

Rapport INRIA 1994 — Programme 4
Instrumentation, Commande, Architecture des
Robots Evolués

PROJET ICARE

3 mai 1995

PROJET ICARE

Instrumentation, Commande, Architecture des Robots Evolués

Localisation : *Sophia-Antipolis*

Mots-clés : asservissement visuel (1, 7), autonomie de robot (1, 12, 13), commande de système mécanique (1, 3), commande référencée capteur (1, 7, 13), langage synchrone (12, 13), programmation de niveau tâche (1, 12, 13), réactivité (12, 13), robot manipulateur (1), robotique mobile (1, 7), robotique sous-marine (1, 13), stabilisation de système non linéaire (1, 3), stratégie de prise de mesure (1, 7), système mécanique non holonome (1, 3, 7), temps réel (1, 7, 12, 13), vérification de programme (12, 13).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Claude Samson, (directeur de recherche)

Secrétariat

Corinne Zuzia

Personnel Inria

Eve Coste-Manière, (chargé de recherche)

Patrick Rives, (directeur de recherche)

Daniel Simon, (chargé de recherche)

Jean-Jacques Borrelly, (ingénieur de recherche)

Patrick Itéy, (ingénieur d'études)

Ingénieur expert

Roger Pissard-Gibollet

Chercheurs doctorants

Eduardo Castillo Castaneda, (Bourse du Gouvernement Mexicain)

David Djian, (Bourse Inria puis HCM, en détachement à Oxford University)

Charles François, (Bourse X)

Gilles Guyot, (Rémunéré par l'entreprise CIMELOG)

Pascal Morin, (Bourse DGA jusqu'à octobre 1994, puis Bourse Centre)

Aristide Santos, (Bourse Région Paca/Ifremer)

Stagiaires

Nicolas Turro, (DEA Robotique & Vision, université de Nice Sophia Antipolis, du 14 février au 14 septembre)

Marc Tissier, (DEA Robotique & Vision, université de Nice Sophia Antipolis, du 14 février au 30 juin)

Chercheurs invités

Zhong-Ping Jiang, (Australian National University, du 1er octobre 1993 au 30 avril 1994)

Paul Freedman, (CRIM, Québec, du 11 au 15 septembre)

Robert Mc Ghee, (Naval PostGraduate School, du 11 au 22 avril)

Howard Wang, (Stanford University, du 19 septembre au 16 octobre)

Antony Healey, (Naval PostGraduate School, du 19 au 23 septembre)

Bob Bitmead, (Australian National University, du 1^{er} octobre au 31 décembre 1994)

2 Présentation du projet

Les activités du projet ont pour cadre la commande des systèmes mécaniques (robots manipulateurs, robots mobiles, véhicules sous-marins,...) dotés de dispositifs sensoriels (capteurs à ultra-sons, infrarouges, vision,

centrale inertielle,...) et utilisés pour la réalisation de tâches complexes impliquant une forte interaction avec l'environnement.

La spécificité de la recherche menée dans ce cadre résulte d'un constat s'appuyant sur notre expérience des systèmes dynamiques rapides, décentralisés et multitâches, que sont les systèmes robotiques : la chaîne de commande, depuis les études d'analyse et de synthèse des algorithmes de commande, jusqu'à l'implémentation de ces algorithmes sur la machine physique, en passant par les méthodes et outils de programmation mis à la disposition de l'utilisateur, forme un tout indissociable dont la cohérence est cruciale à la réalisation d'applications robotiques avancées.

De ce fait, notre vision du problème de commande des robots ne se résume pas à l'approche automatique traditionnelle axée sur l'algorithmique de commande. Elle implique, en complémentarité des différents thèmes abordés (théorie de la commande, aspects capteurs, programmation et architecture temps réel), le souci de développer une méthodologie d'intégration de l'ensemble des maillons de la chaîne de commande. Dans ce but, un effort important est consacré au développement d'une structure expérimentale propre au projet, notamment autour d'un robot mobile et de cartes temps réel de traitement d'images. Ce système constitue un banc d'expérimentation pour l'ensemble des axes de recherche du projet. Nous essayons en parallèle de développer d'autres moyens expérimentaux dans le cadre de partenariats et avec l'IFREMER en particulier.

3 Actions de recherche

3.1 Algorithmique et aspects théoriques de la commande des robots

Contrôler le mouvement des robots dans le but de réaliser des tâches de nature manufacturière (assemblage de pièces, opérations de soudage, ...) ou non manufacturière (interventions en milieu hostile, inspection de sites, ...) relève fondamentalement de l'application de l'Automatique et de la Théorie de la Commande. Tout robot en exploitation met en oeuvre des algorithmes de commande qu'il a fallu à un moment donné étudier et concevoir en fonction des caractéristiques mécaniques du robot et des performances à atteindre. L'exploration de nouvelles techniques de commande adaptées aux caractéristiques mécaniques spécifiques à chaque

type de robot (bras manipulateur, robot mobile, robot à pattes,...) constitue un des axes de recherches du projet. Historiquement, et en liaison avec la forte expansion de la robotique manufacturière des décennies 70 et 80, les premières études menées par l'INRIA dans ce domaine ont porté sur la commande des bras manipulateurs. En prévision de la montée en puissance d'une Robotique plus axée sur les opérations de *service* et d'*intervention en milieu hostile*, le projet Icare se propose de porter, dans les prochaines années, un effort particulier sur l'étude de la commande des robots mobiles, qu'ils soient sur roues ou à base de locomotion articulée.

3.1.1 Stabilisation en un point de robots mobiles par retour d'état instationnaire

Participants : Claude Samson, Jean-Baptiste Pomet (Miaou)

Dans le contexte de la stabilisation de véhicules non-holonomes à une posture désirée nous avons mis en évidence, pour les systèmes pouvant se mettre sous forme canonique chaînée, une méthode de synthèse de retours d'état continus instationnaires (c.à.d. dépendant du temps) assurant une convergence *exponentielle* de l'erreur de posture vers zéro [22, 12]. Cette méthode repose sur l'utilisation des propriétés des systèmes homogènes d'ordre zéro et leur extension au cas instationnaire. Le résultat prolonge celui de convergence *polynomiale* obtenu dans le cas de retours d'état instationnaires différentiables, ainsi que les premières tentatives de McCloskey et Murray allant dans ce sens et pour lesquelles l'analyse de stabilité était incomplète. Il répond également à la critique de convergence "lente" parfois associée à l'utilisation de retours d'état instationnaires.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Esprit BRA "PROMotion".

3.1.2 Stabilisation en attitude d'un satellite par retour d'état instationnaire

Participants : Pascal Morin, Claude Samson, Jean-Baptiste Pomet (Miaou), Zhong-Ping Jiang (Australian National University)

Pour réguler l'orientation d'un satellite, on dispose généralement de trois commandes (correspondant par exemple aux couples engendrés par trois paires d'actionneurs à jets de gaz), permettant de modifier

en intensité et dans une direction quelconque le vecteur instantané de rotation de l'engin. Dans ce cas, la stabilisation de l'orientation d'un satellite à une orientation désirée ne pose pas, en théorie, de difficulté. Si l'un des actionneurs tombe en panne, on ne dispose alors plus que de deux commandes. On peut alors montrer qu'il n'existe pas de retours d'état continus autonomes (i.e. du type $u(X)$) assurant une stabilisation asymptotique de l'orientation du satellite. Notre travail a consisté à synthétiser des lois de commande différentiables instationnaires (du type $u(X, t)$) assurant cette stabilisation asymptotique. L'approche considérée fait appel à la théorie de la variété centre et utilise également des techniques de moyenne et de Lyapunov [20, 10].

3.1.3 Commande d'un monopode planaire

Participants : Charles François, Claude Samson

Certains concepts de base de la locomotion peuvent être appréhendés par l'étude de la commande du monopode planaire. Plusieurs méthodes de commande ont été proposées et validées expérimentalement par d'autres équipes de recherche. Elles consistent essentiellement en l'asservissement de la position du pied pendant les phases de vol, en vue de l'atterrissage suivant. Ces méthodes se révèlent coûteuses en énergie consommée par les actionneurs et ne sont pas, pour cette raison, très satisfaisantes. Il est pourtant connu que, lorsqu'il est pourvu d'une structure mécanique adéquate basée sur l'utilisation de ressorts non dissipatifs, le monopode planaire possède des équilibres dynamiques naturels instables correspondant à des allures de course à vitesse constante sur sol horizontal [8]. Ceci nous a amené à aborder le problème de la commande du monopode planaire comme un problème de stabilisation de ces équilibres dynamiques de sorte à atteindre un double objectif: stabilisation de la vitesse horizontale du monopode planaire à une valeur désirée quelconque (dans la plage permise par la structure mécanique), et apport énergétique des actionneurs théoriquement nul lorsque l'équilibre est atteint. Le problème ainsi formulé pose cependant un certain nombre de difficultés théoriques. En effet, stabiliser des cycles dynamiques naturels du monopode planaire nécessite d'une part de connaître ces cycles et d'autre part de disposer d'un modèle de la dynamique du mécanisme dans une section de Poincaré. Pour cela, il faut être capables d'intégrer complètement les équations de la dynamique du mécanisme dans chacune des phases qui composent son mouvement, ce qui n'est malheureusement pas

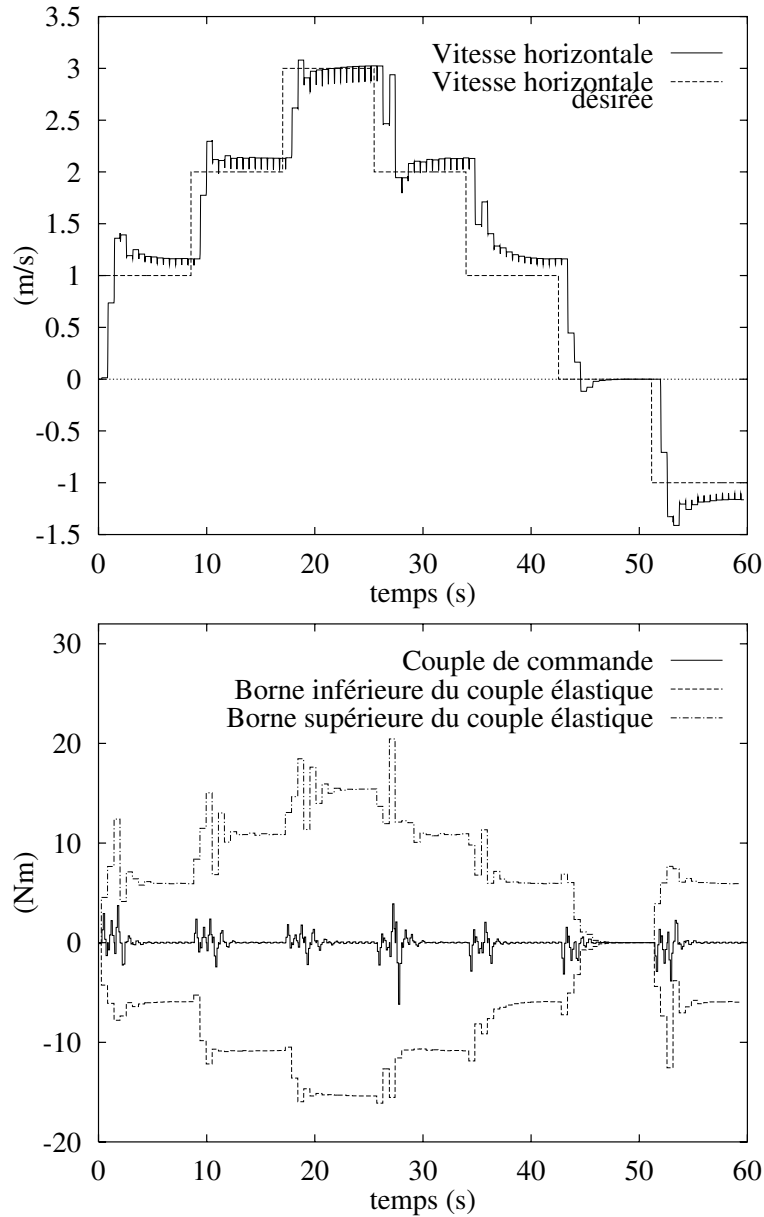


Figure 1 : Cet exemple présente la réponse du monopode planaire à un changement de vitesse désirée. Celle-ci passe successivement de 1 à 2 m/s, puis 3, 1, 0 et -1 m/s. Pour chaque vitesse désirée, le robot fait 15 pas. La durée totale de la simulation est d'environ une minute

possible. Nous nous sommes de ce fait orientés vers une détermination approchée des équilibres dynamiques et une approximation linéaire de la dynamique du mécanisme. Les commandes que nous avons obtenues de cette façon sont, à notre connaissance, originales et ont déjà permis de montrer en simulation que l'on pouvait stabiliser la vitesse horizontale du monopode sur un cycle proche du cycle naturel, ce qui se traduit par une très bonne efficacité sur le plan énergétique.

Ce travail s'inscrit aussi dans le cadre du projet Esprit BRA "PROMotion".

3.2 Acquisition et exploitation de données sensorielles

Lors de la réalisation d'une tâche, un système robotique est amené à interagir avec son environnement local. Cette interaction peut prendre différents aspects : actions de la part du robot sur son environnement (assemblage, manutention...), réactions vis à vis d'évènements provenant de celui-ci (évitement d'obstacles, coopération avec d'autres systèmes automatisés...). Le contrôle de cette interaction entre le robot et son environnement local est indispensable tout au long de l'exécution d'une tâche. Elle doit se traduire par la prise en compte explicite d'informations perceptuelles d'une part dans la constitution de boucles de commande robustes (aspect continu) et d'autre part dans la détection des évènements nécessitant une modification du comportement du système (aspect réactif). Ce contexte particulier impose de fortes contraintes Temps réel qui influenceront de façon drastique sur le choix des méthodes au niveau de la perception. De plus, la finalité des approches s'exprimera en termes de convergence, stabilité et robustesse au niveau de l'exécution de la tâche. Les approches que nous développons puisent leur source dans le domaine de l'identification, du contrôle et de la théorie des systèmes à événements discrets. Elles tentent de répondre aux questions suivantes : quelle est l'information nécessaire et suffisante pour accomplir une tâche donnée, comment l'acquérir et comment l'utiliser au sein d'un schéma de contrôle robuste? Elles s'appuient sur l'idée que la réalisation d'une tâche robotique peut être assimilée à un enchaînement de tâches élémentaires réalisant un contrôle des interactions entre le robot et son environnement local par le biais de lois de commande référencée capteur. Cette idée est applicable à différents capteurs utilisés en robotique (odométrie, capteurs d'effort, centrale inertielle, proximétrie, vision locale...).

3.2.1 Application des techniques d'asservissement visuel à la robotique mobile

Participants : Roger Pissard-Gibollet, Patrick Rives

Ce thème concerne la transposition des techniques d'asservissement visuel appliquées aux manipulateurs, au domaine de la robotique mobile. Une des difficultés réside dans la présence de contraintes non holonomes qui se traduit par le fait que l'espace des configurations a une dimension supérieure à celle de l'espace de commande. De ce fait, pour une configuration donnée du robot, certaines directions de déplacement ne sont pas physiquement réalisables. Une conséquence découlant de l'existence de telles contraintes est que l'approche *fonction de tâche*, basée sur des retours d'états continus, développée dans le cadre des robots manipulateurs holonomes, ne s'applique plus pour les robots non holonomes. Cela entraîne que, dans le cas de l'asservissement visuel, le schéma classique de commande en vitesse amenant à une convergence exponentielle, n'est plus utilisable. Pour éviter ce problème, nous avons exploré l'approche qui consiste à rajouter des degrés de mobilité au niveau de la caméra par exemple en la montant sur un porteur à plusieurs degrés de liberté. On montre alors que, hormis quelques configurations limites, le jacobien de l'ensemble robot mobile + porteur caméra est toujours de rang plein et qu'il devient alors possible de contrôler le repère caméra en position et orientation en utilisant les mêmes types de commande que celles développées dans le cadre des robots holonomes.

Une validation expérimentale de ces résultats a été menée, cette année, pour une tâche de positionnement sur une cible constituée par un cône. D'autres tâches élémentaires d'asservissement visuel telles que le suivi de lignes ou la rotation autour d'arêtes verticales sont en cours de définition. En nous rattachant au formalisme des liaisons virtuelles, nous espérons ainsi constituer un catalogue de primitives d'asservissement visuel qui nous permettra, en les enchainant, de faire évoluer un robot mobile dans un environnement constitué d'objets simples (polyèdres, cylindres, sphères...) sans avoir à reconstruire explicitement cet environnement. Ce travail fait en partie l'objet de notre contribution au projet inter-PRC VISION INTENTIONELLE ET ACTION soutenu par le MRT.

Le système robotique expérimental sur lequel nous avons validé notre approche est décrit dans la section 3.5. Les aspects coopération Base

mobile + Bras seront également approfondis dans le cadre de notre contribution au sein du projet Esprit BRA UNION.

3.2.2 Vision intentionnelle et réactivité pour la réalisation de tâches robotiques

Participants : Patrick Rives, David Djian, Roger Pissard-Gibollet

Cette action de recherche initialisée dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe TEMIS de l'IRISA à Rennes se poursuit maintenant dans le cadre du projet inter-PRC VISION INTENTIONNELLE ET ACTION soutenu par le MRT. Elle concerne l'étude du couplage perception/action dans le cadre de la réalisation de tâches robotiques. Elle s'appuie sur les résultats acquis au sein du projet dans le domaine de la commande référencée capteur et plus particulièrement de l'asservissement visuel. La démarche que nous développons est basée sur la décomposition d'une tâche complexe en une combinaison de tâches élémentaires d'action (suivre un mur, tourner autour d'un coin,...) et de perception. Les tâches d'action s'appuient sur les techniques d'asservissement visuel présentées précédemment. Une tâche de perception est constituée par :

- un but, la détection d'obstacles dangereux pour le robot;
- un ensemble d'*observateurs* ayant pour mission de détecter et de caractériser les informations visuelles contenues dans des zones spécifiques de l'image;
- un mécanisme capable de gérer le positionnement de ces observateurs en fonction du but à atteindre et de l'état courant du système;
- un mécanisme de décision permettant d'identifier l'état de la tâche de perception et de produire en sortie un vecteur de mesures et des événements logiques caractérisant cet état;

Cette approche implémente le concept de *capteur intelligent* et est particulièrement adaptée au système de vision Temps réel développé dans le projet et décrit dans la section 3.5. Elle est également totalement compatible avec les formalismes développées dans l'axe ATELIER DE GÉNIE LOGICIEL POUR LA ROBOTIQUE (voir section 3.3).

L'effort de recherche a porté cet année sur l'étude des mécanismes de gestion et de décision. Il s'est fait dans le cadre d'une collaboration étroite avec le Robotics Research Group de l'Université d'Oxford par le biais

d'une bourse HCM couvrant le séjour à Oxford jusqu'en Septembre 1995 de David Djian, un des étudiants en thèse du projet. Des résultats ont été obtenus avec une approche de type prédiction/propagation/vérification d'hypothèses s'appuyant sur des réseaux Bayésiens. Elle permet par exemple, à partir de la détection de droites et de coins, d'identifier la présence d'une porte ou d'une fenêtre dans une image.

L'ordonnancement des tâches de perception et d'action pour réaliser une tâche robotique complexe constitue un vaste domaine d'études que nous limitons, dans un premier temps, à des approches purement *réactives*. Dans ce type d'approche, les vecteurs de mesures produits par les tâches de perception sont utilisés pour constituer les feedbacks des boucles d'asservissement et les événements logiques sont utilisés pour gérer l'enchaînement des tâches. Dans la pratique, ces événements seront utilisés pour faire transiter les états d'un automate que nous pensons implémenter au moyen du langage synchrone ESTEREL.

Afin de valider notre approche, nous avons choisi de l'appliquer à une tâche d'exploration et de cartographie d'une scène d'intérieur par un robot mobile. Ce choix est guidé par le fait que ce type d'environnement est globalement inconnu mais que l'on possède une connaissance sur le type de structures que l'on sera susceptible d'y rencontrer. Cette expérimentation constitue notre contribution au démonstrateur prévu dans le projet inter-PRC VIA.

3.2.3 Traitement d'image à cadence vidéo pour des applications d'asservissement visuel

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Marc Tissier

Utiliser des informations provenant de capteurs extéroceptifs au sein d'une boucle d'asservissement nécessite des cadences d'acquisition et de traitement compatibles avec la dynamique du processus commandé. Ce problème devient vite crucial dans le cas de capteur tel que la vision par nature lent et fournissant de gros volumes de données à traiter. Cela nous a amené, d'une part à concevoir un système de vision Temps réel dédié (paragraphe 3.5) et d'autre part, d'étudier des algorithmes de traitement d'images utilisant au mieux les possibilités de l'architecture de ce système. Ce dernier contexte a fait l'objet d'un travail de stage dans le cadre du Dea de Robotique et Vision de l'Université de Nice.

Il s'agissait d'implémenter un algorithme efficace permettant d'extraire précisément les droites et les jonctions de droites (coins) contenues dans une région d'intérêt de l'image. Les algorithmes qui ont été développés sont basés sur la décomposition de la fonction intensité sur une base de polynômes complexes, les polynômes de Zernike, formant un ensemble complet orthogonal à l'intérieur du cercle unité.

Le polynôme de Zernike V_{nm} peut être exprimé en coordonnées polaires (ρ, θ) , comme :

$$V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho)e^{jm\theta}$$

où $n \geq 0$ et $n - |m|$ est un entier pair positif. $R_{nm}(\rho)$ est un polynôme défini comme:

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-|m|}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!}$$

Les fonctions de V_{nm} sont orthogonales et satisfont la relation suivante:

$$\int_{x^2+y^2 \leq 1} \int_{\leq 1} V_{nm}^*(x, y) V_{pq}(x, y) dx dy = \frac{\pi}{n+1}$$

ssi $n=p$ et $m=q$. et 0 ailleurs

Il est alors possible de caractériser la fonction intensité $f(x, y)$ d'une image par une série de moment de Zernike dont le terme générique A_{nm} , dans le cas discret, est :

$$A_{nm} = \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad x^2 + y^2 \leq 1.$$

On peut montrer [25] que les deux moments A_{11} et A_{20} suffisent à caractériser les paramètres d'une droite dans l'image, et que l'ajout du moment A_{22} permet de caractériser les coins. Au niveau de l'implémentation, le calcul de ces moments se réalise par des produits de convolution entre l'image et des masques précalculés. Il faut noter que ce type de calcul est très adapté à notre architecture qui possède des convolveurs câblés VLSI.

Les résultats expérimentaux ont permis d'extraire, à la cadence vidéo, des droites avec une précision subpixel dans des fenêtres de 50X60 pixels contenant environ 300 points de contour. Il faut également noter que les détecteurs de droite et de coins sont intégrés dans un même code de calcul.

3.3 Atelier de génie logiciel pour la robotique

Participants : Daniel Simon, Jean-Jacques Borrelly, Eduardo Castillo Castaneda, Konstantinos Kapellos (Inria Rhône-Alpes), Bernard Espiau (Inria Rhône-Alpes), Eve Coste-Manière, Paul Freedman (Crim)

Les systèmes robotiques sont des exemples de processus décentralisés, multitâches et à dynamiques rapides. La programmation de ces systèmes est complexe, difficile et fait l'objet de nombreuses études. Aux aspects classiques de convivialité des interfaces et de réutilisabilité du logiciel s'ajoutent des contraintes d'efficacité à l'exécution en temps réel et de fiabilité des programmes produits. Ce dernier point est particulièrement critique dans le cas de robots autonomes opérant en milieu hostile.

L'atelier de génie logiciel Orccad est développé au sein du projet dans cette optique. Il doit permettre à des utilisateurs de compétences différentes de prendre en compte dans une démarche de développement cohérente ces différents aspects, relevant de l'automatique et de l'informatique.

La version actuelle permet à un automaticien de décomposer, de structurer et de vérifier, via une interface graphique manipulant des objets C++, les algorithmes de commande de robots sous forme de tâches informatiques temps-réel communicantes. L'algorithme de commande obtenu est encapsulé dans un comportement logique codé en Esterel permettant de spécifier les conditions de démarrage et d'arrêt de la tâche de commande élémentaire ainsi que les traitements d'exceptions génériques liés à cette tâche susceptibles de survenir au cours de son exécution. Les *Tâches-robots* ainsi obtenues peuvent être combinées de façon récursives, toujours sous le contrôle de programmes Esterel, dans des procédures fiabilisées mises à disposition de l'utilisateur final du système pour construire des missions robotiques complexes. L'utilisation du langage Esterel pour coder le comportement de ces actions complexes permet d'effectuer, de façon plus ou moins automatique, des vérifications logiques sur ce comportement ¹.

Des méthodes d'analyse du comportement temporel des tâches synchronisées ont été développées pour détecter avant simulation des incohérences de spécification dans le schéma de synchronisation des tâches temps-réel. La partie périodique de ces tâches et des mécanismes de

¹K. Kapellos, "Environnement de programmation de applications robotiques réactives", *Thèse de L'Ecole des Mines de Paris*, Novembre 1994

communication associés est modélisée sous forme de réseaux de Petri temporisés. L'analyse des invariants de marquage permet la détection de blocage structurels dûs à un mauvais choix ou un mauvais placement des ports de communication. La recherche de régime périodique dans le fonctionnement de la tâche-robot permet de détecter des fonctionnements malsains dûs par exemple à des doubles synchronisations. Le logiciel correspondant, codé en C, pourra être intégré dans une version future de l'interface graphique [19], [1].

Les expérimentations réalisées depuis un an ont mis en lumière les faiblesses de la première version du système et motivent actuellement une refonte des spécifications d'Orccad. Les générateurs de code demandent notamment une sérieuse optimisation, en particulier pour produire du code multiprocesseur. L'utilisation de nouveaux outils graphiques doit permettre de réaliser une interface de programmation plus évolutive. La gestion fiable et efficace du séquençement de lois de commande, en partie étudiée théoriquement, reste à être implantée.

3.4 Robotique sous-marine

3.4.1 Modélisation et commande référencée capteurs de véhicules sous-marins

Participants: Aristide Santos, Daniel Simon, Claude Samson, Patrick Rives, Robert Bitmead (Australian National University)

Cette action a débuté en 1992 dans le cadre d'un projet MAST et concerne la conception générale du système de pilotage de véhicules sous-marins autonomes à long rayon d'action. Naviguer en milieu peu ou pas connu impose naturellement l'utilisation de capteurs extéroceptifs et le souci de minimiser l'énergie de propulsion conduit à concevoir des véhicules avec axe de déplacement préférentiel posant des problèmes de commande particuliers.

L'étude portant sur l'architecture des capteurs d'altitude [24] a permis de proposer, à l'aide de l'analogie entre la liaison véhicule-environnement et les contacts mécaniques, des architectures minimales, avec éventuellement une procédure de redondance pour améliorer la robustesse des données capteurs ou la couverture spatiale. Elle a aussi permis de souligner le caractère somme toute limité de ce type d'étude, les résultats obtenus étant fortement dépendant des caractéristiques physiques des capteurs utilisés dont les modèles sont encore assez mal connus.

Concernant les actionneurs, le critère de comparaison adopté est le rapport poussée/trainée. Le caractère incontournable des propulseurs à hélices comme actionneurs axiaux a été mis en valeur [23]. Quant aux actionneurs latéraux, la frontière d'utilisation optimale des propulseurs à hélices et des ailes mobiles dans les tranches de vitesse qui nous intéressent (2-5 nœuds) ne permet pas de trancher de manière définitive entre ces deux types d'actionneurs. La configuration "plan canard" permet un meilleur découplage de la commande et une meilleure répartition des forces sur les actionneurs, mais paraît poser des problèmes d'encombrement et de fragilité du véhicule. Le lest mobile ne peut être qu'un actionneur de réglage.

L'intégration des données capteurs dans une boucle de commande du véhicule doit prendre en considération l'architecture des actionneurs disponibles. Deux grandes classes sont à distinguer : les véhicules à actionneurs surdimensionnés sur les six degrés de liberté (ex: le VORTEX d'Ifremer), et les véhicules à actionneurs sous-dimensionnés, qui constituent la grande partie des futurs sous-marins à grand rayon d'action actuellement en conception. Pour les premiers, l'approche par "fonction de tâche" a été appliquée de manière à permettre la prise en compte simultanée de tâche de suivi de fond et d'évitement d'obstacle. Une première application est basée sur la minimisation d'un critère quadratique faisant intervenir les fonctions primaires de suivi de fond et d'évitement d'obstacle [15], [16], [17]. Une seconde permet de passer de manière continue d'une fonction de tâche à l'autre. Pour les véhicules sous-dimensionnés du point de vue de leur architecture d'actionneurs, des lois de commande dérivées des résultats obtenus en robotique mobile au sein du projet ont été proposées, de même qu'une procédure de gestion des données capteurs basée sur le test de Hinkley dans le cas des fonds variables présentant des ruptures brutales.

3.4.2 Programmation de missions

Participants: Eve Coste-Manière, Nicolas Turro, Michel Perrier (Ifremer), Alexis Peuch (Ifremer), Howard Wang (Stanford)

Ces travaux de recherche s'organisent autour de la programmation de *missions* pour systèmes robotiques semi-autonomes ou autonomes. Il s'agit de poursuivre les études sur les architectures de commande et de perception d'engins autonomes, semi autonomes ou téléopérés (par exemple sous-marins dans le cadre du projet UNION) en se positionnant

au niveau d'abstraction où l'utilisateur du système manipule différentes entités (actions et fonctions d'observations) pour atteindre les buts de diverses missions (programmation au niveau tâche). Une mission robotique peut être considérée comme la succession dans le temps de l'exécution d'actions dont l'activation et la terminaison dépendent d'événements internes ou externes perçus par le système de commande via différentes fonctions d'observations telles que des capteurs intelligents (cf 3.2 dans le cas de la vision et [6],[26] pour l'étude de l'intégration d'une fonction de prévision sur le déroulement de la mission). Initialement, ESTEREL a été choisi comme langage de programmation de missions. L'approche synchrone permet en effet de traiter dans un cadre formel la réactivité inhérente aux systèmes robotiques. De plus, elle rend la programmation des comportements déterministe et permet d'effectuer des vérifications qui assurent la fiabilité du système. Cependant, ESTEREL est difficilement manipulable par un utilisateur non expert. Le but est alors d'étudier la définition de primitives de manipulation (un langage) de haut niveau, traduites en ESTEREL pour spécifier et valider les différentes missions à réaliser [26]. L'outil CENTAUR développé dans le projet CROAP a permis de prototyper et d'étendre ces primitives.

Une des extensions actuelles de ce travail est de proposer une syntaxe et une sémantique pour définir rigoureusement ces primitives en prenant en compte les résultats ². En outre, pour permettre de considérer des niveaux d'abstraction identiques entre les différents contrôleurs de robots rencontrés dans le cadre de nos collaborations et le niveau de programmation de mission, nous étudions également (en collaboration avec Stanford) la définition de l'interface entre ces différents niveaux [28],[30]. Pour ce faire, nous avons proposé de définir une *mission commune* [27] exécutable par les différents véhicules expérimentaux de nos partenaires en robotique sous-marine pour étudier, valider et comparer les capacités de programmation, au niveau mission, offertes par les différentes approches adoptées. Cette mission sera exécutée sur les véhicules de Stanford/Monterey Bay Aquarium Research Institute, du Naval Postgraduate School et de l'Ifremer. A terme, l'analyse des méthodes de programmation mises en oeuvre, permettra de définir de façon générique les caractéristiques requises par un système de contrôle haut niveau pour véhicules autonomes et semi-autonomes. Une première comparaison est proposée dans [29].

²K. Kappalos, "Environnement de programmation de applications robotiques réactives", *Thèse de L'Ecole des Mines de Paris*, Novembre 1994

3.4.3 Campagne d'expérimentation à l'IFREMER

Participants : Eve Coste-Manière, Roger Pissard-Gibollet, Patrick Rives, Daniel Simon, Michel Perrier (Ifremer), Alexis Peuch (Ifremer), Vincent Rigaud (Ifremer)

Nous avons participé à une campagne expérimentale sur le véhicule VORTEX (Versatile and Open subsea Robot for Technical EXperiments) développé à l'IFREMER. C'est une plateforme motorisée et instrumentée de type ROV ("Remotely Operated Vehicle") permettant de mettre en oeuvre et valider en piscine ou en mer peu profonde des lois de commande et des architectures de programmation destinées aux futurs véhicules sous-marins de l'IFREMER. Plusieurs résultats du projet ont été utilisés lors de cette étude.

- Une étude comparative entre les contrôleurs ORCCAD et PIRAT développé par l'IFREMER Toulon a été menée dans un but de rapprochement [21]. A cette occasion ORCCAD a été porté au Laboratoire de Robotique et d'Intelligence Artificielle de l'IFREMER en début d'année. Il a été validé sur une tâche-robot d'immersion.
- Un nouveau prototype d'une mission pour le VORTEX, plus sophistiquée que celle précédemment étudiée, a été codé en ESTEREL. La couche logicielle nécessaire à l'exécution de programmes ESTEREL dans un environnement asynchrone a été réalisée pour permettre son exécution par le VORTEX [11]. La validation complète (aux niveau mission et commande) de cette mission a été freinée par la mise au point de certains algorithmes de commande à développer sur le véhicule. De nouvelles expérimentations sont donc à prévoir [27]. Notons que, dans le cadre de cette étude, différentes approches ont été envisagées : une approche bottom-up [18], [11] en cours de validation, une approche top-down [13] prospective.

3.5 Moyens expérimentaux

3.5.1 Laboratoire de robotique

Participants : Jean-Jacques Borrelly, Patrick Itey, Roger Pissard-Gibollet

Le laboratoire de robotique met à disposition des utilisateurs du projet ICARE trois plateformes expérimentales. Chacune de ces plateformes

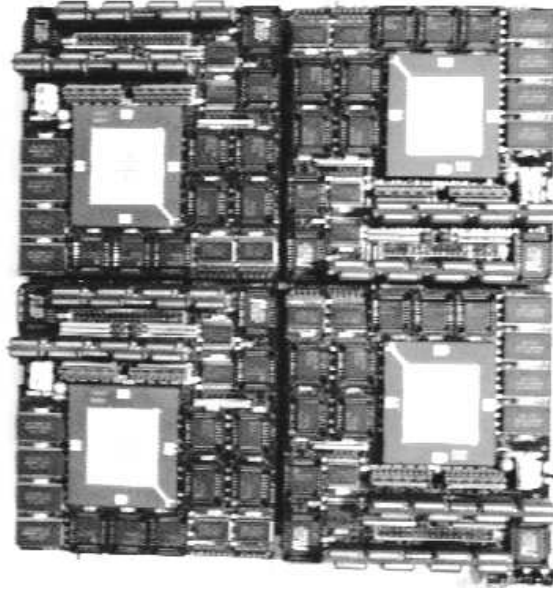


Figure 2 : Systèmes de traitement d'images temps réel

(éventuellement multi-processeurs) fonctionne sous un système opératoire temps-réel (VxWorks). Tous les noyaux temps-réel correspondants possèdent l'option multi-processeurs (VxMP) et l'option d'analyse temps-réel (windView). Ces plateformes sont interconnectées entre elles et reliées au réseau général par ETHERNET.

- *Système de traitement d'images Temps Réel*

Le système modulaire de traitement de séquences d'images (figure 2) destiné aux applications de type asservissement visuel est composé de trois cartes :

- la carte WINMAN assurant la gestion de l'ensemble ;
- la carte WINDIS développée par le Laboratoire d'Electronique de Clermont Ferrand prend en entrée un flot vidéo compatible avec le bus DATACUBE (P3) et produit en sortie un flot de données fenêtre comportant la liste des points d'intérêt détectés ainsi que les informations pixel pour chaque fenêtre distribuée ;
- la carte WINPROC conçue par l'INRIA dans une optique modulaire permet de traiter le flot des données fenêtre pour en

extraire des informations utiles aux applications d'asservissement visuel. Cette carte possède 1M octets de mémoire statique 20 nanosecondes, et supporte quatre modules de traitement DSP96002 fonctionnant à 33 MHz. Chaque module est équipé d'une mémoire de 1M octets et de deux plans images fonctionnant en alternance. Chaque plan possède une mémoire de 256K octets et une mémoire FIFO pour stockage des coordonnées des points d'intérêt.

L'addition de deux modules supplémentaires n'a pas montré de problème particulier tant au niveau matériel qu'au niveau logiciel. Ce système a été intégré en deux exemplaires, un à l'INRIA, l'autre au Laboratoire d'Electronique de Clermont Ferrand, chaque exemplaire comportant quatre modules de traitement DSP.

Le logiciel d'exploitation de ces différentes cartes a été *instrumenté* avec des marqueurs 'WINDVIEW' afin de permettre une analyse temporelle détaillée des opérations de traitement des images, y compris une possibilité d'analyse temporelle du déroulement des programmes DSP.

Ce logiciel comporte deux niveaux :

- Logiciel de base (drivers) permettant l'accès aux différentes ressources du système (mémoires et registres) ainsi que le traitement des diverses interruptions.
- Logiciel de gestion d'une application permettant divers types de distribution des fenêtres d'intérêt (multi-fenêtre, multi-DSP, multi-cadencée).

Ce logiciel assure à la fois les aspects configuration des différentes structures de données impliquées et les aspects exécution et vérification du respect des contraintes temporelles liées à l'application.

Une industrialisation de ce système est envisagée.

- *Plateforme mobile avec système de perception*

Ce robot est composé d'une base mobile à deux roues motrices commandées en différentiel sur laquelle a été montée une caméra commandable en tangage et lacet. Une carte d'asservissement-six-axes d'usage général a été développée autour de composants HCTL 1100 permettant l'implémentation de lois de commande variées et le contrôle de différents types de moteurs. Le robot mobile est équipé d'un Rack VME embarqué susceptible d'accueillir douze

cartes. Il peut être rendu totalement autonome grâce à la présence de deux batteries embarquées. Cependant, lors du développement d'application, il fonctionne avec un ombilical fournissant énergie, liaison vidéo et liaison Ethernet. Le traitement visuel est alors assuré par le système de vision présenté précédemment.

Un driver pour la carte d'asservissement a été développé de manière à permettre une programmation simplifiée du robot. Ce driver permet d'utiliser plusieurs types d'asservissements (position, vitesse, pseudo-vitesse, trapézoïdal). Il assure notamment un réglage correct des différents asservissements.

Il est prévu de doter cette plateforme de capteurs ultrasonores.

- *Système multi-processeurs*

Ce système est d'usage général et a été conçu à partir de cartes CPU standard (MVME167, FORCE 33).

3.5.2 Outils de simulation

Participants : Jean-Jacques Borrelly, Roger Pissard-Gibollet, David Djan

SIMPARC permet de simuler le comportement d'un système physique, par exemple un robot, soumis aux commandes calculées par des programmes s'exécutant sur une machine simulée. La machine est décrite sous forme de composants (processeurs, bus, mémoires, horloges...), et peut représenter un système multiprocesseur. Un composant spécial permet d'intégrer en parallèle les équations différentielles décrivant le processus.

Il est également possible de simuler des programmes multi-tâches grâce à SIMPARCOS dont la syntaxe des appels système est proche de celle de VxWorks, bien que le nombre de ces appels ait été limité au strict minimum permettant de décrire des applications multitâches et multiprocesseurs. SIMPARCOS utilise la notion de mémoire partagée et de base de noms pour la représentation de ses objets (sémaphores, files de messages, partitions) communs.

Les activités liées à la commande référencée-capteurs et l'action PRAXITÈLE nous ont amené à développer de nouveaux composants permettant de décrire l'environnement sous forme de liste de points ou de segments. Les composants de type capteur associés ont également été développés. Le portage de SIMPARC sous SOLARIS (sun) et OSF (dec alpha) est envisagé.

3.5.3 Outils d'aide à la programmation

Participants : Jean-Jacques Borrelly, Patrick Itey, Roger Pissard-Gibollet

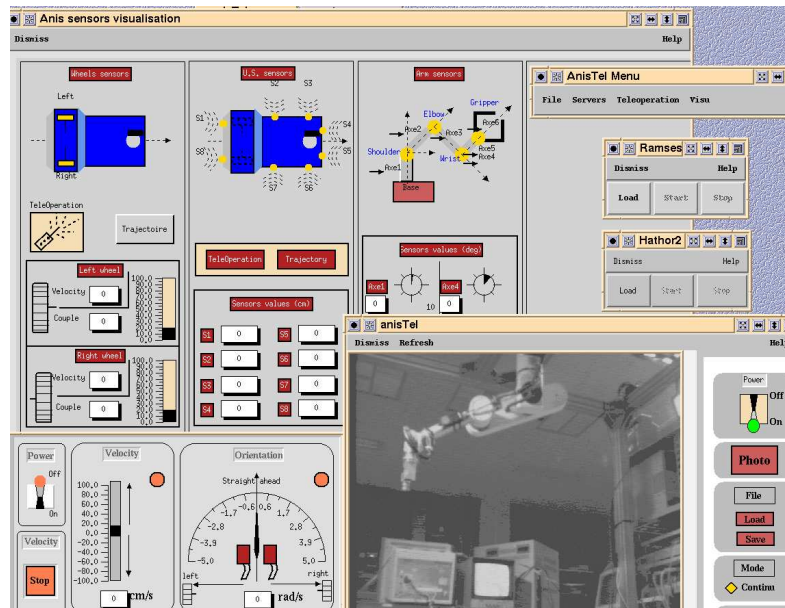


Figure 3 : Interface de téléopération

Afin de faciliter l'utilisation des moyens expérimentaux du projet, il nous a paru nécessaire de développer des outils graphiques d'aide à la programmation ou l'utilisation de ces ressources. Ces outils sont actuellement en cours de développement et sont basés pour la plupart sur les produits ILOG (Ilog Views, Ilog Builder).

- Interface de téléopération pour la base mobile (figure 3).
- Aide à la programmation d'applications du système de vision (figure 4)
- Editeur graphique pour SIMPARC. Nous utilisons actuellement un éditeur graphique de CAO électronique associé à un traducteur *ad hoc* permettant de générer le programme SIMPARC C++ de simulation. Il a été proposé un sujet de projet/stage ESSI pour le développement d'un éditeur spécifique.
- Logiciel de visualisation et animation 3D.

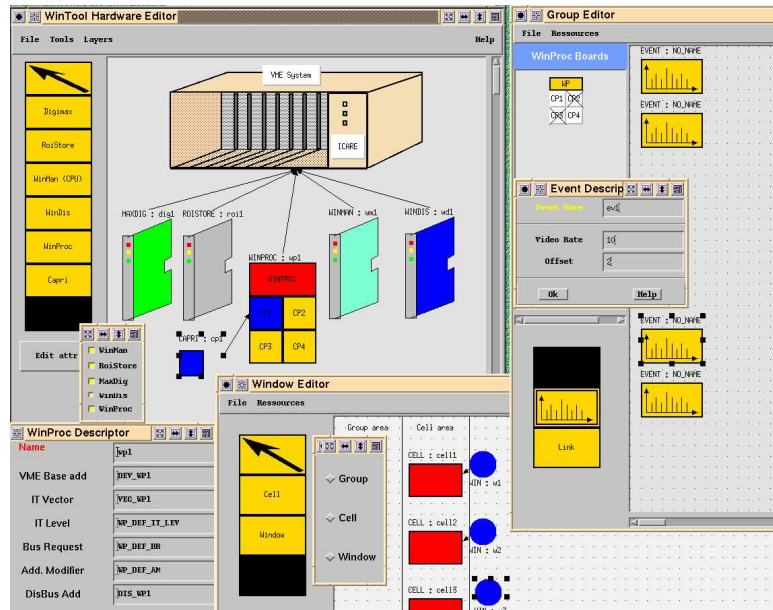


Figure 4 : Editeur d'applications image

4 Action industrielles

- Participation au projet “Advanced Systems Research for Unmanned Autonomous Underwater vehicles” du programme européen MAST II, en collaboration avec l’Ifremer et l’Institute of Oceanographic Science (UK). Ce projet porte sur la spécification et la pré-étude d’engins autonomes pour l’exploration des fonds sous-marins.
- D. Simon et E. Coste-Manière représentent l’INRIA au groupement “Robotique Sous-Marine” avec comme partenaires l’IFREMER, le CNRS, l’INRIA, et de nombreux industriels (Thomson Sintra, ECA, Cybernétix,...).
- Deux conventions de recherche avec l’IFREMER ont été réalisées sur les thèmes suivants : “Rapprochement entre les contrôleurs PI-RAT/ORCCAD” et “Etude sur la programmation de missions pour engins sous-marins autonomes : application au véhicule VORTEX”.
- Participation au Programme PRAXITÈLE, programme commun entre l’Inria, l’Inrets, la CGE, Renault et l’EDF visant à dévelop-

per de manière significative les techniques de l'automatique et de l'informatique appliquée au transport individuel. Notre travail au sein de ce projet a porté sur le développement d'un environnement de simulation capable de valider les lois de commande développées par l'ensemble des partenaires du projet.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

5.1.1 Organisation de conférences et de séminaires

- C. Samson est co-responsable du Groupe Robotique du GDR Automatique (CNRS). Ce groupe accueille des membres d'une vingtaine de laboratoires publics ou industriels au cours de journées-séminaires. Il s'est réuni à trois reprises cette année, à l'EDF (Châtou), au Laboratoire de Mécanique des Solides (Poitiers), et à l'HEUDIASYC-UTC (Compiègne).
- P. Rives est responsable du thème *Vision Active* au sein du PRC Communication Homme/Machine : action Orasis du CNRS.

5.1.2 Autres actions nationales

- Participation au projet inter-PRC: PERCEPTION ET RAISONNEMENT GÉOMÉTRIQUE POUR LE MOUVEMENT DANS LE MONDE RÉEL; projet retenu sur le thème "Vision intentionnelle et action" et rassemblant des équipes de recherche du GDR-PRC CHM et du GDR-PRC IA. Notre travail au sein de ce projet porte sur l'étude de stratégies perceptives appliquées à la navigation de robots mobiles en milieu partiellement connu.
- Collaboration avec le LASMEA de Clermont Ferrand sur la réalisation d'un système de traitement d'image à cadence vidéo adapté aux applications d'asservissement visuel.

5.2 Actions internationales

5.2.1 Participation à des projets européens

- Projet MAST II, “Advanced Systems Research for Unmanned Autonomous Underwater vehicles”, en collaboration avec l’Ifremer, l’Institute of Oceanographic Science (UK), Defence Research Agency (UK), l’Université Technique d’Athènes, l’Institut Hydrographique du Portugal et la société ECA. Durée de trois ans. Notre participation se termine début 1995.
- Projet Esprit 3 BRA “UNION” (UNderwater Intelligent Operation and Navigation). Ce projet regroupe sept laboratoires de recherche européens (IFREMER, INRIA-ICARE, Cnrs-Lirmm, Oxford University, Heriot-Watt University, Universitat Polytechnica de Catalunya, Technique Universitat München). Le projet a démarré le 1er mai 1994 pour une durée de deux ans.
- Participation au Projet Esprit 3 BRA : PROMOTION (Planning RObot Motion) avec le projet PRISME. Cette action regroupe six laboratoires de recherche européens (LAAS, INRIA, Université de Paris 6, Université de Barcelone, Université “La Sapienza” de Rome, Université d’Utrecht), et un laboratoire de l’Université de Berkeley aux Etats-Unis, autour des problèmes de planification de mouvements pour les robots. Durée de trois ans, jusqu’à septembre 1995.
- ICARE est membre du réseau de laboratoires ERNET (European Robotics NETwork) du programme Human Capital and Mobility. Ce réseau rassemble 28 laboratoires de 10 pays européens dans le but d’échanger des post-docs et des chercheurs travaillant dans le domaine de la robotique.

5.2.2 Invitations et visites

- Coopération avec le Centre de Recherche Informatique de Montréal sur le thème “Modélisation et analyse formelle de l’informatique en robotique”. Accueil de P. Freedman à l’INRIA (une semaine), et visite de D. Simon au CRIM (une semaine).
- Coopération avec Naval Postgraduate School (USA) (Prof. McGhee) sur le thème “Architectures logicielles pour la commande de véhicules sous-marins autonomes” (action soutenue par la NSF).

Accueil de H. Wang, doctorant à l'Université de Stanford (un mois) et des professeurs R. McGhee (deux semaines) et A. Healey (une semaine), visite d'E. Coste-Manière et de D. Simon au Naval Postgraduate School et au Monterey Bay Aquarium Research Institute (une semaine).

- Accueil du professeur B. Bitmead, Australian National University (trois mois), sur une bourse du MRES, et sur le sujet de la commande de véhicules sous-marins autonomes.
- D. Simon a effectué une visite d'une semaine à l'Instituto de Sistemas e Robótica (pôles de Porto et Lisbonne) dans le but d'examiner les possibilités de coopération dans le domaine de la robotique sous-marine (financement: Ambassade de France au Portugal et JNICT).
- D. Djian dans le cadre de sa thèse effectue un séjour d'un an jusqu'en Septembre 1995 au sein du Robotics Research Group de l'Université d'Oxford. Ce séjour est financé par une bourse CHM de la Communauté Européenne.

5.2.3 Comités de programme

- C. Samson est membre du Comité des Programmes de l'European Control Conference ECC 95, septembre 5-8 1995, Rome.
- P. Rives est membre du Comité des Programmes de l'International Symposium on Robotics and Manufacturing ISRAM'96, Mai 27-30 1996, Montpellier
- P. Rives est membre du Comité des Programmes du Congrès RFIA co-organisé par l'AF CET et l'AFIA, qui tiendra sa 10eme édition à Rennes les 16, 17 et 18 Janvier 1996.

6 Diffusion des résultats

6.1 Formation

6.1.1 Enseignement Universitaire

Commande de robots mobiles DEA Automatique de l'Université de Bordeaux, 3 heures (C. Samson)

Modélisation et commande de robots DEA Robotique et Vision, Université de Nice-Sophia Antipolis, 15 heures (P. Morin, P. Rives)

Vision Active DEA Robotique et Vision, Université de Nice-Sophia Antipolis, 9 heures (P. Rives)

Modélisation de robots ISIA et Ecole des Mines de Paris, 6 heures (E. Coste-Manière)

Robotique et temps-réel ISIA et Ecole des Mines de Paris, 3 heures (E. Coste-Manière)

Modélisation des robots ESSI 2/3, 10 heures (E. Coste-Manière).

Vision Active ENSTA-PARIS, 9 heures (P. Rives)

Vision et Mouvement EERIE-NIMES, 8 heures (P. Rives)

Architectures de commande en robotique DEA Robotique et Vision et ESSI, 6 heures (D. Simon)

Actionneurs en robotique ESSI, 4 heures (D. Simon).

6.1.2 Autres enseignements

Poursuite de trajectoires et stabilisation instationnaire de robots mobiles séminaire, Ecole Polytechnique de Lausanne, 3 heures (C. Samson)

Commande de robots mobiles séminaire, ESSI 3ème année, 3 heures (C. Samson)

Vision Industrielle séminaire, Ecole Nationale des Télécommunications de Brest, 3ème année, 3 heures (P. Rives)

Vision Active Programme Européen COMETT Image Processing and Robotics, Sophia-Antipolis, 3 heures (P. Rives)

6.1.3 Thèses

- Le projet accueille des doctorants inscrits aux formations doctorales suivantes: Ecole des Mines de Paris, Université de Nice Sophia-Antipolis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Deux thèses ont été soutenues dans le projet
 1. Roger Pissard-Gibollet, *Conception et commande par asservissement visuel d'un robot mobile*, Ecole des Mines de Paris, 3 Décembre 1993 (P. Rives examinateur)

2. Eduardo Castillo Castaneda, *Principes, techniques et outils de simulation, vérification et exécution d'actions robotiques*, INPG Grenoble, 16 novembre 1994 (D. Simon, examinateur).
- Les membres du projet ont participé aux jurys des thèses suivantes :
 1. Jan Opderbecke, *Localisation d'un robot mobile par fusion de données multisensorielles dans un environnement structuré*, ENS-Cachan, 21 décembre 1993 (C. Samson, examinateur)
 2. Patrick Lanusse, *De la commande CRONE de première génération à la commande CRONE de troisième génération*, Université de Bordeaux I, 14 février 1994 (C. Samson, examinateur)
 3. Philippe Fraisse, *Contribution à la commande robuste position/force des robots manipulateurs à architecture complexe. Application à un robot à deux bras*, 17 février 1994 (C. Samson, rapporteur)
 4. Mohammad Cherkaoui, *Sur la stabilisation d'une poutre déformable en torsion ou en flexion par une classe de contrôles frontière*, 8 juillet 1994 (C. Samson, examinateur)
 5. Konstantinos Kapellos, *Environnement de programmation des applications robotiques réactives*, Ecole des Mines de Paris, 7 novembre 1994 (P. Rives et D. Simon, examinateurs)
 6. Philippe Bobet, *Tête stéréoscopique, Réflexes oculaires et vision*, INPG Grenoble, 6 Décembre 1994 (P. Rives, rapporteur)
 7. Patrick Bonneau, *Mise en oeuvre de techniques de vision artificielle pour l'aide à la modélisation géométrique interactive de l'environnement*, Université de Paris VI, 14 Décembre 1994 (P. Rives, rapporteur)

6.1.4 Stages

Le projet a accueilli les stagiaires suivants :

- Nicolas Turro, “Programmation et gestion de missions pour engins sous-marins autonomes”, DEA Robotique et vision de l'université de Nice Sophia Antipolis, février/septembre 1994.

- Marc Tissier, “Implémentation d’algorithmes de traitement d’images sur une architecture parallèle spécialisée”, DEA Robotique et vision de l’université de Nice Sophia Antipolis, février/juin 1994.

6.2 Participation à des conférences et colloques

- C. Samson, conférencier invité à la conférence *SYROCO’94*, Capri, septembre 1994
- Communication à l’*IFAC Symposium on Robust Control*, Rio de Janeiro, septembre 1994
- Communication à l’*IEEE Conference on Decision and Control*, Lake Buena Vista, Floride, décembre 1994
- Deux communications à l’*IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Diego, Californie, avril 1994
- Communication à ISOPE94, Japan, juin 1994
- Deux communications au workshop IARP *Mobile Robots for Subsea Environment*, Monterey, mai 1994
- Communication (vidéo) au workshop AUV94 *Autonomous Underwater Vehicle 94*, Cambridge, juin 1994
- Communication à la conférence *Intelligent Robotic Systems’94*, Grenoble, juillet 1994
- Trois communications à la conférence *IEEE Oceans’94 Osates*, Brest, septembre 1994
- Deux communications au Workshop Esprit *PROMotion*, Barcelonne, Octobre 1994
- Communication aux Journées du PRC CHM *ORASIS*, Paris, Juin 1994

7 Publications

Thèses

- [1] E. C. CASTANEDA, *Principes, techniques et outils de simulation, vérification et exécution d’actions robotiques*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 16 novembre 1994.

- [2] R. PISSARD-GIBOLLET, *Conception et commande par asservissement visuel d'un robot mobile*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 3 décembre 1993.

Articles et chapitres de livre

- [3] F. CHAUMETTE, P. RIVES, B. ESPIAU, «Classification and Realization of the different Vision-based Tasks», *in: Visual Servoing - Automatic Control of Mechanical Systems with Visual Sensors; World Scientific Series in Robotics and Automated Systems Vol 7*, K. Hashimoto (ed.), London, 1993.
- [4] C. C. DE WIT, H. KHENNOUF, C. SAMSON, O. SORDALEN, «Nonlinear control design for mobile robots», *in: Recent Trends in Mobile Robots; World Scientific Series in Robotics and Automated Systems Vol. 11*, Yuan F. Zheng (ed.), Singapore, 1993.
- [5] F. JURIE, P. RIVES, J. GALLICE, J. BRAME, «High Speed Vehicle Guidance Based on Vision», *IFAC Journal in Control Engineering Practice* 2, 2, April 1994, p. 289-299.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [6] E. COSTE-MANIÈRE, M. PERRIER, «A Tentative Study of High-Level Reactive Mission Programming: Application to the VORTEX Underwater Vehicle», *in: Proceedings of IEEE OCEANS'94*, Brest, France, Septembre, 1994.
- [7] E. COSTE-MANIÈRE, A. PEUCH, V. RIGAUD, M. PERRIER, D. SIMON, R. PISSARD-GIBOLLET, «Vortex and its controller's programming environment: application to the "round the pool" mission», *in: Video Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles, AUV94*, Cambridge, Juillet 19,20 1994.
- [8] C. FRANÇOIS, C. SAMSON, «Running with constant energy», *in: IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Diego, Mai 1994.
- [9] A. MICAELLI, C. SAMSON, «Trajectory tracking for two-steering wheels mobile robots», *in: IFAC Symposium on Robot Control SYROCO'94*, Capri, Septembre 1994.
- [10] P. MORIN, C. SAMSON, J.-B. POMET, Z.-P. JIANG, «Time-varying feedback stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with two controls», *in: IEEE Conference on Decision and Control*, Lake Buena Vista, Floride, Décembre 1994.
- [11] A. PEUCH, E. COSTE-MANIÈRE, D. BATICLE, M. PERRIER, V. RIGAUD, D. SIMON, «An Advanced Control Architecture for Underwater

- Vehicles: the Mission Execution System of VORTEX», *in: Proceedings of IEEE OCEANS'94*, Brest, France, Septembre 1994.
- [12] J.-B. POMET, C. SAMSON, «Exponential stabilization of nonholonomic systems in power form», *in: IFAC Symposium on Robust Control Design*, p. 447-452, Rio de Janeiro, Septembre 1994.
- [13] V. RIGAUD, E. L. REST, L. MARCÉ, E. COSTE-MANIÈRE, D. SIMON, A. PEUCH, M. PERRIER, «VORTEX: Prototyping software architecture for the next AUV and ROV generation», *in: Proceedings of ISOPE'94*, Japan, 1994.
- [14] P. RIVES, J.-J. BORRELLY, J. GALLICE, P. MARTINET, «A Versatil Parallel Architecture for Vision Based Control Applications», *in: Workshop on Computer Architectures for Machine Perception*, New Orleans, USA, 15-17 Decembre 1993.
- [15] A. SANTOS, D. SIMON, V. RIGAUD, «A new sensor-based control approach for autonomous underwater vehicles», *in: Proceedings of International Advanced Robotics Programme 94 - IARP'94, Mobile Robots for subsea Environments*, Monterey, USA, Mai, 3-6 1994.
- [16] A. SANTOS, D. SIMON, V. RIGAUD, «A sensor-based high-level control approach for autonomous underwater vehicles (auvs)», *in: Proc. of Intelligent Robotics Systems IRS'94*, Grenoble, Juillet 1994.
- [17] A. SANTOS, D. SIMON, V. RIGAUD, «Towards autonomous underwater vehicles (auvs) through sensor-based high level control», *in: Proc. OCEANS'94 OSATES*, Brest, Septembre 1994.
- [18] D. SIMON, E. COSTE-MANIÈRE, R. PISSARD, V. RIGAUD, M. PERRIER, A. PEUCH, «A reactive approach to underwater-vehicle control: the mixed ORCCAD / PIRRAT programming of the VORTEX Vehicle», *in: Proceedings of International Advanced Robotics Programme 94 - IARP'94, Mobile Robots for subsea Environments*, Monterey, USA, Mai, 3-6 1994.
- [19] D. SIMON, P. FREEDMAN, E. CASTILLO, «Analysing the temporal behavior of real-time closed-loop robotic tasks», *in: IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Diego, Mai 1994.

Rapports de recherche et publications internes

- [20] P. MORIN, *Stabilisation de satellite en mode dégradé*, Mémoire, Décembre 1994, Rapport final de Bourse DGA, contrat no. 931315/AOOO.
- [21] R. PISSARD-GIBOLLET, «Rapprochement PIRAT et ORCCAD», *Document de synthèse n° Contrat no 1 94 E007 4167 20 2*, IFREMER/INRIA, Avril 1994.

- [22] J.-B. POMET, C. SAMSON, «Time-varying exponential stabilization of nonholonomic systems in power form», *Rapport de Recherche n° 2126*, INRIA, Décembre 1993.
- [23] A. SANTOS, D. SIMON, «Study of actuators configuration, sub-task B3», *Rapport intermédiaire n° Contrat no CT92-0028*, CEC Mast II, Juillet 1994.
- [24] A. SANTOS, D. SIMON, «Study of altitude sensors configuration, sub-task B7.1», *Rapport intermédiaire n° Contrat no CT92-0028*, CEC Mast II, Juin 1994.
- [25] M. TISSIER, *Implémentation d'algorithmes de traitement d'images sur une architecture parallèle spécialisée*, Mémoire, Université de Nice Sophia Antipolis, 1994, Rapport de stage de DEA Robotique et Vision.
- [26] N. TURRO, *Programmation et Gestion de missions pour engins sous-marins autonomes*, Mémoire, Université de Nice Sophia Antipolis, 1994, Rapport de stage de DEA Robotique et Vision.
- [27] H. H. WANG, E. COSTE-MANIÈRE, A. PEUCH, A. HEALEY, «A Proposal for a joint mission for evaluation of mission-level programming», *Proposal stanford arl/mbari, inria, ifremer, naval postgraduate school*, Novembre 1994.
- [28] H. H. WANG, E. COSTE-MANIÈRE, «The design and development of a paradigm to program robotic systems at a high level», *Rapport de recherche*, Stanford ARL/MBARI, Novembre 1994.
- [29] H. H. WANG, «A comparison of software control architectures used by Stanford ARL, INRIA and IFREMER», *Rapport*, Stanford Aerospace Robotics Laboratory, Novembre 1994.
- [30] H. H. WANG, «Final Report of Activities accomplished in Europe from September to October 1994», *Rapport*, Stanford ARL/MBARI, Novembre 1994.

Œuvres audiovisuelles

- [31] UCIS, *Vortex: Versatile and Open subsea Robot for Technical EXperiment at Ifremer*, UCIS (prod.), 5', INRIA, Mai 1994.

8 Abstract

The project is involved in the investigation of problems associated with the control of mechanical systems, with Robotics as a privileged, but not exclusive, domain of application.

Research activities are centered around the objective of developing a methodology for the design and integration of all components participating in the control problem, from the synthesis and analysis of control algorithms, to the implementation of these algorithms on dedicated hardware, via associated programming tools and methods.

These activities are structured within three main themes:

- Control theory and application to Robotics. The richness of robotic applications makes it possible to experiment most recent Control Theory developments and also to broaden the theory by addressing non-standard problems.
- Acquisition and processing of sensory data for control purposes. Robots' capacities for autonomy are closely related to the use of exteroceptive sensors and exploitation of sensory data in the control loops.
- Real-time programming environment. The complexity of advanced robotic applications calls for the study and development of dedicated programming and simulation systems.

Besides its own means for experimentation, the project is involved in several actions driven by industrial partners. The project also participates to several European Projects.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	2
3	Actions de recherche	3
3.1	Algorithmique et aspects théoriques de la commande des robots	3
3.1.1	Stabilisation en un point de robots mobiles par retour d'état instationnaire	4
3.1.2	Stabilisation en attitude d'un satellite par retour d'état instationnaire	4
3.1.3	Commande d'un monopode planaire	5
3.2	Acquisition et exploitation de données sensorielles	7
3.2.1	Application des techniques d'asservissement visuel à la robotique mobile	8
3.2.2	Vision intentionnelle et réactivité pour la réalisation de tâches robotiques	9
3.2.3	Traitement d'image à cadence vidéo pour des applications d'asservissement visuel	10
3.3	Atelier de génie logiciel pour la robotique	12
3.4	Robotique sous-marine	13
3.4.1	Modélisation et commande référencée capteurs de véhicules sous-marins	13
3.4.2	Programmation de missions	14
3.4.3	Campagne d'expérimentation à l'IFREMER	16
3.5	Moyens expérimentaux	16
3.5.1	Laboratoire de robotique	16
3.5.2	Outils de simulation	19
3.5.3	Outils d'aide à la programmation	20
4	Action industrielles	21

5	Actions nationales et internationales	22
5.1	Actions nationales	22
5.1.1	Organisation de conférences et de séminaires	22
5.1.2	Autres actions nationales	22
5.2	Actions internationales	23
5.2.1	Participation à des projets européens	23
5.2.2	Invitations et visites	23
5.2.3	Comités de programme	24
6	Diffusion des résultats	24
6.1	Formation	24
6.1.1	Enseignement Universitaire	24
6.1.2	Autres enseignements	25
6.1.3	Thèses	25
6.1.4	Stages	26
6.2	Participation à des conférences et colloques	27
7	Publications	27
8	Abstract	30