
Avant-Projet BIP

Contrôle/commande de robots marcheurs et applications

Localisation : *Grenoble*

Mots-clés : commande, commande référencée capteur, mécanique, mécanique des solides, modélisation, robotique, robotique mobile, simulation de système mécanique, temps réel, asservissement visuel.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Bernard Espiau, DR

Secrétaire

Françoise De Coninck, CDD Inria, Grenoble

Personnel Inria

Ambarish Goswami, CR

Chercheur post-doctorant

Benoit Thuilot, boursier Inria

Chercheurs doctorants

Emmanuel Cordier, boursier MENESR

Frank Génot, boursier MENESR

Ahmed Keramane, boursier du gouvernement algérien

Laure France, boursier MENESR

Nicolas Andreff, boursier MENESR

Bilal El-Ali, boursier MENESR

Autres personnels

Sofiane Abdou, boursier Praxitèle, doctorant, localisé à Rocquencourt

Laurence Roussel, boursier MENESR, doctorant en commun avec le Laboratoire d'Automatique de Grenoble

Marco Mata, boursier SFERE, doctorant en commun avec le Laboratoire d'Automatique de Grenoble

2 Présentation du projet

L'avant-projet BIP, créé au 1^{er} janvier 1994, a pour objectif l'étude des divers aspects intervenant dans la conception du contrôle/commande des robots marcheurs, en particulier de type bipède. La phase finale d'instruction du projet est prévue pour novembre 1996. L'intérêt des systèmes marcheurs réside dans leur capacité d'adaptation à des terrains ou des sols variés, leur permettant de se déplacer dans des milieux très contraints en dimensions, voire mal structurés. Les robots anthropomorphes sont donc particulièrement aptes à évoluer dans nos environnements courants, privés ou industriels, essentiellement conçus pour la bipédie. Ainsi, les domaines d'application visés sont-ils en priorité la robotique de service et d'intervention. Parallèlement, l'avant-projet s'attache à développer des activités de modélisation dans certains domaines de la biomécanique pouvant constituer un nouveau champ d'application. Enfin, les architectures de commande étudiées, ainsi que les environnements logiciels associés, sont voulus suffisamment génériques pour faire l'objet de mises en œuvre dans d'autres domaines, comme les véhicules ou la manipulation.

3 Actions de recherche

Les actions de recherche de BIP s'organisent autour des divers thèmes qui concourent à l'étude et à la réalisation du système hautement complexe qu'est un robot marcheur, tout en gardant l'idée d'ouverture vers d'autres domaines applicatifs. La présentation des activités suit donc une structure classique : conception, modélisation, simulation, commande et contrôle.

3.1 Conception mécanique

Participants : Ambarish Goswami

La conception de la partie électro-mécanique du premier prototype de robot à 16 segments et 17 articulations (dont deux passives) est terminée : la structure cinématique est complètement définie, ainsi que les actionneurs (transmissions et motorisations). Ce travail a été effectué par le laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers, en concertation avec notre équipe et avec le service des moyens robotiques de l'Inria Rhône-Alpes. La première jambe devrait être réalisée d'ici fin 1996, les tests en charge devant s'étaler jusqu'à mi-1997. L'architecture matérielle et logicielle de commande associée a été définie, avec le concours du Service des Moyens Robotiques.

Parallèlement, nos études d'un triple pendule imitant la jambe humaine se sont poursuivies ; la conception complète d'une version maximale d'un point de vue puissance a été effectuée par trois stagiaires de l'école d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble (Vanessa Desi, Nadine-Michèle Lalonde, Stéphane Grégoire). À partir de celle-ci, nous avons démarré la réalisation de la première articulation, en choisissant dans un premier stade une gamme de motorisation plus légère que celle proposée.

3.2 Modélisation

3.2.1 Modélisation de la marche

Participants : Ambarish Goswami, Bernard Espiau, Emmanuel Cordier

Les recherches sur ce thème consistent à étudier la marche humaine non-pathologique sur un plan incliné sagittal, afin d'en extraire des invariants (caractéristiques qui ne changent pas lors de la marche sur différents supports). On cherche également à établir des relations fonctionnelles entre variables pertinentes, par exemple trouver des lois d'évolution dépendant de paramètres externes comme la vitesse moyenne de marche ou l'angle de la pente. Les résultats attendus devraient permettre de générer des patrons de marche pour le robot bipède, de comparer les performances de commandes calculées et d'offrir des outils nouveaux d'évaluation quantitative aux biomécaniciens.

Les travaux menés cette année ont consisté à réaliser des campagnes d'expérimentations, à mettre en place les outils d'analyse, et à commencer l'exploitation des données recueillies.

Expérimentations

Après mise au point d'un protocole très précis d'expérimentations, celles-ci ont consisté à enregistrer à l'aide d'une caméra rapide (200Hz) la marche de deux sujets sur un tapis roulant inclinable :

- à vitesse *confortable* sur l'ensemble des pentes de -13° à $+13^\circ$ par pas de 1° , avec des chaussons souples ;
- à des vitesses fixées comprises entre 2 km/h et 8 km/h par pas de 1 km/h sur plan horizontal, avec des chaussons souples ;
- à vitesse *confortable* sur l'ensemble des pentes de -12° à $+12^\circ$ par pas de 3° , avec des chaussures de randonnée rigides ;

Certains essais ont été complétés par l'enregistrement simultané de la carte de pression plantaire, au moyen de semelles spéciales.

Les enregistrements ont été effectués au laboratoire du GIP "Exercice" (professeur Geysant), à l'hôpital Saint Jean de Bonnefond près de Saint-Étienne.

Analyse

Tout d'abord, les méthodes manuelles classiques de dépouillement et de segmentation des données obtenues ne pouvant pas s'appliquer dans notre cas (2200 cycles de marche enregistrés), un ensemble d'algorithmes originaux a été implémenté afin d'automatiser ces tâches. Par ailleurs, il a été montré que l'utilisation des réseaux d'ondelettes développés à l'Irisa pour le filtrage, la compression et la reconstruction d'un signal d'angle articulaire en fonction du temps s'avère plus efficace que des méthodes classiquement utilisées dans le domaine de la biomécanique : bonne élimination du bruit tout en conservant les artefacts intéressants, obtention de vitesses et accélérations de bonne qualité, taux de compression élevé (de 13 à 15).

Une interface graphique a été écrite sous MATLAB par un stagiaire de l'IUP (François-Xavier Espiau) pour permettre à des non-spécialistes des ondelettes d'utiliser cette technique sur tout type de signal, de visualiser et de manipuler les résultats.

Par ailleurs des travaux sont en cours pour la caractérisation quantitative des cyclogrammes articulaires à n dimensions, et, plus généralement, sur les méthodes de paramétrisation utilisables dans nos applications.

Ces études sont menées en étroite collaboration avec l'équipe Sport et Motricité de l'UFRAPS à l'université Joseph Fourier de Grenoble, et font l'objet d'une coopération avec la société SALOMON SA.

3.2.2 Simulation Dynamique

Participants : Frank Génot, Laure France

La simulation dynamique d'un robot marcheur est d'abord nécessaire à l'étude des commandes en boucle fermée que l'on souhaite mettre en œuvre. Mais disposer d'un bon simulateur est également très intéressant dès que l'on souhaite faire de l'animation réaliste de personnages. Les problèmes posés par ce type de simulation sont principalement liés aux interactions variables du système avec l'environnement : changement de structure, impacts, effets des obstacles et du sol. Nous détaillons à présent deux de ces aspects.

Simulation des phases

L'un des principes de la locomotion réside dans l'enchaînement de deux dynamiques continues, phase de balancement, phase d'appui d'une jambe, ponctuée par un évènement discret, l'impact au sol. La communauté scientifique a tendance à considérer distinctement ces deux phases, en modélisant les contacts au sol durant la phase d'appui par des *contraintes bilatérales*; le robot est alors considéré comme un simple bras manipulateur rivé au sol. Tout point d'appui durant la marche n'étant que temporaire, il est impossible, pour modéliser le robot dans toutes les phases d'appui, de se baser sur un unique modèle de robot manipulateur complété par d'éventuelles contraintes bilatérales formulées par les multiplicateurs de Lagrange.

Un premier point de passage obligé consiste à obtenir automatiquement un modèle dynamique symbolique du robot sans contact. Une méthode consiste en l'augmentation du vecteur des coordonnées généralisées par la position et l'orientation dans l'espace cartésien d'un segment lié au robot (par exemple la tête). On parle alors de *modèle libre* du robot. Un algorithme de génération automatique des équations à partir de la description du robot par ses paramètres de Denavit-Hartenberg a été écrit et mis en œuvre sous Maple.

Un autre inconvénient majeur de la modélisation sous forme de bras manipulateur est qu'elle ne prend pas en compte de façon explicite d'éventuels décollages ou glissements au niveau des appuis. Or l'existence de solution(s) aux problèmes de contact dans la dynamique des corps rigides articulés et leur détermination demeurent des problèmes largement ouverts. En effet, ce problème peut se réécrire sous la forme de contraintes de complémentarité entre force de contact et accélération relative des corps en contact. Certes le problème à résoudre admet-il une solution unique dans le cas de non-frottement (*monotone LCP*). Par contre, si l'on prend en compte le frottement de Coulomb, indispensable à la marche standard, existence et unicité ne sont plus garanties.

Enfin les seules méthodes proposées pour le cas tri-dimensionnel avec cône de friction utilisent une approximation de ce cône par une pyramide, afin de linéariser les contraintes. Les diverses approches existantes sont en cours d'investigation, en vue de l'écriture d'un algorithme permettant la simulation complète, en supposant dans un premier stade le non-glissement du pied.

Simulation des autres interactions

Les modèles précédents ne prennent en compte les forces d'interaction que très localement. Or, la simulation doit permettre de valider le comportement d'une commande dans un environnement, ce qui nécessite de calculer les interactions entre le robot et cet environnement, éventuellement à travers l'action de capteurs de contacts ou de proximité. Les modèles permettant ce calcul existent par ailleurs, par exemple dans le domaine de la synthèse d'images représentant le mouvement d'objets déformables. En vue de produire des simulations réalistes du robot dans son environnement, il est donc nécessaire de faire coopérer deux approches: l'une calcule la dynamique intrinsèque du robot et la commande à appliquer aux articulations; l'autre synthétise un modèle d'environnement et calcule les interactions robot/environnement. Ce travail est en cours de réalisation à l'aide de l'environnement de simulation Fabule, développé par le projet iMAGIS, avec pour première application le calcul des forces de contact.

Dans ce but ont été jusqu'à présent réalisés :

- un script du robot avec une représentation unique du fichier de structure, que ce soit pour la visualisation sous Inventor, ou la simulation sous Fabule ;
- une interface pour le programme de visualisation de robots développé sous Inventor ;
- un programme en Tcl, permettant de récupérer les paramètres de la structure, pour l'afficher sous l'environnement de Fabule à l'instant initial.

Le travail en cours porte sur l'élaboration de la communication entre les outils de calcul de commande et ceux de calcul des interactions, grâce au logiciel PVM (*Parallel Virtual Machine*).

3.2.3 Étude des systèmes avec impacts

Participants : Bernard Espiau, Ambarish Goswami, Benoit Thuilot, Frank Génot, Ahmed Keramane, Marco Mata, Laurence Roussel

Les systèmes marcheurs ont en commun l'existence de transitions de modèles. Parmi ces transitions, certaines peuvent être modélisées par des impacts. Ceux-ci conditionnent très fortement le comportement dynamique résultant. Devant l'importance du problème et la faiblesse des résultats disponibles, nous avons récemment mis en place sur ce thème un groupe de travail en commun avec l'équipe robotique du laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG). Parallèlement, les travaux se sont poursuivis dans deux directions :

Modélisation du jeu mécanique

À partir d'un modèle très simple de jeu associé à un contrôleur proportionnel-dérivé, des solutions périodiques stables ont pu être exhibées. Selon les valeurs des paramètres utilisées, des comportements chaotiques ont également pu être observés.

Étude de la marche passive d'un robot de type compas

Nous avons précédemment mis en évidence le fait que le robot de type compas pouvait marcher indéfiniment le long d'un plan incliné descendant sans être commandé. Une étude approfondie de cette marche naturelle, présentant un coût énergétique nul, nous a semblé importante dans l'optique de la synthèse de lois de commande performantes pour les robots bipèdes.

Le compas est le modèle le plus basique. Néanmoins, il mêle une dynamique continue fortement non-linéaire (balancement d'une jambe, espace d'état de dimension 4) et des événements discrets régis par des équations algébriques (impact d'une jambe sur le sol). Une étude complètement théorique du comportement de ce système paraissait de ce fait hors de portée. Nous l'avons donc complétée lorsque nécessaire par des simulations numériques systématiques.

Nous avons montré que pour une inclinaison donnée du sol, il n'existe qu'un seul régime de marche passive stable. Les caractères de cette marche apparaissent donc réglés par un principe général sous-jacent que les calculs et les simulations réalisés ont permis de mieux cerner. Nous avons également pu interpréter les marches passives asymétriques (2 pas consécutifs non identiques) que nous avons observées précédemment : les équations du compas connaissent des bifurcations de type doublement de période quand l'inclinaison du sol augmente, quand la masse de la hanche est prépondérante sur la masse des jambes et quand la masse des jambes est concentrée près du pied. La marche passive initialement symétrique devient, quand l'un des paramètres mentionnés ci-dessus augmente, 2-périodique (2 pas différents répétés à l'infini), puis 4-périodique, puis \dots 2^n -périodique, et enfin chaotique. La dimension fractale de l'attracteur étrange, et le taux de compression de l'espace des phases dans son voisinage ont été calculés pour caractériser ce dernier stade.

3.3 Commande

Participants : Bernard Espiau, Ambarish Goswami, Benoit Thuilot, Frank Génot, Bilal El-ALi, Ahmed Keramane, Laurence Roussel

Les travaux sur ce thème se sont poursuivis dans trois directions :

Commande du compas

Après avoir eu confirmation en simulation du bon comportement des commandes combinant une régulation intra-pas de l'énergie mécanique et une adaptation inter-pas en vitesse, nous avons expérimenté une commande stabilisante basée sur le contrôle du centre de pivotement (ou ZMP, point du plan où

deux composantes du moment dynamique sont nulles). Partant de trajectoires de référence mesurées sur les cycles passifs, nous avons pu élargir le bassin d'attraction des cycles passifs par une simple commande active proportionnelle-intégrale (stage de DEA de Totok Soehartanto).

Commande du robot bipède

Les études de commande par fonction de tâche combinant un contrôle de la tête, une impulsion de "kick-off" et une minimisation des couples articulaires se sont poursuivies. Elles doivent à présent être complétées par la prise en compte de la phase de double support et par une méthode automatique de calcul de l'impulsion.

Commande en présence d'obstacles

Il s'agit ici d'étudier le problème posé par l'arrêt brutal du robot en cas de détection d'un obstacle par un capteur de proximité. En pratique, il s'agit d'une part de dimensionner le système pour permettre le retour à une position de sécurité dans tous les cas de figure, d'autre part d'élaborer les commandes nécessaires. Comme dans le cas du compas, on s'achemine ici vers une commande de la position du centre de pivotement, réduit à la projection du centre de gravité quand les accélérations sont faibles.

3.4 Contrôle et architectures

Participants : Bernard Espiau, Sofiane Abdou

Les travaux sur ce thème sont effectués dans le cadre des développements et des applications de l'environnement ORCCAD. L'application principale est pour l'instant le programme PRAXITÈLE. L'arrivée prochaine d'un chargé de recherche spécialiste des langages synchrones devrait nous permettre de reprendre des activités plus en amont, comme la vérification ou la répartition, tout en attaquant le problème de la route automatisée.

Concernant PRAXITÈLE, le travail effectué cette année a consisté à spécifier, vérifier et implémenter un scénario de mise en stationnement automatique. Parallèlement, une méthode de détection de défaut capteur a été étudiée en simulation, et une spécification de la première version de conduite sur joystick de la PRAXICAR a été écrite.

4 Actions industrielles

Une collaboration avec le bureau d'études du département "Chaussures et Équipements de Sport" de la société SALOMON (Annecy) a démarré activement cette année. Ses objectifs sont de permettre :

- à la société SALOMON de bénéficier des techniques et outils d'analyse développés à l'Inria dans le but d'améliorer et/ou de concevoir des produits liés à la marche ;
- à l'équipe BIP de profiter de l'expérience de SALOMON pour la réalisation d'expérimentations sur le terrain, et permettre la validation des résultats. Les expérimentations effectuées à St-Etienne ont d'ailleurs été en partie communes.

Par ailleurs, des contacts sérieux ont été établis avec la société IMMI, spécialisée dans les robots d'assistance chirurgicale en vue d'établir une collaboration sur la sécurité du contrôle/commande.

Autour des architectures et de la vérification formelle, des contacts existent avec les sociétés SIMULOG et Soft Mountain. Enfin, nous participerons au projet LTR VIGOR, "Visually Guided Robots Using Uncalibrated Cameras", récemment déposé ; il fait intervenir les sociétés SINTERS (Toulouse) et OSS Ltd (Danemark).

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

5.1.1 Collaborations

L'avant-projet BIP a mis en place plusieurs collaborations, internes à l'Inria ou avec d'autres laboratoires français :

- Avec le projet MOVI, un doctorant encadré en commun (Nicolas Andreff) démarre cette année une recherche sur l'asservissement visuel non calibré. Le projet LTR VIGOR, à l'initiative de MOVI, est également une opération commune sur ce sujet. Toujours sur ce thème rappelons le projet inter-PRC VIA, avec MOVI et SHARP, terminé fin 1995.
- Avec le projet iMAGIS, une collaboration existe déjà autour de L. France, doctorante commune. Un projet de recherche sur la simulation de ménissectomie sous arthroscopie faisant également l'objet d'une collaboration est en cours d'élaboration.
- Avec le projet ICARE à Sophia-Antipolis, nous poursuivons nos travaux en commun sur ORCAD. Une version minimale opérationnelle du logiciel, destinée à être largement diffusée dans et hors de l'institut, est en cours de développement avec le concours du service des moyens robotiques.
- L'équipe BIP est à l'origine du projet multi-laboratoires du même nom ayant pour objectif la réalisation du bipède mécanique et de sa commande. Les partenaires en sont le LAG (Carlos Canudas de Wit), le laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers (Guy Bessonnet) et le laboratoire des Matériaux à Usage Sportif de Poitiers (Alain Junqua). Avec le LAG, la collaboration s'élargit à des domaines plus amont et est très active : doctorants en commun, groupes de travail, séminaires. Des relations existent également avec l'école de Mécanique de Grenoble (ENSHMG, Daniel Brun-Picard) sur la conception mécanique du triple pendule.
- En matière de biomécanique, il existe une fructueuse collaboration avec l'équipe Sport et Motricité, UFR APS, université Joseph Fourier, Grenoble, dirigée par Jean-Pierre Blanchi, donnant lieu à des études communes multidisciplinaires. Il faut également souligner l'existence de relations avec le laboratoire d'Étude et de Recherche de la Performance Sportive (Thierry Pozzo, LERPS, Groupe d'Analyse du Mouvement, UFR STAPS, université de Bourgogne, Dijon).

5.1.2 Autres actions

B. Espiau est co-responsable avec Carlos Canudas de Wit de la proposition de projet GdR-PRC déposée au CNRS "Commande de robots à pattes". Il est également président du comité des projets de l'UR et membre de la commission d'évaluation de l'Inria. A. Goswami est responsable de la partie *Amérique du Nord* des relations internationales à l'UR Rhône-Alpes.

5.2 Actions internationales

5.2.1 Europe de l'ouest

Le projet LTR VIGOR, déjà mentionné, concerne aussi l'université de Cambridge, le FhG-IITB de Karlsruhe, l'université hébraïque de Jérusalem.

5.2.2 Europe de l'est

Dans le cadre de la Coopération Scientifique et Technique entre la France et la Pologne, nous avons déposé un projet de collaboration avec l'université de Varsovie sur la conception de robots actionnés par des tendons.

5.2.3 Amérique

Alain Giraud, chargé de recherche nouvellement recruté, effectue un séjour à Berkeley dans le projet PATH, jusqu'en avril 1997. En avril 1996, A. Goswami a visité le laboratoire de Mark Redfern à l'université de Pittsburg et celui de Hagen Schempf à l'université de Carnegie-Mellon.

6 Diffusion des résultats

6.1 Actions d'enseignement

B. Espiau est chargé du cours de commande des robots à l'ISIA - Ecole des Mines de Paris. B. Thuilot est chargé du cours *Commande des systèmes non-linéaires* à l'ENSTA. La plupart des doctorants effectuent des vacances ou du monitorat dans des universités ou des écoles.

6.2 Participation à des colloques

Des membres de l'équipe ont participé à des conférences et *workshops* ; on se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste. A. Goswami a assisté à l'école *Modeling and Simulation of Human and Walking Machines Locomotion*, à Udine, Italie, en juillet 1996.

6.3 Conférences invitées, tutoriels, cours, etc.

B. Espiau est membre des comités de programme de ICAR (International Conference on Advanced Robotics ; membre permanent), ICRA 97 (IEEE Conference on Robotics and Automation), WAC 96 (World Automation Conference). Il est le président du congrès IFAC SYROCO 97. B. Espiau, B. Thuilot et A. Goswami sont lecteurs pour les revues IEEE : *Automatic Control*, *Robotics and Automation*, *Control System Technology* (B. Espiau est éditeur associé de cette dernière).

6.4 Divers

S. Abdou a participé à *la Science en Fête*, au MESR, et à *la Science en Yvelines*.

7 Publications

Articles et chapitres de livre

- [6] A. GOSWAMI, B. ESPIAU, A. KERAMANE, «Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws», *Journal of Autonomous Robots*, 1997, Invited for Submission.
- [7] T. C. K. III, S. D. STULBERG, M. A. PESHKIN, A. QUAID, J. LEA, A. GOSWAMI, C.-H. WU, «A Computer-Assisted Total Knee Replacement Surgical System Using a Calibrated Robot», in : *Computer Assisted Surgery*, R. H. Taylor et al. (réd.), MIT Press, 1995.
- [8] D. SIMON, B. ESPIAU, K. KAPPELLOS, R. PISSARD-GIBOLLET, «ORCCAD: Software Engineering for Real-time Robotics; a technical insight», *Robotica*, 1997, to appear.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [9] S. ABDOU, B. ESPIAU, M. PARENT, «Specify, Validate and Implement Missions for Autonomous Vehicles», in : *Proceedings of WAC - International Symposium on Robotics and Manufacturing*, Montpellier, 1996.
- [10] S. ABDOU, M. PARENT, B. ESPIAU, «Mission Programming : Application to the Distribution of Empty Vehicles in the PRAXITELE Project», in : *Proceedings of 4th IEEE Meditarrean Symposium on New Directions in Control and Automation*, MCSA, Crete, Greece, 1996.
- [11] S. ABDOU, M. PARENT, B. ESPIAU, «Specification et Implémentation Logicielles pour des Véhicules Automatiques», in : *Proceedings of Real-Time Systems and Embedded Systems*, Paris, 1996.
- [12] C. ALLAL, S. ABDOU, P. DAVIET, M. PARENT, «Tactical and Technical Empty Vehicles Distribution in the PRAXITELE Project», in : *Proceedings of 4th IEEE Meditarrean Symposium on New Directions in Control and Automation*, MCSA, Crete, Greece, 1996.
- [13] O. COUSSI, F. GENOT, P. SARDAIN, G. BESSONNET, B. ESPIAU, «BIP: Conception et développement d'un bipède mécanique anthropomorphe», in : *CONFERE*, Poitiers, 1996.
- [14] B. ESPIAU, M. JOURDAN, S. ABDOU, K. KAPELLOS, «Specify, Validate and Implement a Virtual "Train" of Vehicles», in : *Proceedings of 28th International Symposium on Automotive Technology and Automation*, Stuttgart, Germany, 1995.
- [15] A. GOSWAMI, B. ESPIAU, A. KERAMANE, «Limit cycles and their stability in a passive bipedal gait», in : *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, p. 246–251, Minneapolis, USA, 1996.
- [16] K. KEDZIOR, A. MORECKI, M. WOJTYRA, T. ZAGRAJEK, T. ZIELINSKA, A. GOSWAMI, M. WALDRON, K. WALDRON, «Development of a Mechanical Simulation of Human Walking», in : *Proceedings of the 1996 ROMANSY Conference*, Udine, Italy, 1996.
- [17] M. PARENT, P. DAVIET, S. ABDOU, «Vision technique for Platoon Driving», in : *Proceedings of the Application of Advanced Technologies in Transportation Conference*, Capri, Italy, 1995.
- [18] D. SIMON, K. KAPELLOS, B. ESPIAU, «Control Laws, Tasks, Procedures with ORCCAD; Application to the Control of an Underwater Arm», in : *Proceedings of 6th IARP (International Advanced Robotics Programme)*, La Seyne sur Mer, 1996.

Rapports de recherche et publications internes

- [19] A. GOSWAMI, B. T. ET B. ESPIAU, «Compass-like biped robot, part I: stability and bifurcation of passive gaits», *rapport de recherche n°2996*, Inria, octobre 1996.

Œuvres audiovisuelles

- [20] S. ABDOU, AL., *Mission Programming*, 3mn 10sec, 1996, film vidéo VHS.

8 Abstract

This project addresses major problems related to the design and control of legged robots, essentially of biped type. Concerning the more specific aspect of biped robots, studies are conducted on several topics: modelling of human locomotion, in order to select the pertinent variables to be used in the control and to offer new quantitative approaches to the community of biomechanics; theoretical study of impact effects; dynamical animation; simulation analysis of a compass-like robot (chaotic behaviours have been exhibited); control of a biped robot using the task function approach. The project has also an activity on sensor-based control, especially on visual servoing.

Another research issue concerns the computer aided design of robot controllers handling reactivity and real-time aspects. In that framework, problems of specification, programming and formal verification at the task level have been considered and validated on various examples.

Finally, let us mention that the physical realization of a 16 degrees-of-freedom biped system and of its controller, which would walk in a human-like way on plane terrains and stairs, is under progress. A leg prototype is expected by early 1997. Many of these researches are conducted in cooperation with other laboratories. Some industrial applications in medicine and sport are adressed through partnerships.