

Projet SHARP

Programmation automatique et systèmes décisionnels en robotique

Localisation : *Grenoble*

Mots-clés : exécution de mouvement, interaction perception-action, planification de mouvement, programmation de niveau tâche, raisonnement géométrique, réactivité, simulation dynamique, téléprogrammation.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Christian Laugier, DR Inria

Secrétariat

Danièle Herzog, TR Inria

Personnel Inria

Gérard Baille, IR

Thierry Fraichard, CR

Personnel des établissements partenaires (UMR GRAVIR-Imag)

Emmanuel Mazer, CR CNRS

Ingénieurs experts Inria

Leszek Lisowski

Isabelle Mazon

Chercheur invité

Rafael Kelly, Professeur au CICESE¹ de Mexico (MX), du 20.09.96 au 20.12.96

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Chercheurs post-doctorants

Christian Bard, post-doctorat industriel Inria-Aleph Technologies jusqu'au 28.2.96
 Moëz Cherif, université Simon Fraser de Vancouver (CA), boursier CNRS depuis le 1.11.96
 Philippe Garnier, boursier Inria
 Alistair McLean, université d'Oxford (GB), boursier CHM jusqu'au 31.8.96
 Cyril Novales, université de Montpellier (FR), boursier Inria
 Igor Paromtchik, université de Minsk (BY), boursier Inria

Chercheurs doctorants

Rémis Balaniuk, bourse du Brésil (thèse soutenue en septembre 1996)
 Anton Deguet, bourse du Ministère de la Recherche
 Ammar Joukhadar, bourse de Syrie
 Fernando De La Rosa, bourse de Colombie (thèse soutenue en novembre 1996)
 Raphaël Mermond, bourse du Ministère de la Recherche
 Luis Alberto Muñoz, bourse du Mexique
 Didier Pallard, bourse du Ministère de la Recherche
 Dan Reznik, co-tutelle avec l'université de Berkeley (CA)
 Alexis Scheuer, allocataire moniteur normalien

2 Présentation du projet

Le projet SHARP est un projet de recherche commun entre le CNRS, l'INPG, l'UJF et l'Inria, localisé dans les locaux de l'UR Inria Rhône-Alpes et intégré dans le laboratoire GRAVIR de la fédération Imag, depuis décembre 1991.

Les objectifs de SHARP sont d'accroître les capacités décisionnelles des robots, et de faciliter leur mise en œuvre sur des tâches nouvelles, partiellement spécifiées, non répétitives, etc.

Les applications plus particulièrement visées par cette problématique sont celles de la robotique non manufacturière, *e.g.* maintenance d'équipements, intervention en milieu hostile ou médical, transport, etc. Ceci se traduit sur le plan scientifique par des travaux de recherche de nature fondamentale mais aussi plus appliquée :

- Sur le plan fondamental, notre objectif est de produire des savoir-faire nouveaux en matière de méthodologie et d'algorithmique pour le mouvement dans le monde réel. Ceci se traduit par une étude des problèmes liés à la **planification de mouvement** et à la **modélisation**. Dans les problèmes de planification, nous mettons l'accent sur une facette peu étudiée et pourtant essentielle pour la majorité des applications robotiques : la maîtrise de la complexité induite par les problèmes en vraie grandeur, et la prise en compte explicite des contraintes additionnelles qui dérivent de la nature physique du monde (incertitude, dynamique, évolutivité). Dans le domaine de la modélisation, nous cherchons à nous affranchir des méthodes classiques centrées sur la géométrie, afin de pouvoir raisonner sur des modèles mieux adaptés aux processus physiques que nous étudions.
- L'activité de recherche précédente est à la fois valorisée et fertilisée par des activités plus appliquées qui visent au développement de solutions robustes et efficaces à des problèmes industriels. On parle alors **d'intégration système**, *i.e.* des techniques nécessaires à l'intégration des fonctions de planification développées avec celles liées à la perception et au contrôle. Cette activité s'appuie sur des collaborations avec des industriels et avec des équipes compétentes en perception visuelle et en contrôle. Dans ce cadre, nous participons à la réalisation de prototypes dans le domaine des véhicules autonomes et dans celui des systèmes d'intervention robotisés.

3 Actions de recherche

3.1 Planification de mouvement

En matière de planification de mouvement, l'un de nos objectifs reste la maîtrise la complexité induite par des problèmes de planification en vraie grandeur. S'ajoute à cela notre volonté de prendre en compte de façon explicite des contraintes autres que les contraintes géométriques habituellement considérées, ceci, dans le but de produire des plans exécutables dans des environnements réels; ces contraintes découlant principalement de la nature physique du monde réel : évolutivité de l'environnement, incertitudes géométriques, cinématique et dynamique des systèmes considérés, contraintes perceptives.

3.1.1 Planification et environnements évolutifs

Participants : Isabelle Mazon, Alistair McLean

Il s'agit ici de développer une méthode globale de planification de mouvement capable d'intégrer la nature évolutive de l'environnement, *e.g.* l'ajout de dispositifs péri-robotiques ou bien l'acquisition en ligne des obstacles présents, et ce, en temps quasi-réel.

L'année passée notre travail a consisté à intégrer l'algorithme Fil d'Ariane² dans le système de CAO-robotique ACT de Aleph Technologies et à tester ses performances sur un environnement réaliste, en l'occurrence un générateur de vapeur de centrale nucléaire³. Cette année nous avons complété l'approche développée l'année passée permettant de mettre à jour la représentation après l'ajout d'un obstacle. Cette approche, consistant à projeter la représentation fournie par le Fil d'Ariane dans l'espace cartésien, est suffisante dans la plupart des cas [691]. Cependant, lorsque la connectivité du graphe est modifiée, il est nécessaire d'effectuer une replanification afin de rétablir cette connectivité. Cette replanification est effectuée en parallèle, en utilisant une technique de type *divide and conquer* combinant dichotomie et mouvements browniens. Cette technique permet de rétablir cette connectivité dans la plupart des cas en un temps raisonnable de l'ordre de quelques minutes [690, 692].

Ce travail été partiellement supporté par une bourse post-doctorale européenne de type CHM⁴.

3.1.2 Planification et incertitudes géométriques

Participants : Fernando De La Rosa, Christian Laugier, Raphaël Mermond

Pour certains types de tâche, *e.g.* tâches d'assemblage, navigation pour des robots mobiles, etc., la prise en compte des incertitudes géométriques est indispensable. Les chemins déterminés doivent être robustes, *i.e.* demeurer insensibles aux effets des incertitudes (incertitudes sur la position du robot ou des objets, sur le résultat d'une commande appliquée au robot, etc.). En 1995, nous avons développé une approche locale permettant de planifier les mouvements d'un robot holonome polygonal dans un environnement planaire parsemé d'obstacles polygonaux ; les incertitudes sur la position, l'orientation et les vitesses de déplacement du robot étant intégrées dans le processus de planification [678]. En 1996, nous avons étendu cette approche au cas d'un robot mobile et nous l'avons validée expérimentalement sur le robot mobile Hilare II du LAAS⁵ de Toulouse (Fig. 1). Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet inter-PRC VIA.

D'autre part, nous avons commencé à étendre cette approche pour un robot mobile polygonal non-holonome [702]. Un premier aspect traité est l'analyse de nouveaux modèles mieux adaptés à ce cas.

²Thèse de doctorat de J.M. Ahuactzin, septembre 1994.

³Modèle fourni par Electricité de France.

⁴Bourse institutionnelle et réseau HEROS et ERNET.

⁵Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du CNRS.

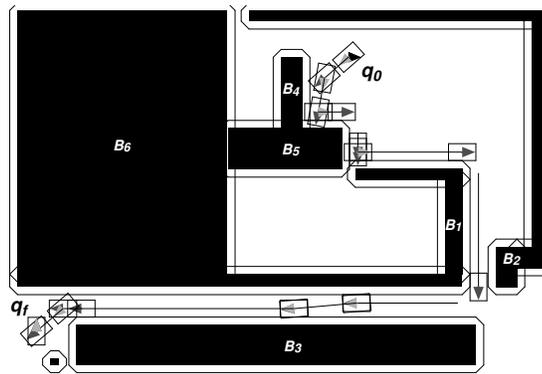


Figure 1: Un exemple de planification de chemin avec prise en compte d'incertitudes géométriques.

Ce travail sera poursuivi en 1997 par une amélioration des modèles déjà utilisés pour la gestion des incertitudes et des collisions.

3.1.3 Planification et contraintes cinématiques et dynamiques

Participants : Thierry Fraichard, Alexis Scheuer

La problématique de la planification de mouvement, lorsqu'elle concerne des véhicules de type voiture, s'enrichit de plusieurs facteurs. En effet, un tel véhicule est soumis à des contraintes cinématiques (rayon de courbure limité, etc.) et dynamiques (force motrice, adhérence, etc.). Par ailleurs, son environnement va contenir des obstacles fixes et mobiles. Dans ce contexte, il est important d'intégrer ces contraintes dans le processus de planification. C'est ainsi que nous avons proposé le concept d'*espace des états-temps* comme formalisme unificateur pour la planification de mouvement pour un véhicule soumis à cet ensemble de contraintes⁶. Ce concept a été mis en œuvre au sein d'un planificateur qui appliquait en outre le principe de la *décomposition chemin-vitesse*⁷.

Dans ce cadre, notre principal effort, pour l'année 1996, a porté sur l'amélioration de la prise en compte des contraintes cinématiques. Il faut savoir en effet que, suite à un résultat établi par Dubins en 1957 sur la nature des plus courts chemins pour un mobile de type voiture, l'ensemble des travaux antérieurs déterminent un chemin composé de segments et d'arcs de cercle tangents. Les discontinuités de courbure que présente ce type de chemin obligent le véhicule à s'arrêter lors du passage d'un segment à un arc de cercle pour réorienter ses roues directrices. Pour lever cette restriction, nous avons proposé le premier planificateur de chemin à courbure continue pour un véhicule de type voiture. Il repose sur la définition de chemins atomiques à courbure continue : les chemins *bi-élémentaires* qui sont composés de deux paires d'arcs de clothoïde symétriques [699]. Ce type de chemin permet de définir un planificateur local qui, une fois intégré à un algorithme global tel que le Fil d'Ariane, permet d'obtenir un planificateur de chemin complet.

Les travaux futurs vont porter sur la maîtrise de la complexité de ce nouvel algorithme, puis sur l'amélioration de la prise en compte des contraintes dynamiques.

⁶Thèse de doctorat de Th. Fraichard, avril 1992.

⁷On planifie d'abord un chemin géométrique puis la vitesse le long de ce chemin.

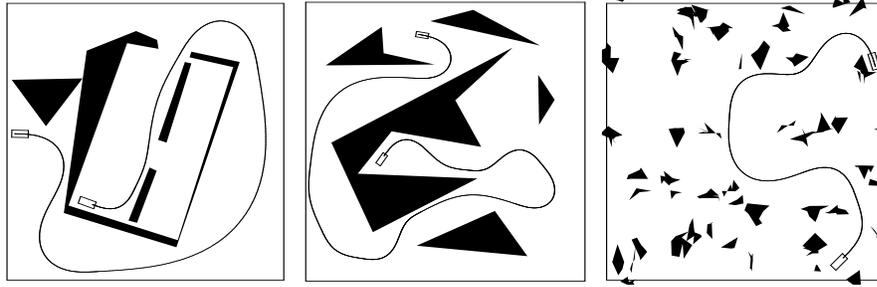


Figure 2: Chemins sans collision à courbure continues.

3.1.4 Planification et contraintes perceptives

Participants : William Triggs, Christian Laugier

Ce problème concerne la détermination automatique de placements de caméras mobiles ou de systèmes perceptifs satisfaisant certaines contraintes : (1) la tâche : distance et direction caméra-tâche; (2) l'environnement : collision robot-environnement, occlusion et encombrement visuel de la tâche; (3) la caméra : champ de vision et focale; (4) le robot (ou le système de positionnement de la caméra) : accessibilité et cinématique.

Le principe de l'approche développée consiste à rechercher des positionnements de caméra qui minimisent une fonction d'évaluation intégrant des critères qui mesurent le degré de satisfaction des contraintes précédentes. L'approche globale a été entièrement implantée l'année passée et elle a été intégrée et utilisée avec succès dans le démonstrateur du projet européen Esprit-III BRA SECOND [683].

Cette année l'extension de cette technique à des tâches d'inspection visuelle a également été réalisée. Dans ce cas, il s'agit non seulement de trouver un ensemble de points de vue optimaux pour une série de tâches visuelles, mais également de trouver le chemin optimal, permettant de relier l'ensemble de ces points de vue. Pour ce faire, nous utilisons la méthode des contraintes pour générer des trajectoires sans collision. On résout le problème du voyageur de commerce par un algorithme A^* avec une heuristique basée sur le calcul de distance dans l'espace des configurations; chaque point vue correspond à une configuration du robot. Ce planificateur a été testé sur un environnement très encombré et donne d'excellents résultats [683].

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen Esprit-III BRA SECOND et du projet inter-PRC VIA. Il a été également partiellement supporté par une bourse post-doctorale européenne de type CHM.

3.1.5 Manipulation dextre

Participants : Christian Bard, Rafael Kelly, Luis Alberto Muñoz, Igor Paromtchik, Juergen Traub

Notre équipe travaille depuis plusieurs années sur la saisie automatique d'objets à l'aide d'outils de préhension variés et notamment des mains articulées. Les travaux actuels portent sur la détermination automatique des mouvements de doigts aptes à réorienter un objet ou à en maintenir la stabilité.

Les recherches sur la manipulation ont permis de vérifier que séparer la planification et le contrôle ne permettait pas d'aboutir à une solution viable. Nous avons donc développé un planificateur de mouvements orienté capteurs pour superviser la tâche [681]. Afin de pouvoir exécuter le mouvement planifié, nous avons commencé à intégrer des lois de contrôle non linéaires pour la prise en compte des propriétés dynamiques des actionneurs (frottements, élasticité, etc.). Ce travail sera poursuivi en 1997 en relation avec l'université de Karlsruhe (DE). Nous étudions en parallèle avec l'équipe du professeur Bicchi de l'université de Pise (IT) la possibilité de contrôler directement le mouvement de l'objet plutôt que celui du robot. Les premières simulations dynamiques réalisées à l'aide de *Robot Φ* ont été utilisées pour étudier les stratégies de manipulation développées ainsi que l'évolution des contacts associés.

Les travaux menés dans l'équipe sur la planification de saisie ont été implantés dans le logiciel ACT de la société Aleph Technologies dans le cadre du post-doctorat de C. Bard. Ce travail a également été utilisé dans le cadre d'un contrat entre Aleph Technologies, Peugeot SA et le LRP⁸ pour la manipulation de pots d'échappement.

3.2 Modélisation

Les travaux s'inscrivant dans cet axe de recherche visent à étendre la classe des modèles habituellement utilisés en robotique. Nous cherchons à mieux prendre en compte les caractéristiques physiques des systèmes considérés en vue de rendre les méthodes de planification mieux adaptées à des environnements réalistes.

3.2.1 Modèles physiques pour la robotique

Participants : Anton Deguet, Fabien Garat, Ammar Joukhadar, Dan Reznik

Afin de pouvoir prendre en compte explicitement les interactions de contact qui peuvent survenir entre un système robotique et son environnement, nous avons développé des modèles et des algorithmes permettant de traiter de manière efficace les interactions physiques entre objets, *e.g.* collisions, forces, mouvements et déformations. Ces méthodes mettent l'accent sur le réalisme physique —en particulier sur la conservation des propriétés d'inertie et la maîtrise de l'erreur de modélisation— et sur l'optimisation des temps de calcul nécessaires à l'intégration des équations dynamiques et au calcul des collisions entre objets rigides ou déformables. Au cours des années antérieures, nous avons développé des modèles et des algorithmes pour la simulation dynamique : le système *Robot Φ* .

Cette année, la possibilité de définir des objets parfaitement rigides a été ajoutée au système : les primitives du système sont alors soit des réseaux de particules, soit des objets rigides. Un modèle de collision de type *impulse* a également été intégré pour les objets rigides. Nous avons aussi développé un algorithme de détection des collisions permettant de traiter des objets rigides et déformables en temps linéaire [686]. Ceci est important à la fois pour l'efficacité du système et pour obtenir des comportements plus cohérents pour les interactions de type rigide. D'autre part, nous avons mis au point une méthode permettant d'identifier les paramètres qui définissent les propriétés physiques de l'objet via les connecteurs. Ces connecteurs ne correspondent pas à une liaison réelle, atomique ou chimique donc l'identification "individuelle" de leurs paramètres est complexe. Nous avons opté pour une recherche sur l'ensemble des paramètres basée sur des critères globaux tels que positions et déformations. Les travaux sur ce thème seront poursuivis en 1997.

Dans le cadre de la collaboration France-Berkeley, nous avons pu étudier le simulateur, *impulse*, développé au sein de l'équipe du Prof. John Canny (séjour d'Anton Deguet à Berkeley au cours de l'été 1996). Nous pensons pouvoir utiliser certaines techniques de ce simulateur, telles qu'une méthode de type Newton-Euler pour la dynamique de chaînes articulées ou la loi de Poisson pour les forces de contacts rapides entre objets rigides.

Application médicale.

Ce travail a été réalisé en coopération avec le laboratoire TIMC⁹ à Grenoble (FR) et le laboratoire de biomécanique de l'institut orthopédique Rizzoli à Bologne (IT) [689, 701]. Le but de cette coopération est de construire un modèle dynamique des ligaments croisés du genou pour en comprendre le comportement avant de pouvoir planifier le placement de ses points d'attache (Fig. 3).

⁸Laboratoire de Robotique de Paris.

⁹Techniques de l'Imagerie, de la Modélisation et de la Cognition.

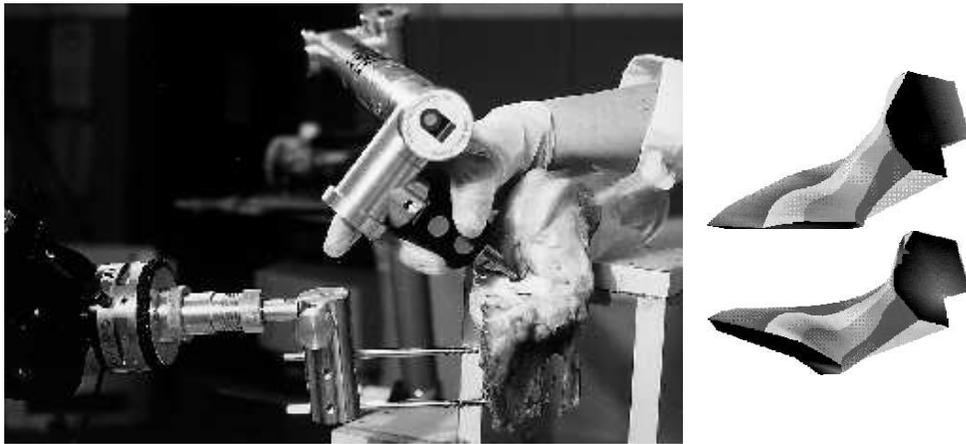


Figure 3: Saisie de données et simulation des déformations du ligament.

Application graphique.

Cette application est réalisée en coopération avec la société Getris-Images¹⁰. L'objet de cette coopération est l'intégration de notre simulateur dynamique avec la carte DVE¹¹ développée par Getris-Images. Cette carte permet actuellement de réaliser des effets spéciaux en 2D. Nous avons implanté *Robot Φ* sur PC afin de pouvoir calculer des déformations de trames 2D sur lesquelles sont ensuite projetées des images vidéo en temps réel (Fig. 4). Ce travail se poursuivra en 1997 dans le cadre d'un post-doctorat industriel Inria afin de réaliser une carte *DVE3D* et une version parallèle de *Robot Φ* visant à obtenir des performances temps réel.

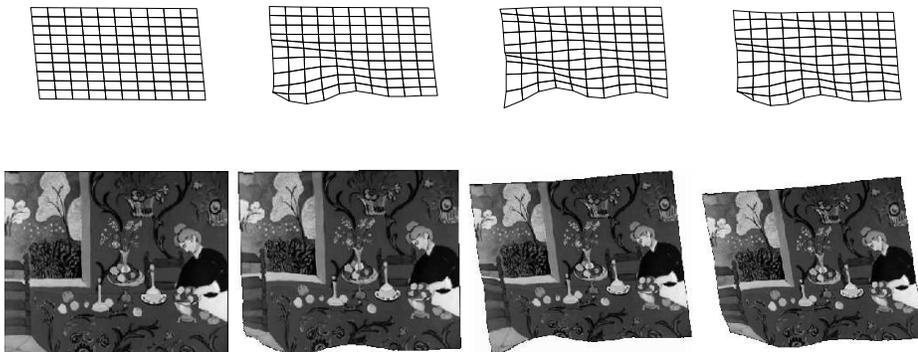


Figure 4: Trame déformée et images projetées.

3.2.2 Acquisition de modèles cinématiques

Participants : Remis Balaniuk, Emmanuel Mazer

Un modèle direct permet de relier fonctionnellement des variables d'entrée, comme la position des axes d'un robot, à des variables de sortie, comme la position cartésienne de son extrémité ou la position

¹⁰La société Getris-Images à Grenoble (FR) conçoit, développe et commercialise des outils matériels et logiciels pour l'informatique graphique.

¹¹Digital Video Effect.

d'indices visuels dans le plan image de la caméra qu'il transporte. Traditionnellement, la forme de ces fonctions est déterminée par le modélisateur à partir de ses connaissances préalables. Tout au plus cherche-t-on à les calibrer en ajustant expérimentalement leurs paramètres à l'aide d'un ensemble de mesures faites sur le système physique considéré. L'inconvénient majeur de ce type de méthode porte sur l'obtention même de ces fonctions qui repose sur des connaissances préalables souvent infondées d'un point de vue expérimental comme par exemple : les axes du poignet sont concourants, le plan image est perpendiculaire à l'axe optique, etc.

Nous avons développé une méthode originale permettant d'inférer automatiquement la *forme* de ces fonctions à partir de connaissances préalables réduites. Nous avons nommé cette approche "l'identification structurelle" car elle se distingue des autres approches par le fait qu'elle produit un programme plutôt qu'un vecteur de valeurs comme le font les méthodes d'identification classiques ou les méthodes basées sur les réseaux de neurones formels. Les principaux avantages de cette méthode sont :

- une croissance linéaire de la complexité en fonction du nombre de variables d'entrées,
- l'obtention de programmes formellement différentiables et donc la possibilité d'inverser le modèle direct par une méthode itérative,
- et la possibilité de réutilisation des modèles obtenus pour des systèmes structurellement équivalents.

Cette année, nous avons explicité formellement les conditions d'utilisation de l'algorithme, démontré sa convergence, sa linéarité et généralisé l'approche [676].

3.3 Intégration système

En réalisant l'intégration de nos algorithmes dans des systèmes en vraie grandeur, nous cherchons à valider nos idées sur la planification en milieu réaliste. Cette expérimentation est aussi une source d'inspiration pour le développement de nouvelles méthodes.

3.3.1 Télérobotique

Participants : Isabelle Mazon, Stéphane Morel, Ralph Gramberg

Dans le cadre de nos travaux en télérobotique, *i.e.* en système de téléopération enrichi de planificateurs automatiques, il est nécessaire d'avoir un moyen d'interaction entre l'opérateur et le système informatique et ses différents planificateurs. Il est également nécessaire de pouvoir inclure des moyens de contrôle de type commande référencée capteur dans le système.

Le système de télérobotique que nous développons utilise la méthode des contraintes pour éviter les collisions. Cette technique est fréquemment utilisée lorsqu'il s'agit d'effectuer des mouvements de faible amplitude. Dans un premier temps, nous avons développé une approche qui aide l'opérateur à débloquer la méthode des contraintes lorsque celle-ci tombe dans un minimum local. Nous avons constaté que l'opérateur a souvent comme idée intuitive pour sortir de ce point de blocage de vouloir tirer sur un corps du robot. En conséquence, nous avons développé une technique "d'attracteur virtuel" qui permet à l'utilisateur de fixer des points d'attache fictifs sur le robot. Lorsqu'un problème survient, il est alors possible pour l'opérateur de "tirer" sur un corps de robot, en agissant sur une souris 3D permettant d'exercer des efforts dans l'espace à 6 dimensions [703].

En collaboration avec le projet MOVI et dans le cadre du démonstrateur européen SECOND, nous avons mis au point une procédure d'asservissement visuel permettant de réaliser de manière robuste la prise d'un objet polyédrique par un préhenseur monté sur le robot. La configuration géométrique de saisie de la pièce est déterminée par le planificateur de C. Bard, l'asservissement visuel est réalisé par l'algorithme de MOVI qui envoie des commandes de vitesse cartésienne au robot.

Cette année le travail a consisté à porter l'ensemble de l'application sur notre nouvelle plate-forme expérimentale basée sur un RX90 de chez Staubli (stage de *studentarbeit* de Ralph Gramberg). Nous avons pour cela uniformisé, afin de les rendre génériques, l'ensemble des composants logiciels de l'application : couche application du contrôleur du robot, primitives de contrôle et de commande du robot depuis une station de travail quelconque. Nous avons ensuite étendu l'approche de manière à pouvoir éviter les obstacles *en ligne* lors de l'asservissement visuel. Le principe consiste à filtrer les commandes en vitesse fournies par l'asservissement visuel par la méthode des contraintes, avant des les envoyer au robot. Cette technique originale est en cours d'intégration.

3.3.2 Système de programmation de robots

Participants : Christian Bard, Emmanuel Mazer

L'apparition de structures mécaniques complexes comme les systèmes redondants, les systèmes incluant un porteur, un robot et un positionneur, et la nécessité d'utiliser ces systèmes dans des tâches de plus en plus variées comme le positionnement sous-contraint ou les mouvements composés articulaire ou cartésien conduisant à revoir la notion ancienne de programmation de niveau effecteur.

En collaboration avec la société ALEPH Technologies nous avons conçu et implémenté un nouveau système de programmation de robot : ACT-Control. ACT-Control est un système de programmation de niveau effecteur *ouvert et générique*. Ouvert signifie qu'il est construit autour d'un noyau permettant l'accueil de nouveaux modes de déplacement. Générique signifie que ces modes ne dépendent pas de la morphologie géométrique ni du nombre de degrés de liberté des robots. ACT-Control est actuellement utilisé :

- pour la simulation d'une cellule de soudage multi-robots IGM (Caterpillar),
- dans un contrôleur de robot SCARA (ALBORA),
- dans une application de maintenance de centrale nucléaire chez GEC-Alsthom (maintenance de préssurisateur),
- et dans le projet START d'EDF.

Ce dernier projet fait l'objet d'une collaboration tri-partites entre l'Inria, GEC-Alsthom et ALEPH Technologies. Ce projet devrait conduire à la réalisation d'un atelier logiciel pour la programmation des robots. L'objectif étant de réaliser rapidement des applications de téléopération dans le cadre d'opérations de maintenance pour les centrales nucléaires. Nous participons à la définition de l'architecture de ce système.

3.3.3 Autonomie de mouvement pour véhicules

Participants : Gérard Baille, Thierry Fraichard, Philippe Garnier, Christian Laugier, Leszek Lisowski, Cyril Novales, Didier Pallard, Igor Paromtchik

La conduite automobile est le contexte applicatif de notre travail de recherche dans le domaine de l'autonomie de mouvement; il s'inscrit dans le cadre de l'action de développement Inria-INRETS Praxi-tèle dans laquelle nous abordons le problème du déplacement de petits véhicules électriques en milieu urbain. Ce contexte permet d'aborder l'autonomie de mouvement dans un cadre très général : un véhicule de type voiture est soumis à des contraintes de mouvement communes à la plupart des véhicules terrestres, et son environnement, de par son caractère dynamique et incertain, est représentatif de presque tout environnement réel.

L'architecture de navigation autonome que nous avons développée couple un niveau délibératif, la *planification de mouvement* (cf. § 3.1.3), et un niveau réactif, le *contrôle d'exécution*. La planification de mouvement détermine un *mouvement nominal* pour le véhicule, en utilisant les connaissances a priori

dont il dispose sur son environnement. Le contrôle d'exécution assure *l'exécution* et *l'adaptation* éventuelle du mouvement nominal sur la base d'informations instantanées acquises en ligne.

En 1995, nous avons achevé la définition d'un système de contrôle d'exécution reposant sur l'utilisation la logique floue¹². En 1996, l'accent a surtout été mis sur les expérimentations sur le véhicule électrique Ligier dont nous disposons [684]. Ces expérimentations ont fait apparaître des problèmes d'oscillations entre comportements antagonistes; oscillations dues au fait que le choix de la réaction se fait de façon réactive sur la base d'informations instantanées seulement. Une solution actuellement explorée pour pallier ce problème consiste à coupler au système réactif un niveau plus *réfléchi* (fréquence d'activation moindre, réaction plus lente mais mieux adaptée). La fonction principale de ce niveau réfléchi étant alors de substituer temporairement au mouvement nominal global un mouvement local mieux adapté à la situation courante et des données perceptives [694].



Figure 5: Réalisation d'un créneau en environnement dynamique.

Ces expérimentations ont aussi permis de constater la difficulté à obtenir un comportement réactif générique et robuste. Pour pallier ce problème, nous avons commencé à explorer une voie alternative consistant à identifier des situations type, *e.g.* créneau, changement de voie, dépassement, etc., et à définir pour chaque situation, une réaction spécifique appropriée en terme de lois de commande à appliquer aux actionneurs du véhicule; les paramètres de chaque loi étant instanciés en fonction de la situation courante [688]. Ce travail a donné lieu à de très bons résultats dans le cas du créneau [696, 697]. Ceci a été démontré en direct à la télévision italienne RAI Uno puis, ultérieurement, en présence du maire de Grenoble. L'extension à d'autres situations type est en cours. La figure 5 montre quelques extraits d'une vidéo présentant une manœuvre de créneau en environnement dynamique¹³.

Enfin, 1996 a vu se poursuivre le développement matériel de la future plate-forme expérimentale qui sera utilisée dans Praxitèle (Fig. 6). Nous implantons une architecture de commande distribuée sur un système multi-processeurs construit autour d'un réseau CAN [695]. Deux prototypes sont en cours de réalisation. Ce travail s'effectue en étroite collaboration avec l'Inria Rocquencourt.

¹²Thèse de doctorat de Ph. Garnier, décembre 1995.

¹³Vidéo présentée à la conférence internationale Robotics and Automation.



Figure 6: La nouvelle plate-forme Praxitèle.

4 Actions industrielles

4.1 Action de développement Praxitèle

le projet SHARP participe activement à l'action de développement Inria-INRETS¹⁴ Praxitèle lancée en 1994 et qui implique des partenaires industriels aussi divers que la CGEA¹⁵, Electricité de France, Renault et Dassault Electronique. Praxitèle est un programme de recherche sur le concept du Transport Urbain Public et Individuel; la contribution de SHARP porte sur les aspects conduite automatique.

4.2 Ministère de la défense

Un contrat de recherche entre la DRET¹⁶, Aleph Technologies et le projet SHARP portant sur l'autonomie de mouvement pour véhicules tout-terrain est en cours de signature.

4.3 Société Aleph Technologies

Aleph Technologies¹⁷ a été créée en 1989 à l'initiative de chercheurs du projet SHARP pour permettre le transfert technologique du système de CAO-Robotique ACT (en coopération avec le projet PRISME de l'Inria Sophia-Antipolis). Depuis sa création, des liens privilégiés existent entre Aleph Technologies et le projet SHARP (contrats communs, etc.) avec en 1996 :

- Poursuite de l'accord cadre de coopération [1995-1998].
- Post doctorat industriel (Ch. Bard) sur la saisie de pièces industrielles et sur le contrôle de robots manipulateurs.
- Contrat d'un an et demi autour du projet de contrôleur générique pour robot industriel.

4.4 Société GEC-Alsthom

Un accord cadre de collaboration pour une durée de quatre ans a été signé avec la société GEC-Alsthom SES; cet accord inclut également le projet MOVI et l'avant-projet BIP de l'Inria Rhône-Alpes. Il

¹⁴Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

¹⁵Compagnie Générale d'Entreprise Automobile.

¹⁶Direction des Recherches et Etudes Techniques du Ministère de la Défense.

¹⁷Cette société a le statut de "start-up" Inria.

pourrait être étendu plus tard à d'autres projets des unités de recherche de Sophia-Antipolis et Rennes. Le domaine concerné est la télé-robotique pour des applications d'interventions et de maintenance en milieux extrêmes.

4.5 Société Getris Image

Un contrat de recherche a été conclu en 1996 avec cette société dans le but d'assurer l'intégration de nos algorithmes de simulation dynamique dans la future machine vidéo-graphique de Getris Image. Dans ce but, A. Joukhadar y effectue un post-doctorat industriel.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

Pôles CNRS Structures et Machines Intelligentes.

Nous sommes impliqués dans quatre de ces pôles qui sont actuellement en cours de définition : les 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 HEU-DIASYC¹⁸ à Compiègne), "Aide au geste chirurgical" (coordinateur : laboratoire TIMC à Grenoble) et "Téléopération et Réalité Virtuelle" (coordinateur : CEA/STR).

Projet inter-PRC VIA.

Les projets SHARP et MOVI assurent la responsabilité de ce consortium qui a été sélectionné lors d'un appel d'offres des PRC. L'objectif de cette action est l'intégration de la perception visuelle et de la planification pour l'action par le mouvement. Cette action regroupe plusieurs projets INRIA (ROBOTVIS, ICARE, TEMIS, MOVI, SHARP) et le LAAS.

GSE¹⁹ Véhicule Electrique.

Ce GSE de l'Institut National Polytechnique de Grenoble a démarré en juillet 1994 pour une durée de quatre ans. Nous y avons la responsabilité de l'axe "Véhicule Intelligent", aspect conduite automatique notamment.

5.2 Actions internationales

5.2.1 Europe de l'ouest

Projet inter-régional IAR.

Nous participons à ce projet de collaboration entre la région Rhône-Alpes et la région de Wurtemberg autour de la saisie autonome. Dans ce cadre nous accueillons plusieurs stagiaires ingénieurs de l'université de Karlsruhe (Ralph Gramberg du 1/10/95 au 31/7/96, Wolfgang Paulus du 1/1/95 au 31/3/96 et Juergen Traub du 1/10/95 au 31/3/96).

¹⁸Heuristique et Diagnostique des Systèmes Complexes du CNRS.

¹⁹Groupement Scientifique d'Établissement.

Réseaux européens CHM²⁰ HEROS et ERNET.

Le projet SHARP est coordinateur du réseau HEROS (*Hazardous Environment Robotics*) qui comprend 8 équipes de recherche de 6 pays européens. Nous sommes également membre du réseau ERNET (*European Robotics Network*) qui comprend 28 laboratoires de recherche de onze pays européens. Dans ce cadre nous avons effectué des échanges de doctorants (A. McLean d'Oxford du 1/4/95 au 31/3/96).

5.2.2 Europe de l'est

Projet INCO-COPERNICUS.

Ce projet européen d'une durée de deux ans vient d'être accepté, il porte sur les systèmes multi-robots de transport en milieu industriel. Il est coordonné par l'université de Karlsruhe et inclut des partenaires hongrois, polonais, russe et biélorusse.

Collaboration avec la Russie.

Nous participons avec le LAAS de Toulouse au centre franco-russe CARRA²¹ mis en place par le CNRS et l'Académie des Sciences de Russie, ainsi qu'au projet MORES²² de l'INTAS²³.

5.2.3 Amérique

Collaboration avec l'université Simon Fraser à Vancouver, Canada.

Depuis octobre 1995, M. Cherif a commencé un séjour post-doctoral dans le laboratoire du prof. Kamal Gupta pour étudier la possibilité d'intégrer notre approche par modèles physiques avec des mécanismes de planification par utilisation de modèles aléatoires dans le cas de la saisie dextre.

Programme France-Berkeley.

Dans le cadre de ce programme de coopération, une collaboration sur une année va démarrer en mars 1997 sur le thème de la simulation dynamique. Cette collaboration est déjà en cours à travers une thèse en co-tutelle (D. Reznik depuis novembre 1995) et un séjour de deux mois de A. Deguet au sein de l'équipe de J. Canny durant l'été 1996.

Coopération avec le Brésil.

Cette coopération avec l'université de Fortaleza a démarré en 1994 avec un support financier de l'Inria.

²⁰Capital Humain et Mobilité.

²¹Centre Associatif de Recherche en Robotique Avancée.

²²Advanced Mobile Robots for Specific and Difficult Environment.

²³Int. Assoc. for the Promotion of the Cooperation of Scientists from the Independent States of the Former Soviet Union.

5.2.4 Asie et Océan Pacifique

Collaboration avec le Japon.

Une collaboration dans le domaine de la télérobotique est en place avec le LRP²⁴, le MEL²⁵ du MITI à Tsukuba, et l'école des Mines de Nantes concernant la téléopération sur sites éloignés (France-Japon). Une démonstration depuis le Futuroscope de Poitiers le 10 octobre 1996 devant l'Académie des sciences a permis le pilotage simultané de 4 robots, dont celui de SHARP.

6 Diffusion des résultats

6.1 Actions d'enseignement

Outre des enseignements assurés en second cycle universitaire (université de Grenoble), écoles d'ingénieurs (Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliqués de Grenoble, Ecole pour l'Etude et la Recherche en Informatique et Electronique de Nimes, INSTN) et au Conservatoire National des Arts et Métiers, les membres du projet assurent les enseignements de troisième cycle universitaire suivant :

- Cours "Architecture et programmation des robots" en DEA Image-Vision-Robotique de l'INPG. *Enseignant : C. Laugier.*
- Cours "Modélisation et planification de tâches en robotique" en DEA Image-Vision-Robotique de l'INPG. *Enseignant : C. Laugier.*
- Travaux dirigés en Robotique en DEA Image-Vision-Robotique de l'INPG. *Enseignants : G. Baille et Th. Fraichard.*

6.2 Participation à des colloques

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.

6.3 Conférences invitées, tutoriels, cours, etc.

Christian Laugier a participé en tant que conférencier invité au symposium international de recherche en robotique (ISRR) en décembre 1995 et à la conférence internationale *Control, Automation, Robotics and Vision* (Singapour, décembre 1996).

6.4 Animations scientifiques

- C. Laugier est *general chairman* de la conférence internationale *IEEE-RSJ Intelligent Robots and Systems* qui va se dérouler à Grenoble en 1997. A ce titre, il est en charge de son organisation. E. Mazer et Th. Fraichard sont respectivement *exhibit chairman* et secrétaire de cette même conférence.

²⁴Laboratoire de Robotique de Paris.

²⁵Mechanical Electronic Laboratory.

- C. Laugier a participé aux comités de programme des principales conférences internationales en Robotique pour l'année 1996 : *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, *IEEE-RSJ Intelligent Robots and Systems*, *Int. Symp. on Automotive Technology and Automation*, *IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning*.
- C. Laugier est membre du comité de rédaction de la revue d'Intelligence Artificielle. Il est également membre du bureau du comité des projets de l'Inria Rhône-Alpes et du *steering advisory committee* de la conférence internationale IEEE-RSJ Intelligent Robots and Systems.
- C. Laugier et C. Novalès ont organisé la session *Autonomous Vehicles and the French Praxiteles Project* à la conférence internationale *Robotics and Manufacturing* (Montpellier, mai 1996).
- C. Laugier, E. Mazer et Th. Fraichard sont des lecteurs réguliers pour les revues *IEEE Trans. on Robotics and Automation* et *Int. Jour. on Robotics Research*, ainsi que pour de nombreuses conférences internationales.
- C. Laugier, E. Mazer et Th. Fraichard participent à des jurys de thèses de l'INPG et de l'université Joseph Fourier de Grenoble. En 1996, ils ont également participé à des jurys de thèses (en tant qu'examineurs ou rapporteurs) à Toulouse, Montpellier, Paris, Louvain.
- C. Novalès s'est chargé de l'organisation de la 4^e journée des jeunes chercheurs en Robotique qui s'est tenu à Grenoble en janvier 1996. Il est aussi vice-président de l'association des jeunes chercheurs en robotique.

6.5 Diffusion de logiciels

- Un brevet a été déposé sur le système de simulation de comportement dynamique (Robot Φ) (C. Laugier et A. Joukhaddar).
- Un transfert de technologies est en cours avec la société Getris Image (modèles déformables appliqués à la manipulation d'images vidéo).

7 Publications

Thèses

- [676] R. BALANIUK, *Identification Structurale*, thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique, Grenoble (FR), septembre 1996.
- [677] F. DE LA ROSA, *Planification de mouvements avec prise en compte explicite des incertitudes géométriques*, thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique, Grenoble (FR), novembre 1996.

Articles et chapitres de livre

- [678] F. DE LA ROSA, C. LAUGIER, J. NAJERA, «Robust Path Planning in the Plane», *IEEE Trans. Robotics and Automation* 12, 2, avril 1996, p. 347–352.
- [679] T. FRAICHARD, I. MAZON, «Robotique en environnement réel», *Bulletin de l'Association Française d'Intelligence Artificielle*, 27, octobre 1996.
- [680] A. LABBI, E. GAUTHIER, «Combining Fuzzy Knowledge and Data for Neuro-Fuzzy Modeling», *Journal of Intelligent Systems*, 1996, In special issue on Neural Networks Applications.
- [681] L. A. MUÑOZ, T. DOERSAM, «Simple Controllers for Dexterous Hands», in: *Advances in Robotics: the European Robotics Network (ERNET) Perspective*, C. Bonivento, C. Melchiorri, et T. H. (éd.), World Scientific Publishing Co., 1996, Proc. of the ERNET final workshop. Darmstadt (DE), septembre 1996.

- [682] I. E. PAROMTCHIK, C. LAUGIER, «Parking a nonholonomic autonomous vehicle», in: *Advances in Robotics: the European Robotics Network (ERNET) Perspective*, C. Bonivento, C. Melchiorri, et T. H. (réd.), World Scientific Publishing Co., 1996, p. 153–162, Proc. of the ERNET final workshop. Darmstadt (DE), septembre 1996.
- [683] B. TRIGGS, C. LAUGIER, «Automatic Task Planning for Robot Vision», in: *The Seventh Int. Symp. on Robotics Research*, G. Giral et G. Hirzinger (réd.), Springer-Verlag, 1996, p. 428–439.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [684] P. GARNIER, T. FRAICHARD, «A Fuzzy Motion Controller for a Car-Like Vehicle», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3, p. 1171–1178, Osaka (JP), novembre 1996.
- [685] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Adaptive time step for fast converging dynamic simulation system», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2, p. 418–424, Osaka (JP), novembre 1996.
- [686] A. JOUKHADAR, C. LAUGIER, «Dynamic Simulation: Model, Basic Algorithms, and optimization», in: *Proc. of the Workshop on Algorithmic Foundation on Robotics*, Toulouse (FR), juillet 1996.
- [687] A. JOUKHADAR, A. WABBI, C. LAUGIER, «Fast Contact Localisation Between Deformable Polyhedra in Motion», in: *Proc. of the IEEE Computer Animation Conf.*, p. 126–135, Geneva (CH), juin 1996.
- [688] C. LAUGIER, I. PAROMTCHIK, P. GARNIER, T. FRAICHARD, «Motion Control of an Autonomous Vehicle Through Sensor-Guided Manœuvres», in: *Proc. of the Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore (SG), décembre 1996.
- [689] S. MARTELLI, A. JOUKHADAR, S. LAVALLÉE, G. CHAMPLEBOUX, M. MARCACCI, «ACL Mathematical Model For Implant Simulation in Animal», in: *Proc. of the congress of the European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy*, Budapest (BG), mai 1996.
- [690] 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.
- [691] A. MCLEAN, I. MAZON, «Incremental Roadmaps and Global Path Planning in Evolving Industrial Environments», in: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1, p. 101–107, Minneapolis (MN), avril 1996.
- [692] A. MCLEAN, «Update and Repair of a Roadmap after Model Error Discovery», in: *Proc. of the Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems*, Lisbonne (PT), juillet 1996.
- [693] J. NAJERA, C. LAUGIER, W. WITWROW, J. DE SCHUTTER, «Integrating assembly planning with compliant control», in: *Proc. of the Int. Symp. on Robotics and Manufacturing*, Montpellier (FR), mai 1996.
- [694] C. NOVALES, D. PALLARD, C. LAUGIER, «Controlling the Motions of an Autonomous Vehicle using a Local Navigator», in: *Proc. of the Int. Symp. on Robotics and Manufacturing*, Montpellier (FR), mai 1996.
- [695] M. PARENT, S. FAUCONNIER, L. LISOWSKI, «Praxi: a small electric vehicle specific for urban transport», in: *Proc. of the Electric Vehicle Symposium*, 2, p. 126–130, Osaka (JP), octobre 1996.
- [696] I. E. PAROMTCHIK, C. LAUGIER, «Autonomous Parallel Parking of a Nonholonomic Vehicle», in: *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Intelligent Vehicles*, p. 13–18, Tokyo (JP), septembre 1996.
- [697] I. E. PAROMTCHIK, C. LAUGIER, «Motion Generation and Control for Parking an Autonomous Vehicle», in: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, p. 3117–3122, Minneapolis (MN), avril 1996.
- [698] D. REZNIK, C. LAUGIER, «Dynamic Simulation and Virtual Control of a Deformable Fingertip», in: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2, p. 669–674, Minneapolis (MN), avril 1996.
- [699] A. SCHEUER, T. FRAICHARD, «Planning Continuous-Curvature Paths for Car-Like Robots», in: *Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3, p. 1304–1311, Osaka (JP), novembre 1996.

Rapports de recherche et publications internes

- [700] F. GARAT, *Identification des paramètres physiques pour un simulateur dynamique appliqué à la robotique*, mémoire de diplôme d'études approfondies, Inst. Nat. Polytechnique, Grenoble (FR), juin 1996.
- [701] S. MARTELLI, A. JOUKHADAR, S. ZAFFAGNINI, M. MARCACCI, S. LAVALLEE, G. CHAMPLEBOUX, «A Fiber-Based ACL model for geometrical and mechanical simulations», *Research Report n°2924*, Inst. Nat. de Recherche en Informatique et en Automatique, Montbonnot Saint Martin (FR), juillet 1996.
- [702] R. MERMOND, *Planification de chemins pour un robot non-holonyme sous des contraintes d'incertitude géométrique*, mémoire de diplôme d'études approfondies, Inst. Nat. Polytechnique, Grenoble (FR), juin 1996.
- [703] S. MOREL, *Planification de tâches de téléprogrammation au moyen d'un attracteur virtuel*, mémoire de fin d'études, Conservatoire Nat. des Arts et Métiers, Grenoble (FR), juin 1996.
- [704] W. PAULUS, *Graphical Visualization of Distances for Improved Motion Planning in Telerobotics*, rapport de DiplomArbeit, université de Karlsruhe, Karlsruhe (DE), juillet 1996.

Œuvres audiovisuelles

- [705] C. BARD, C. LAUGIER, A. JOUKHADAR, *Grasping and Physical Models*, In: Video-Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Minneapolis (MN), avril 1996.
- [706] SHARP, *Towards autonomous robots*, Inria audiovisuel et hypermédia (prod.), 15 min., 1996.

8 Abstract

The goal of the SHARP project is to develop the concepts of task-level programming and autonomy in Robotics. The application of these concepts should facilitate the use of robots for specific, non-repetitive tasks, in particular, those which preclude the use of a human agent. The emphasis of the discussion lies on the areas of planning and execution of complex movements (including those related to dexterity) and reactivity.

In this context, the principal areas of research are:

- Task level programming and teleprogramming in Robotics, integration of vision, CAD and Robotics,
- Dexterous manipulation,
- Development of physical models for the simulation of robot/environment interactions (for intervention tasks in hazardous environments and the simulation of surgical operations).
- Reactive execution control in dynamic environments (for use in automobile transportation).

