

Projet ICARE

Instrumentation, Commande, Architecture des Robots Évolués

Localisation : *Sophia-Antipolis*

Mots-clés : commande de système mécanique, robot manipulateur, robotique mobile, robotique sous-marine, commande référencée capteur, stratégie de prise de mesure, asservissement visuel, temps réel.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Claude Samson, DR INRIA

Responsable permanent

Patrick Rives, DR INRIA

Assistantes de Projet

Agnès Clément-Bessière, TR INRIA, à temps partiel

Corinne Zuzia, TR INRIA, à temps partiel

Personnel Inria

Ève Coste-Manière, CR

Daniel Simon, CR

Jean-Jacques Borrelly, IR

Patrick Itéy, IE

Ingénieur expert

Konstantinos Kapellos

Chercheurs post-doctorant

Dimitris Tsakiris, boursier TMR

Gilles Guyot, Post-doc industriel détaché à la société Krypton

Chercheurs doctorants

Soraya Arias, Bourse INRIA à partir de Novembre 1996
José Luis Carrilho-Séqueira, Co-tutelle de thèse avec l'IST de Lisbonne
David Djian, boursier INRIA
Charles François, boursier INRIA, jusqu'au 31 août 1996
David Lizarraga-Navarro, boursier CONACYT-SFERE à partir d'octobre 1996
Pascal Morin, boursier INRIA, jusqu'au 31 août 1996
Laurence Pelletier, boursier INRIA sur contrat PRAXITÈLE
Nicolas Turro, allocataire MESR

Stagiaires

Tat-Thanh Dang, DEA Robotique et Vision UNSA, 4 mois
Soraya Arias, DEA Robotique et Vision UNSA, 8 mois (en commun avec le projet Robot-vis)

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, infra-rouges, 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 muni d'un bras manipulateur, d'une ceinture de capteurs ultrasons et d'un système temps réel de traitement d'images. Cette structure 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 de robots

Les recherches du projet dans le domaine de l'algorithmique de commande sont à l'origine d'études actuelles en automatique portant sur la stabilisation des systèmes non-linéaires par retour d'état continu instationnaire. Elles ont cette année donné lieu à deux nouvelles extensions : i) une nouvelle méthode pour la synthèse de retours d'état instationnaires continus homogènes pour la stabilisation exponentielle des systèmes commandables sans dérive, et ii) l'application de techniques dites de « backstepping » pour la synthèse de tels retours d'état dans le cas plus spécifique de systèmes admettant une représentation sous forme dite « chaînée », avec comme objectifs secondaires la mise en forme du régime transitoire et le réglage explicite du taux de convergence asymptotique.

Alors que la première de ces extensions est de nature plus théorique et générale que pratique, la seconde est principalement motivée par le souci d'améliorer de façon pratique les performances des algorithmes de commande instationnaires dans le cadre de leur utilisation en robotique mobile. La thèse soutenue en juin par P. Morin [66] offre, au delà des contributions propres à l'auteur, une synthèse des travaux récents réalisés sur le thème de la stabilisation des systèmes non-linéaires par retour d'état instationnaire.

Sur un autre plan, la recherche entamée depuis quelques années sur la commande énergétiquement efficace de robots à pattes capables d'allures avec phase balistique (telles que la course) a atteint ses premiers objectifs marqués d'une pierre par la soutenance de thèse de Ch. Francois au mois d'avril. Cette recherche a permis au projet de franchir une étape dans la compréhension des problèmes soulevés par le sujet et l'obtention de nouveaux résultats applicables en pratique. La locomotion des systèmes articulés est un sujet de la robotique encore largement méconnu (manque d'intérêt industriel aidant) bien qu'il soit probablement l'un des plus porteurs d'enseignements sur le plan scientifique.

3.1.1 Une méthode générale de synthèse de retours d'état instationnaires homogènes pour la stabilisation des systèmes sans dérive commandables

Participants : Pascal Morin, Claude Samson, Jean-Baptiste Pomet (projet MIAOU)

L'étude, [74], menée en collaboration avec J.-B. Pomet du projet Miaou, a consisté à élaborer une nouvelle méthode pour la synthèse de retours d'état instationnaires permettant de stabiliser asymptotiquement l'origine de systèmes sans dérive infiniment différentiables et commandables. La méthode conduit à des retours d'état explicites, continus, partout infiniment différentiables sauf à l'origine, et homogènes. Complétée par des résultats maintenant bien connus sur l'approximation de champs de vecteurs par des champs de vecteurs homogènes, la méthode est générale en ce qu'elle s'applique à tout système commandable sans dérive. L'approche s'inspire de la construction, proposée par Sussmann et Liu, de commandes en boucle ouverte « fortement oscillantes » permettant d'approcher aussi près que l'on veut toute solution du système « étendu » obtenu en ajoutant au système de départ les crochets de Lie des champs de vecteurs qui permettent d'engendrer l'Algèbre de Lie du système. L'intérêt du système étendu réside dans le fait qu'il est simple à commander et à stabiliser. La méthode permet grosso modo de déduire un retour d'état instationnaire exponentiellement stabilisant à partir de la connaissance d'un retour d'état statique classique stabilisant exponentiellement l'origine du système étendu.

L'intérêt de la méthode est qu'elle fournit une autre démonstration d'un résultat d'existence bien connu dû à Coron en 1992, tout en conduisant à des lois de commande complètement explicites (pas de résolution d'équations différentielles partielles, en particulier) obtenues en exploitant uniquement la structure de l'Algèbre de Lie du système. Son application à des systèmes de dimension supérieure à trois indique cependant que les commandes obtenues de cette façon sont sensiblement plus complexes que celles pouvant être obtenues par d'autres méthodes de synthèse moins générales, et que le recours à des fréquences élevées pour la partie instationnaire de la commande n'est ni nécessaire, ni généralement souhaitable, au niveau des applications. Bien qu'intéressante sur le plan conceptuel, son intérêt est donc probablement moindre sur le plan applicatif. Ceci explique que nous ayons continué d'étudier en parallèle d'autres méthodes de synthèse.

3.1.2 Application de techniques de « backstepping » à la stabilisation instationnaire exponentielle des systèmes chaînés

Participants : Pascal Morin, Claude Samson

Les modèles cinématiques de plusieurs systèmes mécaniques non-holonomes (tels que les robots mobiles sur roues) peuvent être exprimés sous forme canonique dite « chaîné ». La stabilisation asymptotique des points d'équilibres de ces systèmes ne peut être obtenue par des retours d'état continus fonctions seulement de l'état du système. Elle est cependant possible par des retours d'état continus dépendant également du temps (stationnaires). Nous proposons [81] une technique de « backstepping » pour synthétiser des retours d'état assurant une stabilisation exponentielle du système en boucle fermée.

Le taux de convergence exponentiel découle des propriétés associées aux systèmes homogènes. Une des lois de commande proposées fait intervenir une extension dynamique exogène du système chaîné de départ.

Par rapport aux commandes instationnaires précédemment proposées dans la littérature, la méthode présente l'avantage de fournir une borne inférieure du taux de convergence asymptotique. Cette borne est calculée à partir d'un jeu réduit de paramètres de synthèse de la commande, lorsque d'autres paramètres sont choisis suffisamment grands. La possibilité de régler à volonté le taux de convergence est une propriété importante en pratique. Une autre caractéristique de la méthode est que le réglage du taux de convergence est indépendant de la fréquence d'excitation des termes instationnaires de la commande. En particulier, contrairement à la méthode de synthèse plus générale que nous donnons dans [74], l'utilisation de fréquences élevées n'est en aucun cas requise. L'étude répond également à une autre motivation d'ordre pratique, à savoir l'amélioration qualitative des trajectoires suivies par le véhicule commandé pendant le transitoire de convergence. Concernant ce point, d'autres commandes proposées antérieurement ne donnaient pas de résultats très satisfaisants. Les simulations de la technique de commande proposée montrent que le mouvement du véhicule est « plus naturel » et proche de celui réalisé par un conducteur humain au cours d'une manœuvre de créneau.

Nous avons retenu ce type de méthode pour tester expérimentalement des algorithmes de commande instationnaire référencée-vision sur le manipulateur mobile (base mobile porteuse d'un bras manipulateur) dont dispose le projet.

3.1.3 Commande énergétiquement efficace de robots à pattes

Participants : Charles François, Claude Samson

La locomotion énergétiquement efficace des robots à pattes, marcheurs ou coureurs, soulève des problèmes difficiles à la croisée de plusieurs disciplines : mécanique (pour la conception de mécanismes adaptés), mathématiques (pour l'étude des équilibres passifs associés aux mécanismes en question), automatique (pour la commande des mécanismes). Le travail de thèse de Charles François [65, 80], par lequel nous avons abordé cette problématique, a porté sur la commande du monopode planaire, considéré généralement, en raison de sa simplicité mécanique, comme le mécanisme de base pour la locomotion avec phase balistique (telle que la course). L'étude a permis de mettre en place une méthodologie pour la synthèse et l'analyse de techniques de commande pour les robots à pattes, débouchant sur de nouvelles stratégies et algorithmes de commande. Il est ainsi montré qu'une impulsion dans la jambe pendant la phase de contact avec le sol, suivie de deux impulsions au niveau de la hanche pendant la phase vol, sont suffisantes pour stabiliser la course du système. Une méthode de calcul de l'intensité de ces impulsions (ou de forces constantes par morceaux équivalentes) a été explicitée. L'étude a aussi été génératrice de résultats permettant de mieux comprendre les potentialités et limitations de la locomotion articulée. Parmi ces résultats, citons une caractérisation analytique approchée des allures passives du mécanisme, une caractérisation de ses propriétés de commandabilité, une analyse numérique du degré d'instabilité des différents équilibres passifs. Outre les applications propres à la robotique, il n'est pas irraisonnable de penser que cette étude puisse également être reliée à des travaux menés par les biologistes sur la locomotion des mammifères (et du bipède humain, en particulier). Par exemple, les minima de la courbe de degré d'instabilité des équilibres passifs en fonction de la vitesse de translation du mécanisme correspondent aux vitesses pour lesquelles l'effort moyen de commande permettant de stabiliser ces équilibres est moindre. On retrouve ainsi la notion de vitesse « préférée » pour une allure de locomotion donnée, cette vitesse étant celle pour laquelle l'organisme dépense le moins d'énergie. Le même raisonnement tenu pour l'accroissement abrupt du degré d'instabilité observé au delà d'une certaine vitesse conduirait à l'existence d'une limite supérieure structurelle (la fameuse barre des 9s6 au 100m?)

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'événements 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 événements nécessitant une modification du comportement du système (aspect réactif). Dans les deux cas, il s'agit d'exploiter des données perceptuelles pour adapter au mieux le comportement du système aux conditions de la tâche qu'il réalise. Les formalismes que nous développons visent à exploiter au mieux la complémentarité entre les aspects perception et action afin, d'une part, de simplifier les processus de perception par le biais de stratégies de perception active et, d'autre part, de robustifier les processus de commande par le biais de lois de commande référencées capteur. La généralité des formalismes permet de les appliquer à différents capteurs utilisés en robotique (odométrie, capteurs d'effort, centrale inertielle, proximétrie, vision locale...).

3.2.1 Spécification de tâches référencées capteur

Participants : Patrick Rives, Laurence Pelletier

L'objectif que nous poursuivons est de fournir à l'utilisateur une méthodologie et un ensemble d'outils lui permettant de spécifier, analyser et implémenter une application robotique en enchaînant des tâches élémentaires référencées capteur [75]. Nous nous appuyons sur un modèle générique permettant de représenter l'interaction entre un robot muni de capteurs et son environnement local par un difféomorphisme local entre l'espace de configuration du robot et l'espace des mesures capteur. L'utilisation de ce modèle, appelé *torseur d'interaction*, permet de spécifier des tâches sous formes de contraintes géométriques entre les capteurs et des éléments de l'environnement et également de dériver des schémas de commande possédant de bonnes propriétés de robustesse. Le travail, commencé l'année dernière, sur la spécification d'une bibliothèque de tâches *canoniques* référencées capteur (suivi de mur par ultrasons, asservissement visuel sur des cibles...) s'est poursuivi en remontant vers le niveau planification.

Dans le cadre de notre implication dans l'action de développement PRAXITÈLE nous étudions les modalités d'intégration des données sensorielles dans la planification de trajectoire d'un robot non-holonyme dans un environnement statique connu. Le déplacement du robot peut être vu comme une tâche robotique complexe que l'on va décomposer en tâches élémentaires référencées capteur utilisant les capteurs embarqués sur le robot. À partir d'un catalogue de tâches référencées capteur nous cherchons à déterminer le chemin le plus sûr en fonction des moyens perceptuels du robot. Le problème est posé en termes d'optimisation du déplacement et du choix des capteurs à activer à un instant donné.

Le formalisme des torseurs d'interaction a également été utilisé dans le cadre du projet ESPRIT UNION (voir la section 3.4) où il a servi à spécifier des tâches de suivi de pipeline par asservissement visuel et des tâches de suivi de surface par sondeurs ultrasons

3.2.2 Commande instationnaire référencée vision d'un manipulateur mobile

Participants : Dimitris Tsakiris, Claude Samson, Patrick Rives

Un manipulateur mobile est constitué d'un véhicule sur lequel est monté un bras manipulateur. L'intérêt d'un tel assemblage mécanique est de permettre d'augmenter de façon importante l'espace de travail du manipulateur. Alors qu'un bras manipulateur complètement commandé est en soi un système mécanique holonyme, le véhicule porteur est souvent contraint par des liaisons cinématiques non-holonomes. C'est, par exemple, le cas d'un véhicule sur roues de type unicycle (notre base mobile) ou de type voiture. L'ensemble constitue alors un système non-holonyme de grande dimension dont la commande pose des problèmes ayant peu été traités jusqu'à présent.

L'objectif à long terme de l'étude est le suivant : disposant d'une part d'une approche, maintenant bien éprouvée, pour la commande référencée capteur des bras manipulateurs holonomes, et d'autre part d'une approche pour la commande de robots mobiles non-holonomes basée sur des techniques de retour d'état instationnaire, il s'agit d'étudier la possibilité de combiner ces deux approches afin de les englober dans un cadre théorique plus général applicable aux systèmes mécaniques holonomes et non-holonomes. Cet objectif est ambitieux et nous avons choisi de l'aborder via une expérimentation canonique de commande référencée vision [77, 67]. Celle-ci consiste à stabiliser en position et orientation notre bras mobile de laboratoire à partir des données fournies par une caméra montée à l'extrémité du bras manipulateur. Dans ce contexte, l'observation de l'environnement par la caméra est utilisée pour estimer l'erreur de posture du système robotique, cette erreur constituant l'entrée de l'algorithme de commande. Dans un premier temps, nous avons réduit la complexité du problème (la dimension du système) en imposant à la caméra de se déplacer dans un plan parallèle à celui dans lequel la base mobile évolue. Trois cibles de type ponctuel et de géométrie connue ont été placées dans ce plan afin de retrouver, par triangulation, la localisation du système relativement à un repère lié à ces cibles. Le nombre de degrés de liberté du système permet à la caméra de toujours garder les cibles au centre de l'image : c'est un des intérêts de la redondance cinématique issue de l'assemblage « bras+base mobile ». Les algorithmes de commandes mis en œuvre pour assurer la convergence du bras mobile vers la posture désirée (figure 1) sont obtenus par adaptation et extension d'algorithmes de retour d'état instationnaire étudiés au sein du projet (voir paragraphe 3.1).

L'approche a été testée en simulation en utilisant le logiciel Simparc (voir paragraphe 3.5.2). Cette étape a permis de valider les lois de commande considérées [67, 77] et d'affiner le choix de certains paramètres intervenant dans ces lois. L'évaluation expérimentale est en cours de réalisation.

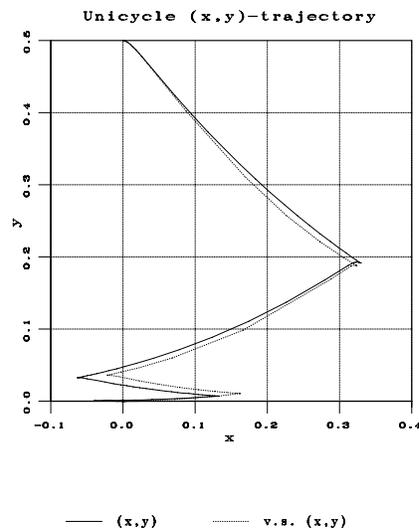


Figure 1: Commande instationnaire d'un manipulateur mobile

3.2.3 Localisation d'un robot mobile au moyen de capteurs ultra-sons

Participants : José Luis Carrilho-Séqueira, Patrick Rives

Dans de nombreuses applications de robotique mobile, il est important de pouvoir localiser le robot vis-à-vis de son environnement. Cette localisation peut être réalisée en intégrant les données odométriques mais elle est peu fiable du fait des glissements des roues. Une autre approche que nous développons au sein du projet, réside dans l'utilisation de capteurs extéroceptifs. Dans le cas de scènes d'intérieur

relativement structurées, les proximètres à ultra-sons permettent, pour un faible coût, d'obtenir des mesures de distances pouvant être utilisées pour la localisation. En contrepartie, ces mesures sont souvent de mauvaise qualité et contiennent de nombreux artéfacts qui doivent être filtrés. Le problème du calibrage est également important car il conditionne la précision obtenue au niveau de la localisation. Dans le cas de la ceinture de capteurs ultra-sons de notre robot mobile, nous avons établi une méthode de calibrage automatique, basée sur des contraintes géométriques, permettant de déterminer la position et l'axe de visée des différents capteurs en déplaçant le robot dans un environnement connu. Nous travaillons actuellement à robustifier les mesures fournies par les capteurs en exploitant la redondance obtenue en utilisant un capteur en émission et plusieurs en réception.

3.2.4 Stratégies perceptives

Participants : David Djian, Patrick Rives, Penny Probert (OXFORD)

Cette action de recherche s'inscrit dans le cadre du projet INTER-PRC VISION INTENTIONELLE ET ACTION soutenu par le MRT, et au sein d'une collaboration avec le Groupe de Robotique de l'Université d'Oxford. Dans le cadre de cette coopération, David Djian a passé 18 mois de sa thèse à Oxford en bénéficiant d'une bourse européenne CHM. Dans cet axe de recherche, nous nous intéressons aux stratégies de perception actives [71, 72]. Ces stratégies sont définies par :

- un *but* : par exemple, identifier des objets présents dans le champ de vision,
- un ensemble d'*observateurs* dont le champ d'observation peut être piloté (caméra mobile ou régions d'intérêt dans l'image) et qui sont définis par l'association d'un type de capteur et d'un algorithme de traitement spécifique suivant le concept des *capteurs logiques*,
- une *stratégie de perception* permettant de définir où observer à l'instant (k+1) sachant ce qui a été observé jusqu'à l'instant (k),
- un *mécanisme de décision* permettant de mettre à jour l'état de la tâche de perception.

Cette approche 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 développés dans l'axe *Programmation de systèmes robotiques complexes* de la section 3.3.

Son originalité est de définir les actions utiles à la perception directement au niveau du modèle de la scène. Le formalisme des capteurs logiques permet de rendre la méthode facilement adaptable à différents types de capteurs physiques. Enfin, nous avons développé un mécanisme de décision probabiliste implémenté au moyen de réseaux bayésiens. Ce choix a été dicté par la volonté de prendre en compte explicitement les incertitudes liées aux capteurs ainsi que de manipuler la connaissance de manière rigoureuse grâce à un modèle générique (les probabilités conditionnelles). Le travail réalisé cet année a porté sur deux points :

- étendre les résultats obtenus l'année dernière sur des objets simples, (porte, fenêtre) à des objets plus complexes (chaise), ceci a nécessité d'adjoindre un niveau de modélisation permettant la description de ces objets.
- développer des méthodes d'apprentissage supervisé à partir de vues réelles afin de construire les tables de probabilités conditionnelles utilisées par les réseaux bayésiens (figure 2).

3.3 Programmation de systèmes robotiques

La programmation des systèmes robotiques est complexe et difficile. Elle requiert de nombreux outils intervenant dans les différentes phases du développement du contrôleur : modélisation, conception des algorithmes, développement du logiciel et du matériel, simulation, validation, installation et opération. Ces étapes nécessitent différents formalismes, trop souvent spécialisés dans un domaine précis



Figure 2: Ensemble d'apprentissage pour une porte.

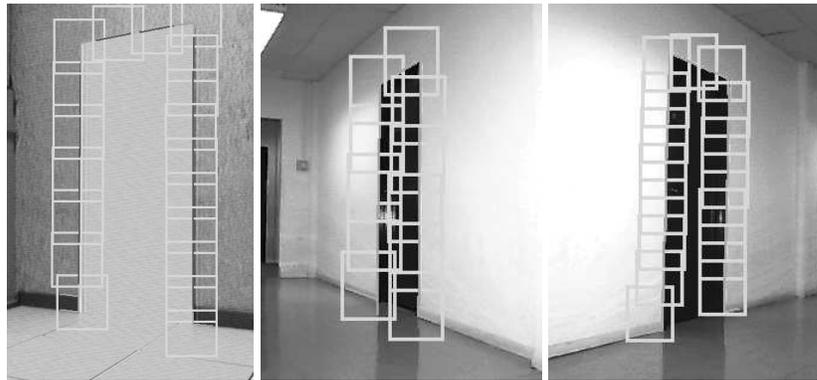


Figure 3: Reconnaissance de portes.

et déconnectés les uns des autres. L'étude des *architectures de contrôle* est donc primordiale pour développer concepts et méthodes permettant de gérer la complexité sous-jacente des ressources requises pour le contrôle des systèmes robotiques. Le but final est de proposer, dans un environnement cohérent, un ensemble d'outils intégrés permettant d'implémenter, de manière transparente pour l'utilisateur, ces méthodes et concepts bien formalisés.

Pour gérer la complexité de ces systèmes robotiques, l'architecture de contrôle proposée [73] se décompose en trois niveaux : le niveau *fonctionnel*, où les aspects dynamiques sont prépondérants, le niveau *contrôle*, qui gère principalement les aspects réactifs, et le niveau *planification*, pour assurer les prises de décisions haut niveau. Actuellement, seuls les niveaux fonctionnels et contrôle sont abordés dans le cadre de nos recherches. Au niveau fonctionnel, les actions élémentaires sont définies sous forme de TÂCHES-ROBOT : ce concept clé spécifie dans la même entité une partie algorithmique (loi de commande) et une partie logique réactive (préconditions, exceptions et postconditions). Au niveau contrôle, les actions complexes sont spécifiées sous la forme de PROCÉDURES-ROBOT par composition structurée et hiérarchique de TÂCHES-ROBOT et de traitements d'exception.

3.3.1 Développements du système ORCCAD

Participants : Konstantinos Kapellos, Daniel Simon, Roger Pissard-Gibollet, Bernard Espiau

ORCCAD est un ensemble de concepts et d'outils destinés à concevoir, vérifier, simuler et exécuter des applications robotiques variées. Le développement d'ORCCAD s'est poursuivi au travers du développement d'outils logiciels (en collaboration avec l'avant-projet BIP) et d'expérimentations dans le cadre du projet ESPRIT UNION en collaboration avec l'Ifremer.

Nous intégrons actuellement les outils suivants (figure 4):

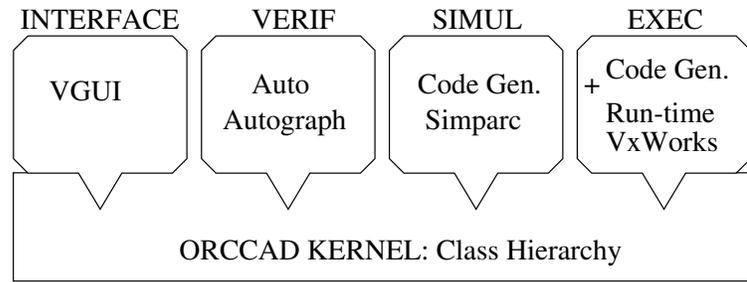


Figure 4: ORCCAD Tools

- Le **Noyau** est une librairie de classes C++ implémentant la hiérarchie de classes proposée dans le modèle de la structure ORCCAD.
- L'**Interface graphique**, développée sous IlogViews, permet de créer des instances de la hiérarchie d'ORCCAD. Elle permet de créer des objets de complexité croissante, des modules de base jusqu'à des applications complètes. Les modules de vérification et de génération de code peuvent être activés au travers de cette interface.
- Le module de **Vérification**, utilisant Auto et Autograph, permet de vérifier les propriétés logiques du contrôleur après composition des actions élémentaires.
- Le module de **Simulation** permet de simuler le système robot+contrôleur à l'aide de Simparc. L'utilisation d'un modèle du système d'exploitation temps-réel permet de simuler une structure de code identique à celle effectivement générée pour la cible réelle.
- Le module d'**Exécution** génère le code exécutable sur l'architecture cible. Les cibles logicielles actuelles sont VxWorks et Solaris utilisant les « threads » Posix (cette dernière activité ayant été réalisée en collaboration avec le projet Robotvis comme énoncé au paragraphe 3.3.2).

Ces différents modules sont en cours d'intégration. Une première version du système, simple mais diffusable, est prévue pour le début de 1997.

3.3.2 Programmation de Missions

Participants: Soraya Arias, Nicolas Turro, Konstantinos Kapellos, Ève Coste-Manière

On se place ici au niveau d'abstraction où l'utilisateur du système robotique manipule judicieusement et aisément différentes entités pour atteindre les buts de diverses missions (programmation au niveau tâche). Ceci nécessite la définition, d'une part, des entités manipulées (lois de commande, algorithmes de vision, de génération de trajectoires...) et, d'autre part, de la sémantique et de la syntaxe des primitives de manipulation de ces entités (définition d'un langage).

Formalisation des actions manipulées

Pour élargir le champ des applications potentielles de notre approche, il est nécessaire de formaliser des entités autres que la TÂCHE-ROBOT, permettant la mise en œuvre d'algorithmes de planification de trajectoires, de traitement d'images...

Pour appréhender le problème, un sujet de stage de DEA Robotique et Vision a été proposé en collaboration avec le projet ROBOTVIS (Thierry Viéville) [78] afin d'étudier la formalisation nécessaire à la

The screenshot shows three windows from a mission programming environment:

- *Inspection.PrR**: Contains a sequence of actions:


```

NAME : Inspection
EXTERN BaseUnstable
EXTERN BaseStabilized
BEGIN
SEQ ( DO
  START SearchTargetCam()
  UNTIL BaseStabilized ,
  START KeepStableCam(10,15) ,
  DO
    LOOP(
      SEQ ( DO
        SEQ ( START PA10_GoToInitPos() ;
              START PA10_GoToInspPos() )
        UNTIL BaseUnstable ,
              START KeepStable_US() )
      )
    UNTIL ENDOF PA10_GoToInspPos )
  )
END.
```
- *RTlist.po**: Lists various robot actions:


```

<Edit>
DepthHeading
FixedPoint
FollowWall
GoAhead
GoBackHome
GoToPoint
KeepStableCam
KeepStable_US
PA10_GoToInitPos
PA10_GoToInspPos
```
- KeepStableCam.TRdscr**: Shows details for the `KeepStableCam` task:


```

NAME : KeepStableCam
PARAM : INT,INT
RETURN:
ROBOT : VORTEX BASE
PRECOND TargetInSight
T2 TargetLost
T2 BaseUnstable
T3 VideoDown
T3 MotorsDown
```

Figure 5: Exemple de Programme de Mission

manipulation d'algorithmes de vision. Une application type mélangeant des actions robotiques représentées par des TÂCHES-ROBOT et des algorithmes de vision a été réalisée sur le système ARGÉS du projet ROBOTVIS. Elle a permis d'implémenter des enchaînements d'actions autres que les TÂCHES-ROBOT, et ainsi d'enrichir la structure des PROCÉDURES-ROBOT. De plus, par souci de compatibilité et de portabilité, le code temps réel exécutable respecte maintenant la norme POSIX et tourne sous SOLARIS. Cette investigation se prolonge actuellement par une thèse sur le sujet.

Des études comparatives des méthodes de programmation de mission ont été également menées en collaboration avec le LAAS et Stanford [70, 69].

Langage de programmation de mission

Initialement, ESTEREL a été choisi comme langage de programmation de missions en raison des avantages maintenant reconnus de l'approche synchrone (cadre formel de manipulation de la réactivité et preuves associées). Cependant l'utilisation d'ESTEREL et des outils de vérification associés n'est pas toujours adaptée à cause d'une trop grande expressivité et d'une représentation insuffisante des actions asynchrones dans notre contexte.

Il est, de fait, souhaitable de fournir à l'utilisateur un langage plus naturel (actuellement appelé « scénario »), mais doté des mêmes avantages que l'approche synchrone. On propose ainsi un ensemble d'opérateurs manipulant les vues abstraites des actions élémentaires identifiées et pouvant être traduits dans un formalisme formel tel que par exemple ESTEREL.

L'outil logiciel CENTAUR développé dans le projet CROAP a permis d'implémenter un prototype évolutif de langage de programmation [84].

La sémantique opérationnelle est obtenue par *traduction* dans un langage cible (ici le langage synchrone ESTEREL). La traduction a plusieurs avantages : d'une part, elle rend la spécification indépendante du modèle formel choisi comme cible de traduction (on pourrait envisager dans le futur une traduction selon le formalisme TIMED-ARGOS comme proposé à Grenoble dans le projet BIP) et masque certaines subtilités de programmation. D'autre part elle effectue, de façon automatique et transparente, des vérifications préliminaires sur la cohérence de la spécification (par exemple, portées des actions manipulées).

Actuellement, un prototype du langage de programmation de mission est disponible (Figure 5). Il possède un ensemble d'opérateurs permettant d'exprimer séquence, conditions, itérations d'actions (SEQ,

LOOP, UNTIL, PROCEDURE,...). Les actions qu'il manipule sont paramétrables. La traduction en langage cible ESTEREL des opérateurs, des PROCÉDURES-ROBOT et des TÂCHES-ROBOTS est réalisée de manière automatique lorsque la cohérence de la spécification a été validée. Certaines propriétés logiques sont garanties par construction (vérification par méthodes comportementales). La vérification des propriétés opérationnelles correspondant à la réalisation de l'objectif final de l'application n'est par contre pas garantie a priori. Cependant, la forme compacte de spécifications proposée contraint l'utilisateur final à rester proche des objectifs de l'application. Une traduction d'un programme simulable en SIMPARC (voir la section 3.5.2) est envisageable pour valider, par simulation, à la fois les aspects dynamiques et les aspects logiques de l'application.

Plusieurs domaines d'expérimentations ont permis de valider les aspects implantés (par exemple, en robotique sous-marine [69, 84] avec le VORTEX de l'IFREMER). L'utilisation du prototype ARGÉS du projet ROBOTVIS [78] a permis de valider l'ensemble des opérateurs du langage.

Ainsi, les primitives proposées à l'utilisateur sont *garanties de haut niveau, vérifiées et fiabilisées*.

3.4 Robotique sous-marine

La robotique sous-marine est un domaine d'application riche de problèmes scientifiques intéressant les diverses composantes du projet ICARE (algorithmique de commande, commande référencée capteurs...). Des actions de recherche dans ce cadre applicatif, en particulier avec Ifremer, ont débuté en 1992 au sein d'un projet MAST et se sont poursuivies dans le cadre du projet ESPRIT BRA UNION

3.4.1 Réalisation de missions

Participants : Ève Coste-Manière, Howard Wang, Stephen Rock, Michel Perrier, Alexis Peuch, Vincent Rigaud

Projet UNION

. Le projet ESPRIT BRA UNION [79, 85] a permis de valider les développements du langage de programmation en étudiant une mission d'intervention sous-marine générique combinant opérations automatiques, téléopération et traitement d'exceptions.

La synthèse des résultats obtenus par tous les partenaires au cours du projet UNION est proposée dans [86, 85].

Collaboration avec Stanford/MBARI

Une nouvelle mission pour le véhicule VORTEX de l'IFREMER et le véhicule OTTER de Stanford/MBARI, plus sophistiquée que celles précédemment réalisées a été étudiée [70, 69]. Cette *mission commune* (Figure 6) s'inscrit dans le cadre d'une collaboration internationale entre l'INRIA, l'IFREMER en France et Stanford et le MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE. Cette mission a permis d'étudier, valider et comparer les capacités de programmation, au niveau fonctionnel et contrôle, offertes par les différentes approches adoptées. Elle a mis en évidence certaines faiblesses des deux systèmes et, par là-même, a influencé positivement les développements actuels des deux équipes [78, 84].

3.4.2 Programmation d'un système de manipulation sous-marin

Participants : Konstantinos Kappelos, Daniel Simon, Vincent Rigaud (Ifremer), Sylvie Granier (Ifremer)

Dans le cadre du projet UNION, les concepts d'ORCCAD ont été utilisés pour prototyper une mission pour un système de manipulation sous-marine. Ce système (figure 7) est constitué du véhicule Vortex de l'Ifremer équipé d'un bras électrique Mitsubishi PA10 à 7 degrés de liberté.

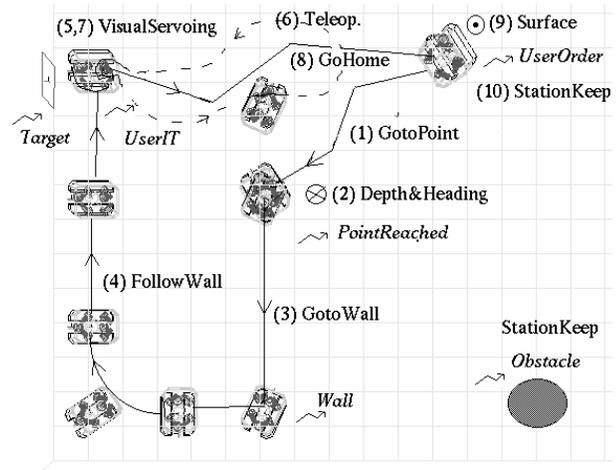


Figure 6: Mission commune réalisée par les véhicules VORTEX et OTTER

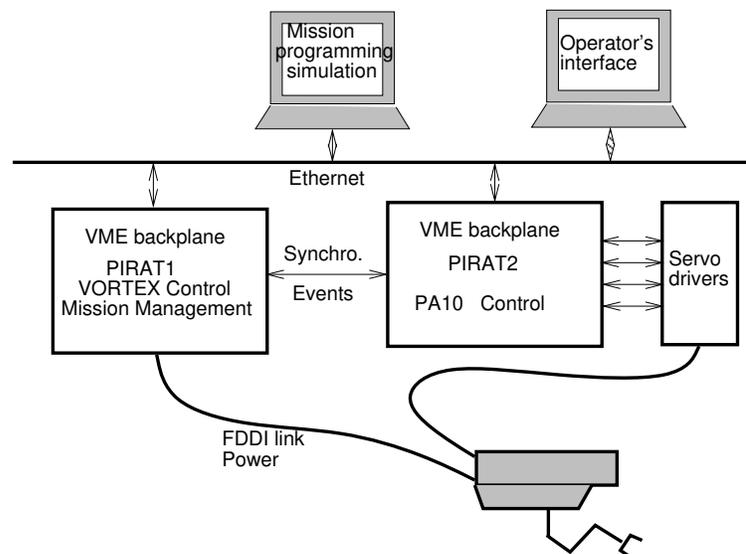


Figure 7: Système de manipulation sous-marine

Chacun des deux sous-systèmes possède son propre contrôleur basé sur des cartes VME tournant sous VxWorks. En l'absence de modèle de commande du système global chaque robot est commandé de façon indépendante et la liaison entre les contrôleurs n'est utilisée que pour synchroniser les actions du sous-marin et du bras.

De nouvelles lois de commande ont été développées et testées en simulation afin de faire une première évaluation des perturbations résultant du couplage dynamique entre le bras et le véhicule. Un modèle de simulation a été élaboré en intégrant certaines classes du logiciel Dynamechs¹ dans notre environnement de simulation SIMPARC. Nous disposons maintenant d'un modèle de simulation complet et générique de systèmes sous-marins constitués d'un véhicule libre muni d'un ou plusieurs bras.

La méthodologie de composition d'actions en PROCÉDURES-ROBOT d'ORCCAD a été utilisée pour construire et vérifier plusieurs actions complexes impliquant la coordination des deux contrôleurs. Ces procédures ont été formellement vérifiées grâce à des techniques de vérification de modèle au travers des outils AUTO/AUTOGRAPH, mais également par simulation du contrôleur complet, mélangeant les aspects lois de commande et contrôle logique, de façon à complètement valider les transitions entre actions.

Bien que des problèmes de hardware n'aient pas permis jusqu'ici de réaliser réellement toutes les opérations programmées, la mission sous-marine a été entièrement simulée [76] et une grande partie des codes de calcul, en particulier concernant les communications inter-contrôleurs, a été testée sur site.

En raison de la complexité de l'application, due principalement au parallélisme des actions réalisées par le bras et la base mobile, et de la nature distribuée et asynchrone du système, l'automate unique résultant de la compilation du code de contrôle atteint maintenant des tailles respectables. La possibilité de distribuer ce code de contrôle, notamment en utilisant le distributeur de code synchrone OCREP développé par les projets MEIJE et SPECTRE, est en cours d'étude afin de maîtriser la taille des automates résultants tout en restant dans le cadre conceptuel d'Orccad. Cette étude se poursuit dans le cadre du projet AIOLI financé par la région PACA.

3.4.3 Inspection de pipeline par asservissement visuel

Participants : Jean-Jacques Borrelly, Patrick Rives, Michel Perrier (Ifremer)

Dans le cadre du projet ESPRIT BRA UNION, nous avons validé nos études sur la commande référencée capteur sur une tâche représentative dans le domaine de l'intervention sous-marine : l'inspection d'un pipeline. Le « pipe » est constitué d'un élément horizontal placé au fond de la piscine suivi d'un élément vertical. L'expérimentation comporte une phase de suivi de la partie horizontale et une phase d'inspection de la partie verticale. Ces deux tâches sont réalisées par asservissement visuel. Dans cette expérimentation, nous avons utilisé le système de vision WINPROC du laboratoire et l'engin sous-marin VORTEX d'IFREMER.

Les signaux visuels utilisés dans la loi de commande sont les paramètres des droites dans l'image issues de la projection des limbes du pipe. Ces signaux sont extraits et suivis dans la séquence d'images à la cadence de 80 ms grâce aux possibilités de notre système de vision WINPROC (voir la section 3.5). Un effort particulier a été apporté au niveau des algorithmes de vision de manière à les rendre robustes vis-à-vis des conditions d'observation (ombres portées, reflets, ambiance « sous-marine »).

Au niveau de la commande de l'engin, l'absence de boucle d'asservissement au niveau des actionneurs et de possibilité de mesurer l'état du véhicule nous a conduit à réaliser une boucle complète en contrôlant directement la poussée des moteurs à partir des informations issues de l'image. Les commandes moteur étant relativement faibles autour du point de fonctionnement, nous avons également dû prendre en compte les problèmes de zones mortes des moteurs liés à la tension de décollement relativement importante.

L'ensemble de l'expérimentation a été simulé grâce au simulateur SIMPARC développé dans le projet. Le code effectivement exécuté sur le site est identique à celui exécuté en simulation. La figure 8 montre

¹Dynamechs est une bibliothèque de classes C++ développée à Naval Postgraduate School dédiée au calcul de la dynamique directe de systèmes couplés bras/véhicule

une image simulée du pipe avec les fenêtres. Les simulations ont permis de mettre en évidence des problèmes de stabilité liés au fait que certains degrés de liberté de l'engin ne sont pas contrôlés.

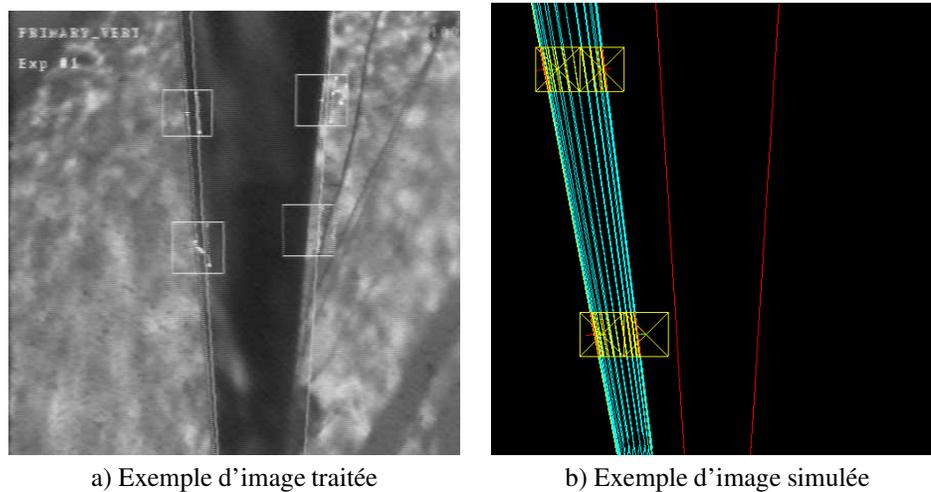


Figure 8: Inspection de pipe par asservissement visuel

3.5 Moyens expérimentaux

3.5.1 Laboratoire de robotique

Participants : Jean-Jacques Borrelly, Patrick Itey

Le laboratoire de robotique met à disposition des utilisateurs du projet ICARE trois plateformes expérimentales. Chacune de ces plateformes (éventuellement multiprocesseurs) fonctionne sous un système opératoire temps-réel VXWORKS. Tous les noyaux temps-réel correspondants possèdent l'option multiprocesseurs VXMP et l'option d'analyse temps-réel WINDVIEW. Ces plateformes sont interconnectées entre elles et reliées au réseau général par ETHERNET.

– 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.

La plateforme mobile est équipée d'une ceinture de huit capteurs ultrasonores. Ces capteurs sont pilotés par une carte processeur MVME162 à travers un module Industry-Pack dédié.

La plateforme a été équipée d'un bras manipulateur à 6 degrés de liberté placé sur l'avant. Ce bras ultra-léger possède un élément en carbone et est destiné à porter une caméra située sur l'organe terminal. Le bras a une longueur de 70 cm pour un poids de 15 kg. La vitesse angulaire maximale est de 180 degrés par seconde pour une précision inférieure au dixième de millimètre.

L'ensemble bras et électronique de puissance a été intégré sur la base mobile. Les asservissements de bas niveau (régulateurs P.I.D. articulaires) ont été mis en oeuvre sur une carte processeur MVME162 supplémentaire. Cette carte est équipée de quatre modules Industry-Pack permettant de réaliser l'interfaçage avec le bras (mesure des tops codeur, entrées-sorties analogiques entrées-sorties logiques). Chaque module est capable de gérer deux axes, soit un total de huit axes disponibles permettant une évolution future du contrôle de la base mobile.

- *Système de traitement d'images Temps Réel*
Le système modulaire de traitement de séquences d'images destiné aux applications de type asservissement visuel est composé de trois cartes :
 - la carte WINMAN assurent la gestion de l'ensemble,
 - la carte WINDIS développée par le Laboratoire d'Electronique de Clermont Ferrand prend en entrée un flot video 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.

Le logiciel WINTOOL permet de définir graphiquement une application de ce système de traitement d'images en spécifiant les caractéristiques matérielles de la configuration, les aspects temporels de l'application ainsi que les traitements à effectuer pour chaque fenêtre et pour tous les niveaux

3.5.2 Outils de simulation

Participant : Jean-Jacques Borrelly

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 multitâches 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.

4 Action industrielles

4.1 Groupement Robotique Sous-marine Méditerranée

Participants : Daniel Simon

Le G.R.S.M., créé en 1994, réunit des industriels et chercheurs œuvrant dans le domaine de la robotique sous-marine et essentiellement localisés dans le sud de la France. Il a notamment pour but de susciter le montage de projets de R&D dans ce domaine. Le projet ICARE a accueilli une réunion du Comité Directeur de ce groupement ayant donné lieu à la visite du centre.

4.2 Projet AIOLI

Participants : Patrick Rives, Daniel Simon

Ce projet, financé par le Conseil Régional PACA, réunit l'IFREMER, l'INRIA, CYBERNETIX et THOMSON-MARCONI-SONAR. Il a pour but de renforcer les moyens expérimentaux du laboratoire de Robotique et Intelligence Artificielle de l'Ifremer et a donné lieu au transfert payant d'une partie du logiciel ORCCAD développé dans le projet Icare.

4.3 Étalonnage de cellules robotisées

Participants : Gilles Guyot

Un accord de mise à disposition passé avec la Société KRYPTON, spécialisée dans l'étalonnage de cellules robotisées, permet à cette entreprise de garder Gilles Guyot, préalablement sur une bourse post-doc industrielle, pour une nouvelle période de six mois (à partir de septembre). Gilles Guyot participe au développement d'un nouveau composant du système d'étalonnage robotique commercialisé par l'entreprise.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Relations nationales

- E. Coste-Manière a organisé un séminaire INRIA/LAAS en mars 1996 sur le thème *Architectures de contrôle*.
- L. Pelletier, Ch. François, et D. Djian ont participé aux *Journées jeunes chercheurs en robotique* organisées cette année à Poitiers, les 13 et 14 juin.

5.2 Relations internationales

5.2.1 Europe de l'ouest

- Participation au projet UNION (UNderwater IntelligentOperation and Navigation), Basic Research Action Esprit 3 no 8972. Ce projet était coordonné par l'Ifremer (F) et a pour autres partenaires le Lirmm (F), Oxford University (UK), Herriot-Watt University (UK), Universitat Polytechnica de Catalunya (E) et Technique Universitat Munchen (D). Il avait pour thème l'étude des sous-ensembles (commande, navigation, programmation) destinés à être utilisés en intervention sous-marine complexe. Après deux ans d'activité, le projet a présenté les résultats obtenus lors de la revue finale du 7 octobre qui s'est tenue à Toulon dans les locaux de l'Ifremer. À cette occasion, l'Ifremer et l'Inria ont présenté une vidéo, réalisée en coproduction, qui retrace l'activité de l'ensemble des partenaires durant le projet [79, 85].
- ICARE était membre du réseau de laboratoires ERNET (European Robotics NETWORK) du programme Human Capital and Mobility qui s'est achevé en Février 1996. Ce réseau rassemblait 28 laboratoires de 10 pays européens dans le but d'échanger des post-docs et des chercheurs travaillant dans le domaine de la robotique. Il nous a permis d'accueillir D. Tsakiris.
- Le projet participe au groupe de travail informel MAROBOT, réunissant une trentaine de laboratoires et d'industriels européens dans le domaine de la robotique sous-marine.
- Dans le cadre du programme européen TMR, D. Tsakiris effectue un post-doc d'un an au sein du projet.
- Dans le cadre de la coopération scientifique et technique de la France et du Portugal, P. Rives a passé une semaine à l'Instituto Superior Technicò de Lisbonne en Mai. Dans ce même cadre, le professeur P. Lourtie a visité le projet pendant la dernière semaine d'Octobre.

5.2.2 Amérique

- E. Coste-Manière a passé quinze jours à Stanford dans le cadre de la collaboration entre l'INRIA et IFREMER et Stanford University/MBARI (USA) sur le thème *Evaluation of Mission Programming and Control Architecture for Underwater Robots* [70, 69].

- C. Samson a passé une semaine à l'université de McGill, Montréal. Il était invité par les organisateurs du Congrès ACFAS (13-17 mai 1996), la plus importante réunion francophone annuelle et multidisciplinaire au monde, dans le cadre de la session Robotique organisée par le professeur J. Angeles.
- D. Simon a été invité deux semaines au Centre de Recherche Informatique de Montréal et à l'université de Sherbrooke dans le cadre d'une coopération scientifique portant sur la modélisation et l'analyse de logiciels temps-réel embarqués.

5.3 Activités éditoriales, comité de programme et organisation de conférence

- C. Samson est membre de l'Operating Committee de l'European Control Conference (ECC).
- C. Samson est éditeur associé de la revue European Journal of Control (EJC).
- E. Coste-Manière est éditeur invité de la revue International Journal of Robotics Research (IJRR) pour le numéro spécial sur la thématique *Integrated Architectures for Robot Control and Programming*.
- P. Rives fait partie du comité de programme de la conférence IEEE Robotics and Automation qui se tiendra en Avril 1997 à Albuquerque et du comité de programme de IROS'97 qui aura lieu en Septembre à Grenoble.
- E. Coste-Manière a organisé une session spéciale intitulée *Architectures for Robot Control and Programming* [73] lors de la conférence International Symposium on Robotics and Manufacturing ISRAM'96/WAC'96 qui s'est déroulée en mai 1996 à Montpellier.
- Dans cette même conférence ISRAM'96/WAC'96, P. Rives a organisé une session spéciale intitulée *Sensor-based Control*.

6 Diffusion des résultats

6.1 Actions d'enseignement

C. Samson est responsable du thème « Robotique » du DEA ARAVIS (Algorithmique, Robotique, Automatique, Vision par ordinateur, Image et Signal) de l'Université de Nice-Sophia Antipolis. Ce thème comportait en 1995-96 quatre modules d'enseignement de quinze heures chacun. P. Rives est responsable, au sein de ce thème, du module d'enseignement *Introduction à la commande de robot*. En 1996-97, le thème robotique est constitué de trois modules. E. Coste-Manière est responsable du module d'enseignement *Architectures de contrôle*. Les heures d'enseignement indiquées ci-après se rapportent à l'année universitaire 1995-1996.

Introduction à la commande de robots DEA ARAVIS, 15 heures (P. Morin, P. Rives)

Architecture de contrôle DEA ARAVIS, 9 heures (E. Coste-Manière, D. Simon)

Introduction aux robots parallèles et aux robots mobiles DEA ARAVIS, 6 heures (C. Samson)

Temps Réel et robotique, ISIA, Ecole des Mines de Paris, 9 heures (Eve Coste-Manière et Nicolas Turro)

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

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

6.1.1 Autres enseignements

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

Architectures de contrôles Institut Supérieur d'Electronique de le Méditerranée, 3ème année, 4 heures (E. Coste-Manière)

6.1.2 Thèses

– Thèses en cours :

1. J.L. Carrilho-Sequeira, « Fusion multicapteurs pour la robotique mobile », Thèse en cotutelle entre l'UNSA et l'Universidade Técnica de Lisboa
2. D. Djian, « Stratégies de perception active », École des Mines de Paris
3. L. Pelletier, « Prise en compte d'informations sensorielles dans la planification de trajectoire en robotique mobile », Université de Nice-Sophia Antipolis.
4. Nicolas Turro, « Méthodologie de programmation de missions pour systèmes robotiques autonomes ou semi-autonomes », Université de Nice-Sophia Antipolis.
5. Soraya Arias, « Formalisation de modules perceptifs réactifs », Université de Nice-Sophia Antipolis.
6. David Lizarraga-Navarro, « Commande de robots mobiles. A la poursuite de trajectoires impossibles », E.N.S.I.E.G, Université de Grenoble.

– Thèses soutenues en 1996 :

1. Charles François, « Commande de robots à pattes », École des Mines de Paris, thèse soutenue le 10 avril.
2. Pascal Morin, « Commande par retour d'état instationnaire », École des Mines de Paris, thèse soutenue le 7 juin.

– C. Samson et P. Rives ont participé à 12 jurys de thèse dont 8 en tant que rapporteurs.

– C. Samson était rapporteur pour la soutenance d'habilitation à diriger des recherches de L. Pronzato, I3S, mai.

6.1.3 Stages

Le projet a accueilli les stagiaires suivants :

- Soraya Arias « Étude et développement d'une maquette de générateur de code en vision robotique », DEA ARAVIS, Université de Nice-Sophia Antipolis, en collaboration avec le projet ROBOTVIS, 8 mois.
- Tat-Thinh Dang « Commande en positionnement d'un robot mobile équipé d'une caméra », DEA ARAVIS, Université de Nice-Sophia Antipolis, 5 mois.

6.2 Participation à des colloques

Les membres du projet ont été présents aux conférences et colloques suivants :

- *AF CET Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Rennes, janvier 1996 (P. Rives, D. Djian)

- *6th IARP workshop on Underwater Robotics*, Toulon, mars 1996 (D. Simon, E. Coste-Manière)
- *IEEE Robotics on Automation*, Minneapolis, USA, avril 1996 (E. Coste-Manière)
- *World Automatic Congress*, Montpellier, mai 1996 (P. Rives, E. Coste-Manière)
- *Congrès ACFAS*, Montréal, mai 1996 (C. Samson)
- *International Conference on control, Automation, Robotics and Vision*, Singapour, décembre 1996 (P. Rives)
- *35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japon, décembre 1996 (C. Samson)

6.3 Conférences invitées, tutoriels

C. Samson, P. Rives et D. Tsakiris ont été invités à présenter leurs travaux à ICARCV'96 en décembre à Singapour

6.4 Animations scientifiques

- C. Samson est président du Comité des Bourses de l'U.R. de Sophia-Antipolis et membre du Conseil de Direction du GR-PRC « Automatique ».
- E. Coste-Manière est membre de la commission ACTIVITÉ DE FORMATION de l'Inria-Sophia Antipolis. Elle a mis en place :
 - un serveur WWW *La Formation à l'INRIA Sophia Antipolis* (par exemple, propositions de stages disponibles à Sophia),
 - des cours pour doctorants,
 - et des stages en entreprise pour doctorants...

Elle a organisé les journées d'accueil à l'INRIA Sophia Antipolis des étudiants de l'École Polytechnique et de l'École Normale Supérieure de Lyon, et gère le serveur WWW du projet ICARE.

6.5 Diffusion de logiciels

Le prototype de la couche contrôle logique d'ORCCAD a fait l'objet d'une mise à disposition payante auprès du laboratoire de Robotique et Intelligence Artificielle de l'Ifremer.

7 Publications

Thèses

- [65] C. FRANÇOIS, *Contribution à la locomotion articulée dynamiquement stable*, thèse de doctorat, École des Mines de Paris, avril 1996.
- [66] P. MORIN, *Sur la stabilisation par retour d'état instationnaire*, thèse de doctorat, École des Mines de Paris, juin 1996.

Articles et chapitres de livre

- [67] D. P. TSAKIRIS, C. SAMSON, P. RIVES, «Vision-based Time-varying Mobile Robot Control», in : *Advances in Robotics: The ERNET Perspective*; World Scientific Publishing Co., Eds. C. Bonivento, C. Melchiorri and H. Tolle, 1996.
- [68] THE ZODIAC, *Chapter 9: Mobile Robots. Nonlinear Feedback Control*, Springer-Verlag London Limited Communications and Control Engineering, 1996.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [69] E. COSTE-MANIÈRE, H. H. WANG, S. M. ROCK, V. RIGAUD, A. PEUCH, M. PERRIER, M. J. LEE, «Joint Evaluation of Mission Programming for Underwater Robots», in : *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 2492–2497, Minneapolis, USA, avril 1996.
- [70] E. COSTE-MANIÈRE, H. H. WANG, S. M. ROCK, V. RIGAUD, A. PEUCH, M. PERRIER, «Cooperative Research in Underwater Robot Mission-Level Programming Methodologies», in : *6th IARP workshop on Underwater Robotics*, Toulon, France, mars 1996.
- [71] D. DJIAN, P. RIVES, P. PROBERT, «Reconnaissance de modèles géométriques simples à l'aide de réseaux bayésiens», in : *10ième Congrès AFCET Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Rennes, France, 16-18 janvier 1996.
- [72] D. DJIAN, P. RIVES, P. PROBERT, «Training Bayes Nets for Model-Based Recognition», in : *4th Int. Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Westin Stamford, Singapore, décembre 3-6 1996.
- [73] B. ESPIAU, K. KAPellos, E. COSTE-MANIÈRE, N. TURRO, «Formal Mission Specification in an Open Architecture», in : *Isram'96*, Montpellier, France, mai 1996.
- [74] P. MORIN, J.-B. POMET, C. SAMSON, «A new method for the design of homogeneous time-varying stabilizing control laws for driftless controllable systems», in : *Int. Conf. of Mathematical Theory of Networks and Systems*, St. Louis, 1996.
- [75] P. RIVES, R. PISSARD-GIBOLLET, L. PELLETIER, «Sensor-based Tasks: From the Specification to the Control Aspects», in : *6th Int. Symposium on Robotics and Manufacturing*, Montpellier, France, mai 28 - 30 1996.
- [76] D. SIMON, K. KAPellos, B. ESPIAU, «Control Laws, Tasks and Procedures with ORCCAD: Application to the Control of an Underwater Arm», in : *6th IARP workshop on Underwater Robotics*, Toulon, France, mars 1996.
- [77] D. TSAKIRIS, C. SAMSON, P. RIVES, «Vision-Based Time Varying Stabilization of a Mobile Manipulator», in : *4th Int. Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Westin Stamford, Singapore, décembre 3-6 1996.

Rapports de recherche et publications internes

- [78] S. ARIAS, *Étude et développement d'une maquette de générateur de code en vision robotique*, Mémoire, Dea Université de Nice Sophia Antipolis, 1996.
- [79] E. COSTE-MANIÈRE, V. RIGAUD, E.A., «UNION, UNderwater Intelligent Operation and Navigation», *Rapport de Recherche n°3038*, Inria, 1996.
- [80] C. FRANÇOIS, C. SAMSON, «Energy Efficient Control of Running Legged Robots. A Case Study : The Planar One-Legged Hopper», *Rapport de recherche no. 3027*, INRIA, octobre 1996.
- [81] P. MORIN, C. SAMSON, «Application of backstepping techniques to the time-varying exponential stabilization of chained form systems», *Rapport de recherche no. 2792*, INRIA, février 1996.
- [82] P. RIVES, «Sensor-Based Control», *Final report*, UNION WorkPackage 6, août 1996.

- [83] D. SIMON, K. KAPellos, «Mission Programming: Experiments», *Final report*, UNION WorkPackage 2, août 1996.
- [84] N. TURRO, E. COSTE-MANIÈRE, «Mission Programming Language», *Final report*, UNION WorkPackage 2, août 1996.

Œuvres audiovisuelles

- [85] E. COSTE-MANIÈRE, V. RIGAUD, E.A., UNION: *UNderwater intelligent Operation and Navigation*, 22mn30, 1996, Coproduction Inria-UCIS Audiovisuel/Ifremer.
- [86] P. RIVES, J.-J. BORRELLY, M. PERRIER, *Visual Servoing Techniques Applied to Underwater Vehicles*, 5mn, 1996, Coproduction Inria-UCIS Audiovisuel/Ifremer.

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 has also participated to several European Projects.

