

Rapport INRIA 1994 — Programme 4

Contrôle/commande de robots marcheurs et applications

Avant-Projet BIP

3 mai 1995

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.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Bernard Espiau, DR Inria

Personnel Inria

Ambarish Goswami, chercheur postdoctorant, puis CR depuis le 1er octobre 1994

Chercheur post-doctorant

Muriel Jourdan, boursier Praxitèle, depuis le 1er novembre 1994

Chercheurs doctorants

Ahmed Keramane, boursier du gouvernement algérien

Konstantin Kapellos, boursier CIES, jusqu'au 30 juin 1994

Frank Genot, boursier MRES, depuis le 1er novembre 1994

Emmanuel Cordier, boursier MRES, depuis le 1er novembre
1994

Autres personnels

Karine Duprez, stagiaire, DEA d'Automatique

2 Présentation du projet

L'avant-projet BIP, créé au 1er 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. L'intérêt de tels systèmes 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. Ils 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.

Ce thème de recherche cristallise en fait un petit ensemble d'études, dont il représente l'intégration, mais qui sont susceptibles d'avoir leurs débouchés propres en matière d'applications ou de transfert. Il faut également souligner que la nature du thème traité dans BIP implique une ouverture vers d'autres domaines, en particulier celui de la biomécanique (recherche et applications).

3 Actions de recherche

Concevoir un robot bipède pose des problèmes spécifiques au niveau de l'architecture mécanique en raison, entre autres, de son instabilité statique, du principe même de la locomotion alternée, de la structure arborescente à nombreux degrés de liberté qu'il faut considérer.

Parallèlement, la commande d'un tel système ne peut pas s'envisager de façon classique (découplage, poursuite de trajectoires) en raison de la spécificité du problème de la marche et de la nécessité de prendre en compte des informations extéroceptives en ligne. Enfin, les aspects "contrôle" (événements discrets) ont aussi une saveur particulière : il est nécessaire de gérer les enchaînements de phase spécifiques de ce type de locomotion, tout en surveillant le comportement du système,

par exemple au cours de ses interactions avec le sol. Cette problématique amène à structurer naturellement nos axes de recherche en deux thèmes : d'une part les aspects *conception*, avec toutefois la réserve que les études de conception mécanique purement internes au projet seront volontairement réduites, cette compétence y étant représentée de manière minoritaire ; d'autre part les aspects *modélisation et commande*.

3.1 Conception

con

Participants : Bernard Espiau, Ambarish Goswami, Ahmed Keramane, Konstantin Kapellos, Muriel Jourdan

3.1.1 Mécanique

meca

La qualité du déplacement d'un robot marcheur et sa capacité d'adaptation dépendent fortement de ses appuis au sol. Ce point n'a été que fort peu étudié jusqu'à présent. Nous avons donc entrepris la conception d'un pied à mobilités actives, dont nous espérons les principes réutilisables dans une large classe d'applications. Ce travail, effectué en collaboration avec Nicolas Mouly, chercheur post-doctorant du projet SHARP, a conduit à la définition d'une structure parallèle à 2 ou 3 articulations de cheville et comportant un axe de rotation passif élastique. Le dispositif est prévu modulaire, afin de permettre l'intégration de capteurs variés (environnement local, efforts de réactions au sol) et l'évaluation de divers types de revêtements.

Par ailleurs, la conception mécanique complète (structure, mécanismes, actionneurs) d'un robot bipède à 16 degrés de liberté fait l'objet, à notre initiative, d'un projet de collaboration avec le Laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers et le Laboratoire d'Automatique de Grenoble. L'étude est actuellement dans sa phase préliminaire, la mise à disposition des prototypes n'étant pas envisagée avant 1996.

3.1.2 Contrôle/commande

cc

L'objectif général des travaux exposés dans ce paragraphe est la réalisation d'un système de conception assistée pour le contrôle/commande en robotique, avec instantiation d'une version spécifique pour les robots marcheurs.

On s'intéresse donc ici à la spécification, la validation (par vérification formelle, simulation ou visualisation animée), la programmation et l'implémentation de schémas de commande au sens de l'automatique associés à des techniques de contrôle gérant des événements discrets. La difficulté du problème réside dans la multiplicité des aspects à considérer, depuis le temps réel jusqu'à la planification, associée à la complexité des algorithmes à implémenter : lois de commande non-linéaires, automates de très grande taille. Il est d'ailleurs connu que cet état de fait constitue un frein à la pénétration dans l'industrie des résultats de la recherche en matière de contrôle/commande de robots.

Nos travaux se situent dans la mouvance du système ORCCAD ([5]), en relation étroite avec le projet ICARE. Le travail présenté ici a fait l'objet de la thèse de Konstantin Kapellos([1]).

En premier lieu, nous avons poussé l'étude de l'entité clé du système ORCCAD, la *tâche-robot*, en s'intéressant à analyser formellement son comportement. De façon à garantir la fiabilité *a priori* des actions robotiques que nous définissons, nous avons utilisé le calcul de processus associé au langage synchrone ESTEREL pour en démontrer la correction logique, à savoir l'absence de boucles de causalité et la satisfaction de propriétés critiques de sûreté et de vivacité. Puis, pour permettre la conception d'applications robotiques dans le cadre d'une architecture de contrôle comportant des capacités aussi bien décisionnelles que réactives, nous avons conçu et défini l'entité *procédure-robot*, qui représente une action robotique de complexité variable. Elle spécifie, au sein d'un formalisme unique, l'enchaînement logique et temporel des actions robotiques et le traitement de leurs exceptions. Nous avons également étudié la vérification de ses propriétés critiques et la construction de vues abstraites de son évolution comme moyen d'aide à sa spécification et à son analyse.

La modélisation homogène de l'ensemble, tâches-robot et procédures-robot, par modèles de transition, nous a ainsi permis d'effectuer des analyses détaillées de leur fonctionnement. On a par exemple traité un problème de gestion de tâches temps réel dans une procédure-robot qui consiste à déduire, à partir de son évolution, des cas de conflits sur l'utilisation de la même ressource informatique. Par ailleurs, en collaboration avec le projet SPECTRE, on a modélisé en Argos temporisé un schéma de synchronisation de tâches, dans le but de vérifier l'absence de blocage temporel. Ce travail, basé sur un modèle d'automate temporisé, et uti-

lisant les méthodes de vérification formelle associées, sera poursuivi et étendu aux procédures-robot dans le cadre du programme PRAXITÈLE.

Enfin, d'un point de vue pratique, nous avons participé au développement de tâches-robot pour le robot mobile ANIS([14]), en collaboration avec des chercheurs du projet ICARE de l'INRIA Sophia-Antipolis. Nous avons également spécifié et expérimenté, pour un robot manipulateur à six degrés de liberté, une tâche-robot de suivi de trajectoire dans l'espace opérationnel qui permet l'évitement en ligne des singularités géométriques.

Pour l'application de cette approche aux robots marcheurs, il est nécessaire de résoudre deux problèmes supplémentaires : la modélisation et la visualisation 3D. Le premier provient du fait qu'un robot bipède est caractérisé par un modèle mécanique complexe, soumis à des contraintes variables, holonomes ou non. Il est nécessaire d'automatiser sa production et de prévoir son intégration en vue des simulations dynamiques. L'animation est quant à elle nécessitée par le souci de concevoir des lois de commande qui conduisent, si le modèle est anthropomorphe, à des démarches naturelles. Nous avons donc étudié la réalisation de passerelles permettant de connecter à ORCAD les outils algorithmiques et logiciels adéquats. Une collaboration avec le projet SIAMES de l'IRISA a été entreprise dans ce sens. Ce système sera en premier lieu validé sur un modèle simple de bipendule (cf 3.2.2).

3.2 Modélisation et commande

`moco`

Participants : Bernard Espiau, Ambarish Goswami, Ahmed Keramane, Karine Duprez

3.2.1 Etude de la locomotion humaine

`huma` Pour cette étude, nous nous plaçons dans l'hypothèse où l'on cherche à réaliser un robot dont la marche s'apparente à celle de l'homme. Dans beaucoup de robots bipèdes existants, ou en animation, on cherche à suivre des trajectoires articulaires désirées. Or, la marche humaine, extrêmement efficace et élégante, ne repose pas du tout sur un tel principe. On cherchera donc, modestement, à s'en inspirer, en modélisant certains mécanismes générateurs pertinents que l'on tentera de

reproduire au niveau de la commande. Cette étude, en phase de démarrage, fait l'objet d'une collaboration avec le laboratoire TIMC de l'IMAG (équipe de Philippe Cinquin) et le Groupe d'Analyse du Mouvement de l'UFR STAPS de l'Université de Bourgogne. Avec ce dernier laboratoire, sont prévues sous peu des expérimentations permettant de mettre en évidence certains invariants du mouvement.

3.2.2 Commande de robots simplifiés

compas Des études sont en cours actuellement, en collaboration avec le Laboratoire d'Automatique de Grenoble, pour d'une part élaborer des lois de commande optimale, d'autre part déterminer l'effet des modèles choisis de collision avec le sol sur le comportement d'un robot. Ces recherches sont appliquées à un modèle très simplifié de bipède à 3 masses ponctuelles se déplaçant sur un plan incliné, et dont le changement de jambe d'appui s'effectue en un temps nul, le choc, inélastique, étant supposé conserver le moment cinétique. L'analyse de ce système, pourtant simple, s'avère assez délicate, car son comportement résulte de la combinaison d'une dynamique non linéaire continue et d'un enchaînement de pas à temps discret. Divers schémas de commande exploitant le comportement passif du robot ont été proposés ([16, 7]), mais leur validation reste à effectuer. Ces études seront poursuivies, car nous espérons en déduire des résultats de portée générale pour la conception de schémas de commande de robots marcheurs complexes, minimisant d'une certaine façon l'énergie consommée tout en assurant de façon stable une vitesse moyenne de déplacement donnée.

3.2.3 Commande référencée vision

civ

Les robots marcheurs sont destinés à se mouvoir en milieu non manufacturier, donc non totalement contraint, et doivent en conséquence être dotés d'une capacité à surmonter certaines incertitudes sur leur environnement. Nous avons vu en 3.1.2 que l'aspect réactif de l'approche ORCAD offrait une possibilité naturelle de prendre en compte des *événements* provenant de l'environnement. Il reste à considérer le caractère *réflexe* d'un comportement robotique, c'est-à-dire la possibilité d'associer continûment une mesure issue d'un capteur à une loi de commande. La commande référencée vision est l'une des façons possibles d'aborder

le problème. Largement répandue dans la communauté (projets ICARE et TEMIS en particulier), cette approche utilise un modèle explicite des interactions qui fait apparaître les paramètres d'étalonnage de la caméra. Nous avons cette année étudié le comportement de cette commande vis-à-vis d'incertitudes sur lesdits paramètres ([8]). Cette étude a mis en évidence la robustesse de l'approche, autorisant ainsi son emploi sans systématiquement mettre en œuvre une procédure lourde d'étalonnage en cas de changement d'optique ou de déplacement. Ce travail, effectué dans le cadre du projet inter-PRCs VIA, sera poursuivi dans un contexte de non-étalonnage complet, en collaboration avec le projet MOVI ([15]).

4 Actions industrielles

Compte tenu du caractère très récent de l'aspect "robots marcheurs", les actions industrielles de l'équipe concernent des activités pré-existantes, essentiellement autour de l'environnement ORCCAD. Ainsi, les travaux rapportés en 3.1.2, ont fait l'objet d'une collaboration avec la Société Aleph Technologies. Pour l'avenir, une opération de valorisation à partir d'ORCCAD pourrait être étudiée, sous réserve d'une étude plus fine du marché potentiel et de l'adaptation du système aux besoins identifiés. Une telle étude est envisagée avec la Société VERILOG, dans le cadre d'une candidature à un post-doctorat industriel.

Enfin, des contacts suivis existent avec la Société ITMI avec l'objectif de transférer dans des applications notre savoir-faire en commande référencée vision.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

L'équipe est impliquée dans le programme PRAXITÈLE et participe au projet VIA (cf 3.2.3). Bernard Espiau est membre invité du Comité scientifique du PRC-GDR Communication homme-machine. Il a également créé le sous-groupe "robots à pattes" du Groupe Robotique (GDR Automatique), dont il a partagé la responsabilité avec Claude Samson jusqu'en juin 1994.

Bernard Espiau est aussi membre du comité de programme du congrès ORIA et a été invité à donner la conférence d'ouverture au colloque "Automatique, Génie logiciel et Informatique", le 2 juin 1994 à Poitiers.

Il est à l'origine du montage d'une proposition de projet de recherche entre le Laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers, le Laboratoire d'Automatique de Grenoble et l'avant-projet BIP.

5.2 Actions internationales

Bernard Espiau est membre du comité permanent de *International Conference on Advanced Robotics*. Il est éditeur associé du journal *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Ambarish Goswami et Bernard Espiau sont lecteurs pour les revues *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *International Journal of Robotics Research*, *Journal of Robotic Systems*, ainsi que pour de nombreuses conférences internationales.

6 Diffusion des résultats

6.1 Enseignement

Bernard Espiau donne un cours de 15 heures à l'Ecole des Mines de Paris, ISIA, Sophia Antipolis sur la commande de robots, et était responsable jusqu'en 1994 du cours "génération de trajectoires" dans la formation d'ingénieurs "génie robotique et productique" de l'INSTN au CEA.

6.2 Participation à des conférences et colloques

Des membres de l'équipe ont participé à diverses conférences ; on se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste.

7 Publications

Ce rapport étant le premier de l'avant-projet BIP, nous y avons inclus des publications de l'année 1993.

Thèses

- [1] K. KAPELLOS, *Environnement de programmation des applications robotiques réactives*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, novembre 1994.

Articles et chapitres de livre

- [2] F. CHAUMETTE, P. RIVES, B. ESPIAU, «Classification and Realization of the Different Visual-Based Tasks», *in: Visual Servoing*, World Scientific, Singapore, 1993.
- [3] A. GOSWAMI, J. R. BOSNIK, «On a Relationship between the Physical Features of Robotic Manipulators and the Kinematic Parameters Produced by Numerical Calibration», *ASME Journal of Mechanical Design* 115(4), décembre 1993, p. 892–900.
- [4] A. GOSWAMI, A. QUAID, M. A. PESHKIN, «Complete Parameter Identification of a Robot Using Partial Pose Information», *IEEE Control Systems Magazine* 13(5), octobre 1993, p. 6–14.
- [5] D. SIMON, B. ESPIAU, E. CASTILLO, K. KAPELLOS, «Computer-Aided Design of a Generic Robot Controller Handling Reactivity and Real-Time Control Issues», *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 1(4), décembre 1993.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [6] R. ALAMI, R. CHATILA, B. ESPIAU, «Designing an Intelligent Control Architecture for Autonomous Robots», *in: Proceedings of the 1993 International Conference on Advanced Robotics*, p. 435–442, Tokyo, Japan, 1993.
- [7] B. ESPIAU, A. GOSWAMI, «Compass Gait Revisited», *in: Preprints of the 1993 Symposium on Robot Control*, p. 839–846, Capri, Italy, 1994.
- [8] B. ESPIAU, «Effect of Camera Calibration Errors on Visual Servoing in Robotics», *in: Preprints of the 1993 International Symposium on Experimental Robotics*, p. 187–193, Kyoto, Japan, 1993.
- [9] A. GOSWAMI, J. T. LEA, A. QUAID, S. D. S. M. A. PESHKIN, T. C. KINZLE III, «Achieving Surgical Accuracy with Robots using Parameter Identification», *in: First International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (Poster Session)*, Pittsburgh, PA, USA, 1994.
- [10] A. GOSWAMI, M. A. PESHKIN, «Mechanical Computation for Passive Force Control», *in: IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. I(476–481), Atlanta, GA, USA, 1993.

- [11] A. GOSWAMI, M. A. PESHKIN, «Task-space/Joint-space Damping Transformations for Passive Redundant Manipulators», in : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (invited paper)*, p. II(642–647), Atlanta, GA, USA, 1993.
- [12] A. GOSWAMI, A. QUAID, M. A. PESHKIN, «Complete Parameter Identification of a Robot Using Partial Pose Information», in : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. I(168–173), Atlanta, GA, USA, 1993.
- [13] M. A. PESHKIN, A. GOSWAMI, , J. M. SCHIMMELS, «Force-Guided Assembly», in : *31st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Urbana-Champaign, IL, USA, 1993.
- [14] P. RIVES, R. PISSARD, K. KAPellos, «Development of a Reactive Mobile Robot Using Real Time Vision», in : *Preprints of the 1993 International Symposium on Experimental Robotics*, p. 91–100, Kyoto, Japan, 1993.

Rapports de recherche et publications internes

- [15] K. DUPREZ, *Influence d'une calibration incertaine sur un asservissement visuel stéréoscopique*, Mémoire, DEA Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994.
- [16] E. TRUCCHI, *Simulation d'un robot bipède*, Mémoire, DEA Université de Nice, 1993.

8 Abstract

This project addresses major problems related to the design and the control of legged robots, essentially of biped type. One of the main research issues 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. 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; theoretical study of impact effects, optimal control design and simulation analysis of a compass-like robot; realization of a CAD software dedicated to the design, the validation and the implementation of biped robot control laws. Finally, let us mention that a large study is starting, which is aimed at the physical realization of a 16 degrees-of-freedom biped system and of its controller, which

would walk in a quasi-human way on plane terrains and stairs. Many of these researches are conducted in cooperation with other laboratories.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	2
3	Actions de recherche	2
3.1	Conception	3
3.1.1	Mécanique	3
3.1.2	Contrôle/commande	3
3.2	Modélisation et commande	5
3.2.1	Etude de la locomotion humaine	5
3.2.2	Commande de robots simplifiés	6
3.2.3	Commande référencée vision	6
4	Actions industrielles	7
5	Actions nationales et internationales	7
5.1	Actions nationales	7
5.2	Actions internationales	8
6	Diffusion des résultats	8
6.1	Enseignement	8
6.2	Participation à des conférences et colloques	8
7	Publications	8
8	Abstract	10