esprit3-Bra Second 6769, juin 1994.
- [48] D. PAULUS, O. TEYSSIER, *Réseaux neuronaux pour l'aide à la décision : Application à la conduite de véhicule*, Dea de science cognitives, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, juin 1994.

8 Abstract

The Sharp project aims to develop techniques for task-level programming and autonomy to allow robots to be applied to novel, incompletely specified and non-repetitive tasks. It may be difficult or impossible for the robot to call on human aid, or the system may be required to intelligently assist a human operator. The accent is on methods for planning and executing complex movements, dexterity and reactivity.

The Sharp project focus on the concepts of motion planning/control (including the aspect associated with dexterity) and reactivity. For that purpose, we simultaneously develop new methods and try to integrate and improve existing techniques when possible.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	3
3	Actions de recherche	4
3.1	Planification et CAO-Robotique	4
3.1.1	Stratégies perceptives pour placer une caméra . . .	4
3.1.2	Manipulation dextre autonome et intégration système	5
3.1.3	Incertitude géométrique et mouvement	7
3.1.4	Planification pour un grand nombre de degrés de liberté	10
3.1.5	Intégration perception/action et apprentissage . .	11
3.2	Planification et modèles physiques	11
3.2.1	Le système <i>RobotΦ</i>	11
3.2.2	Planification de mouvements pour véhicules tout-terrain	15
3.3	Autonomie des véhicules	18
4	Actions industrielles	23
5	Actions nationales et internationales	23
6	Diffusion des résultats	25
6.1	Enseignement	25
6.1.1	Enseignement universitaire	25
6.1.2	Jurys de thèses	25
6.2	Participation à des conférences et colloques	25
7	Publications	26
8	Abstract	30