

*Projet icare**Instrumentation, Commande et  
Architecture des Robots Évolués**Sophia Antipolis*

THÈME 4A



*R*apport  
*d'**A*ctivité

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>1</b>
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>1</b>
3.1. Robots et commande	1
3.2. Commande des systèmes non-linéaires	3
3.3. Perception pour la modélisation	4
3.3.1. Modélisation géométrique	4
3.3.2. Reconnaissance de structures connues	5
3.4. Navigation de robots mobiles	5
3.4.1. Perception et planification de tâches	5
3.4.2. Perception et contrôle d'exécution	6
3.5. Moyens Expérimentaux	7
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>7</b>
4.1. Panorama	7
4.2. Robotique sous-marine	7
4.3. Conduite automatisée	8
4.4. Drones aériens d'observation	9
<b>5. Logiciels</b>	<b>9</b>
5.1. VPI	9
5.2. Simparc	10
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>10</b>
6.1. Stabilisation de robots mobiles et de systèmes non-linéaires	10
6.1.1. Nouvelles classes de fonctions transverses	10
6.1.2. Stabilisation asymptotique de trajectoires de référence	10
6.1.3. Poursuite référencée vision d'une cible manœuvrante par un robot mobile	11
6.1.4. Commande d'un bras manipulateur mobile appliquée au suivi de cible	11
6.2. Perception pour la modélisation	12
6.2.1. Reconstruction 3D d'objets naturels sous-marins par vision dynamique	12
6.3. Navigation de robots mobiles	13
6.3.1. Localisation, exploration et cartographie d'un environnement d'intérieur inconnu	14
6.3.2. Localisation précise de véhicule en environnement urbain	16
6.4. Commande référencée vision sans calibration en environnement inconnu	17
6.4.1. Une approche unifiée d'asservissement visuel	17
6.4.2. Robustesse de l'asservissement et poursuite de trajectoire dans l'espace invariant	18
6.4.3. Utilisation des droites comme amers visuels	18
6.4.4. Cas particulier d'une cible plane	21
6.5. Contrôle d'un dirigeable par asservissement visuel	21
6.5.1. Stabilisation et atterrissage automatique :	23
6.5.2. Suivi de structures linéiques :	23
<b>7. Contrats industriels</b>	<b>23</b>
7.1. Action avec Ifremer	23
7.2. Action Sagem SA/ Johnson Controls Inc.	24
7.3. Projet CyberCars	24
<b>8. Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>24</b>
8.1. Actions nationales	24
8.1.1. RTP « Systèmes Aérospatiaux » du CNRS	24
8.1.2. Programme ROBEA du CNRS	25

8.2. Actions européennes	25
8.2.1. Collaboration INRIA/ICCTI	25
8.3. Actions internationales	25
8.3.1. Collaboration INRIA/CNPq	25
<b>9. Diffusion des résultats</b>	<b>25</b>
9.1. Animation de la Communauté scientifique	25
9.2. Participation à des colloques	25
9.3. Participation à des activités d'intérêt collectif	26
9.4. Formation par la recherche	26
9.5. Enseignement	26
<b>10. Bibliographie</b>	<b>27</b>

# 1. Composition de l'équipe

**Responsable scientifique**

Claude Samson [DR]

**Responsable permanent**

Patrick Rives [DR (50% Action VISA)]

**Assistante de projet**

Patricia Maleyran [TR]

**Personnel INRIA**

Pascal Morin [CR]

Ezio Malis [CR]

Jean-Jacques Borrelly [IR équipe DREAM]

**Chercheurs doctorants**

François-Xavier Espiau [boursier IFREMER jusqu'au 28/02/2002]

Alessandro Corrêa-Victorino [boursier CAPES jusqu'au 30/11/2002]

Guillaume Artus [boursier INRIA]

Nicolas Simond [boursier INRIA]

Matthieu Fruchard [boursier INRIA à partir du 02/04/2002]

Selim Benhimane [boursier INRIA à partir du 01/10/2002]

**Stagiaire**

Selim Benhimane [Stage de DEA, fin d'études ENSPS Strasbourg]

## 2. Présentation et objectifs généraux

Les activités du projet ont pour cadre la modélisation et la commande des systèmes mécaniques (robots manipulateurs, robots mobiles, véhicules sous-marins,...) dotés de dispositifs sensoriels (capteurs à ultrasons, télémètre laser, vision, centrale inertielle,...) et destinés à réaliser des tâches complexes impliquant une forte interaction avec l'environnement.

De ce fait, notre vision du problème de commande des robots ne se résume pas à l'approche automatique traditionnelle axée sur l'algorithme de commande. Elle implique, en complémentarité, de modéliser les interactions avec l'environnement et développer les fonctions sensorielles nécessaires à une bonne réalisation de la tâche. 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, d'un télémètre laser rotatif 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. Par le biais de l'action VISA (Véhicules Intelligents et Système Autonomes), transversale aux projets de recherche de l'U.R. de Sophia-Antipolis, le projet Icare pourra également valider les résultats de ses recherches sur un véhicule CyCab lors d'expérimentations en environnement d'extérieur. Les activités sur ce véhicule refléteront notre participation au programme européen CYBERCARS, et elles s'inscrivent dans le cadre de l'axe prioritaire *transports* de l'INRIA. Nous essayons en parallèle de développer d'autres moyens expérimentaux dans le cadre de partenariats, avec l'IFREMER pour ce qui touche à la robotique sous-marine, ainsi qu'avec l'I.T.I. de Campinas (Brésil) et l'I.S.T. de Lisbonne (Portugal) pour la commande de véhicules aériens robotisés (drônes).

## 3. Fondements scientifiques

### 3.1. Robots et commande

**Participants :** Claude Samson, Pascal Morin, Guillaume Artus, Matthieu Fruchard.

**Mots clés :** *système holonôme, système non-holonôme, bras manipulateur, robot mobile, robot à pattes.*

Les mécaniques de robots sont généralement conçues en fonction des applications et tâches auxquelles on les destine. Une première classification permet de distinguer trois grandes catégories, à savoir

- i) les *bras manipulateurs*, avec une forte représentation en milieu manufacturier dans les domaines de l'assemblage et de la manutention,
- ii) les *robots mobiles sur roues*, dont la mobilité permet d'aborder des applications plus diversifiées (robotique manufacturière, mais aussi de service et de transports), et
- iii) les *robots à pattes*, dont la complexité et l'étude plus récente expliquent qu'ils soient encore largement cantonnés aux expérimentations de laboratoire.

Cette classification, bien qu'usuelle, ne suffit pas à entièrement rendre compte de la variété des mécanismes robotiques. Il faudrait par exemple y ajouter tous les mécanismes hybrides, résultant de l'association bras manipulateur/base mobile, ainsi que les véhicules marins (navires de surface et sous-marins) et les véhicules aériens (drônes, dirigeables) robotisés.

Chaque catégorie de robots induit des caractéristiques de mouvement ainsi que des problèmes de commande spécifiques. Les formalismes mathématiques (de Newton, Euler-Lagrange,...) universellement utilisés pour écrire les équations de la dynamique, génériquement *non-linéaires*, de ces systèmes sont classiques et relativement bien maîtrisés. À ce niveau, les différences entre bras manipulateurs et véhicules sur roues résultent principalement de l'existence de deux grands types de *liaisons cinématiques*. De façon générale, ces liaisons (ou contraintes) sont exclusivement *holonomes*, c'est-à-dire complètement intégrables, dans le cas des bras manipulateurs, alors que la liaison roue-sur-plan qui caractérise les robots mobiles est *non-holonôme* (i.e. non complètement intégrable). Pour cette raison, il est usuel de dire que les bras manipulateurs sont des systèmes mécaniques holonomes, et que les robots mobiles (sur roues) sont non-holonomes. Une propriété structurelle immédiate d'un mécanisme holonôme est l'égalité de la dimension de l'*espace de configuration* et du nombre de *degrés de liberté* (i.e. la dimension de l'espace des vitesses instantanées) du système. Le fait que la dimension de l'espace de configuration d'un système non-holonôme soit, quant à elle, strictement supérieure au nombre de degrés de liberté est, de façon bien compréhensible, source d'une plus grande difficulté à commander ce type de système.

L'application de théorèmes classiques de géométrie différentielle, repris dans le cadre de la Théorie de la Commande, permet toutefois de déduire une propriété fonctionnelle importante, commune aux deux types de systèmes lorsque ceux-ci sont *complètement actionnés* (i.e. possèdent un actionneur par degré de liberté), à savoir la propriété d'être *localement commandables en temps petit* en tout point de l'espace d'état. Il s'agit d'une propriété de commandabilité *forte*, puisqu'elle signifie essentiellement que tout point voisin peut être atteint en un temps arbitrairement court -à condition de ne pas imposer de limitations sur les actionneurs- tout en maintenant l'état transitoire du système dans le voisinage du point initial.

Le cas de systèmes *sous-actionnés*, pouvant correspondre à un fonctionnement nominal pour lequel la stabilité naturelle de certaines composantes de l'état (le roulis d'un navire, par exemple) permet de faire l'économie d'un ou plusieurs actionneurs, ou encore à un mode de fonctionnement dégradé (panne d'actionneur), est beaucoup plus complexe, et a jusqu'à présent résisté aux tentatives -encore peu nombreuses, il est vrai- de classification basée sur les différentes notions de commandabilité. Tout juste est-il possible de dire que certains de ces systèmes restent commandables dans le sens évoqué précédemment, alors que d'autres perdent cette propriété tout en étant commandables en un sens plus faible, et que d'autres encore deviennent non commandables.

La commandabilité d'un système robotique complètement actionné n'implique pas pour autant que la synthèse de lois de commande appropriées soit simple. Le cas le plus favorable est celui des bras manipulateurs holonomes dont les équations sont *linéarisables par retour d'état statique*. Cette propriété permet de dire que ces systèmes sont « faiblement » non-linéaires. La transposition des techniques classiques de commande des systèmes linéaires, pour la réalisation d'objectifs de commande élémentaires (tel que le suivi de trajectoire articulaire), constitue une alternative viable, d'ailleurs largement utilisée dans la pratique. A contrario, le

modèle linéarisé d'un robot mobile non-holonôme, déterminé en une configuration d'équilibre quelconque, n'est pas commandable. La linéarisation des équations de ce robot par retour d'état dynamique, lorsqu'elle est possible, présente toujours aussi des singularités aux points d'équilibre. Le point peut-être le plus marquant, par ses implications sur les plans pratique et théorique, est qu'il n'existe pas de retour d'état continu, fonction uniquement de l'état du système, capable de stabiliser asymptotiquement une posture désirée. Il souligne le caractère fondamentalement non-linéaire de ce type de système et la nécessité de recourir à des techniques de commande se démarquant profondément des méthodes classiquement utilisées dans le cadre des systèmes linéaires ou linéarisables.

Le cas des robots à pattes, et de la locomotion articulée en général, est encore très différent en ce que ces systèmes échappent, pour la plupart, à la classification holonôme/non-holonôme évoquée précédemment. Leur mise en équations requiert de décomposer le mouvement en plusieurs phases (selon le nombre de pattes en appui sur le sol). Celles de vol balistique (lorsqu'aucune patte ne touche le sol) impliquent souvent des liaisons non-holonômes de par la conservation du moment cinétique, ainsi que la modélisation de phénomènes d'impact intervenant aux instants où une patte rencontre le sol. L'analyse du fonctionnement de ces systèmes mécaniques est étonnamment complexe, même pour les plus simples d'entre eux (tels que le compas -bipède-marcheur et le monopode -unijambiste- sauteur). Elle augmente encore à mesure que l'on cherche à pousser la correspondance entre certains fonctionnements nominaux de ces systèmes et les *allures* des systèmes biologiques (telles que la marche, la course, le trot, le galop,...) de structure comparable. Il est maintenant communément admis, bien qu'imparfaitement compris, que l'existence de telles allures (pseudo-périodiques), et les mécanismes de transition entre elles, sont étroitement liés à des considérations de consommation énergétique. Dans cette optique, la commande a pour rôle premier « d'identifier » les trajectoires pour lesquelles cette consommation est minimale, et de les stabiliser.

Un des objectifs de recherche du projet ICARE est de faire progresser les solutions de commande de ces différents systèmes robotiques. Cette recherche est fédératrice de collaborations (passées, présentes, et futures) avec plusieurs projets de l'Inria : les projets MIAOU (Jean-Baptiste Pomet), BIP, et SHARP, en particulier.

## 3.2. Commande des systèmes non-linéaires

**Participants :** Claude Samson, Pascal Morin, Guillaume Artus, Matthieu Fruchard.

**Mots clés :** *système non linéaire, stabilisation par retour d'état, commande robuste.*

Les mécaniques robotisées, ou « robotisables », étant structurellement des systèmes non-linéaires qu'il s'agit en pratique de commander de façon efficace et *robuste*, le projet ICARE a naturellement une activité dans le domaine de l'Automatique ayant trait à la théorie de la commande des systèmes non-linéaires. Au niveau des développements fondamentaux et méthodologiques réalisés de par le monde dans ce domaine, l'étude des systèmes mécaniques et de leur automatisation, constituant l'axe central du champ multidisciplinaire qu'est la Robotique, a eu, et continue d'avoir, un rôle privilégié [39]. Ceci s'inscrit d'ailleurs dans la continuité historique, puisqu'on peut dire que l'Automatique, en tant que science de l'ingénieur, a sa genèse dans la régulation de systèmes mécaniques (depuis le régulateur centrifuge de Watt au 18ème siècle, les pilotes automatiques de navires de Minorsky en 1922, et les problèmes de guidage et de stabilisation d'engins aériens ou spatiaux après la seconde guerre mondiale). Plus récemment, les bras manipulateurs ont servi de modèle pour illustrer l'intérêt de la théorie de la linéarisation par retour d'état. Les études de robustesse aux erreurs de modélisation (résultant d'incertitudes sur les paramètres mécaniques, sur les paramètres des capteurs extéroceptifs, ou sur l'environnement observé par ces capteurs) ont permis d'affiner les analyses de stabilité à base de fonctions de Lyapunov et d'illustrer l'intérêt des approches utilisant les propriétés structurelles de passivité associées aux systèmes hamiltoniens. Plus récemment encore, l'étude de la commande des robots mobiles non-holonômes a servi de point de départ au développement de nouvelles approches, telles que la caractérisation de la propriété différentielle de *platitude* [38], utilisée pour résoudre des problèmes de planification de trajectoires, ou encore les techniques de commande par *retour d'état continu instationnaire* [32], utilisées pour résoudre le problème de stabilisation asymptotique en un point.

Dans ce contexte, les travaux menés au sein du projet ICARE sont principalement axés sur les aspects de stabilisation par retour d'état. Dans le cas des bras manipulateurs, ils ont abouti à l'approche dite par *fonctions de tâche* [9] qui représente aujourd'hui le cadre standard utilisé pour aborder les problèmes de commande référencée capteurs. Nos études de commande de robots mobiles [10] sont, quant à elles, à l'origine de la théorie de la stabilisation des systèmes non-linéaires par *retour d'état continu instationnaire* et, plus récemment encore, d'une nouvelle approche de *stabilisation pratique* des systèmes « fortement » non-linéaires [35]

### 3.3. Perception pour la modélisation

**Participants :** Patrick Rives, Ezio Malis, Jean-Jacques Borrelly, Alessandro Corrêa-Victorino, François-Xavier Espiau.

**Mots clés :** *perception active, traitement d'images, télémétrie laser, reconstruction 3D, cartographie.*

La réalisation d'une tâche en robotique nécessite de savoir acquérir et manipuler des modèles de l'environnement à partir des informations fournies par des capteurs extéroceptifs. Parfois, la finalité même de la tâche est la construction de ces modèles. D'autres fois, ces modèles serviront d'entrée à un module de planification ou seront utilisés directement dans des boucles de commande. Dans tous les cas, la fiabilité des représentations, et donc des fonctions de perception ayant permis de les construire, est une condition essentielle à la bonne réalisation de la tâche. Tout comme les humains, les robots évoluent dans un monde physique tridimensionnel sur lequel ils exercent des actions régies par les lois de la physique. Cette caractéristique se retrouve dans les modèles manipulés qui seront le plus souvent des représentations tridimensionnelles surfaciques ou volumiques, décrites dans un repère de l'espace euclidien et soumises à l'action du groupe des déplacements  $SE3$ . Malheureusement, les capteurs extéroceptifs utilisés en robotique sont rarement capables de nous fournir directement des modèles de ce type et une grande part du travail de modélisation consistera à passer de la mesure brute fournie par les capteurs au modèle nécessaire à l'exécution de la tâche. L'éventail des problèmes de perception en robotique est très large, avec deux types de problèmes que l'on peut qualifier de canoniques :

- **la modélisation géométrique :** il s'agira, à partir des mesures fournies par les capteurs de construire une représentation géométrique de l'environnement, c'est le problème de l'estimation de la structure géométrique,
- **la reconnaissance de structures connues :** il s'agira de découvrir à partir des mesures capteur, la présence dans l'environnement de structures particulières souvent décrites par un modèle caractérisant une classe générique d'objet.

#### 3.3.1. Modélisation géométrique

Historiquement, le problème de la modélisation géométrique est lié à la manipulation d'objets par des robots industriels à poste fixe. Il s'agissait alors de reconstruire des objets géométriques de forme relativement simple, dont on possédait souvent un modèle et qui se trouvaient dans un volume de travail limité en dimension. Les approches étaient le plus souvent pilotées par les modèles de façon à exploiter, au mieux, la connaissance a priori sur l'application. L'essor de la robotique mobile a fait apparaître de nouvelles problématiques du fait que :

- l'espace dans lequel évolue le robot est de grande dimension et la localisation du robot dans cet espace est le plus souvent incertaine,
- les modèles à reconstruire peuvent provenir d'objets naturels non structurés dont l'observation complète nécessite de déplacer le capteur et de fusionner plusieurs perceptions partielles,
- les déplacements du robot entre les différents points de vue ne sont pas connus précisément, voire sont soumis à des termes de dérives.

Dans ces conditions, les approches pilotées par le modèle se révèlent le plus souvent inefficaces. Il est donc important de formaliser des méthodes de reconstruction robustes s'appuyant au maximum sur les données en



ne conservant de l'aspect modèle que des propriétés élémentaires telles que, par exemple, la contrainte de rigidité globale. Le succès de ces méthodes dépendra fortement de la qualité des algorithmes d'extraction des mesures.

Au sein du projet ICARE, nous nous intéressons à deux modalités sensorielles très répandues en robotique mobile : la télémétrie et la vision. Les approches que nous développons sont basées sur la détection robuste de primitives géométriques locales, stables et caractéristiques de l'environnement. La cohérence entre ces primitives locales est assurée par une contrainte globale de rigidité exprimée sous forme d'un graphe. Le modèle obtenu est mis à jour durant le déplacement du robot par le biais de techniques de filtrage robustes.

### 3.3.2. *Reconnaissance de structures connues*

La reconnaissance des formes et l'analyse de scène sont des thèmes de recherches difficiles qui ont suscité des travaux depuis de nombreuses années dans le domaine de la perception. Dans le contexte de la robotique mobile d'intervention, cette fonction de reconnaissance fait partie des fonctions de bases nécessaires au robot dans l'exécution de sa tâche. Par exemple, après un accident ou une catastrophe naturelle, le robot devra être capable d'identifier des passages (portes, couloirs, escaliers...) lui permettant de continuer son exploration et de maintenir une description topologique de son environnement. Il peut avoir également à retrouver certains objets dans son environnement (opération de déminage, par exemple). Sur le plan scientifique, cette thématique est extrêmement riche du fait qu'elle nécessite de définir des modèles incomplets et incertains et de gérer la connaissance a priori et acquise au cours du temps par les capteurs. L'aspect modélisation devra à la fois prendre en compte la variabilité géométrique des classes de modèles (portes, couloirs...) et fournir des représentations invariantes vis à vis de l'observation (prise en compte des occlusions et des différents « aspects » géométriques). Dans ce contexte viendront s'insérer naturellement les problèmes d'apprentissage des modèles. L'aspect décision devra manipuler l'incertitude sur les capteurs et les modèles et s'appuyer sur une stratégie de reconnaissance.

Dans ce contexte, nous avons développé une approche basée sur l'utilisation de réseaux bayésiens et d'une stratégie de perception active [2] afin de rechercher et d'identifier des structures caractéristiques de l'environnement (portes, fenêtres) pouvant servir d'amers ou caractériser des points de passage entre lieux d'un modèle topologique.

## 3.4. Navigation de robots mobiles

**Participants :** Patrick Rives, Ezio Malis, Jean-Jacques Borrelly, Alessandro Corrêa-Victorino.

**Mots clés :** *planification et commande référencée capteur, carte de visibilité, réactivité et navigation sûre d'un robot mobile, localisation, capteur de vision et de télémétrie, coopération multisensorielle.*

La problématique de la navigation et du pilotage d'engins dits *autonomes* ou *semi-autonomes*, longtemps cantonnée au domaine de la robotique d'intervention, s'ouvre aujourd'hui vers de nombreux autres champs applicatifs : transport, véhicules individuels, drones aériens ou engins sous-marins d'observation... Dans tous les cas, il s'agit de faire évoluer des systèmes de façon sûre dans des environnements imparfaitement connus en contrôlant les interactions entre l'engin et son environnement. Ces interactions peuvent prendre différents aspects : actions de la part du robot (se positionner par rapport à un objet, manœuvrer pour se garer ...), réactions vis-à-vis d'événements provenant de l'environnement (éviter des obstacles, poursuivre une cible...). Le degré d'autonomie et de sûreté du système réside dans la capacité de prendre en compte ces interactions à tous les niveaux de la tâche. En premier lieu, lors de la planification de la tâche, cela se fera par l'acquisition, la modélisation et la manipulation des connaissances sur l'environnement et sur la tâche. Enfin, durant l'exécution, il s'agira d'exploiter les données perceptuelles pour adapter au mieux le comportement du système aux conditions de la tâche qu'il réalise.

### 3.4.1. *Perception et planification de tâches*

La modélisation d'environnement en vue de la planification des actions est un thème majeur en robotique [6], [7], [33]. Il se décline en de nombreuses variantes suivant la connaissance a priori dont on dispose :

d'une connaissance complète permettant la planification hors-ligne de la tâche jusqu'à une absence totale de connaissance nécessitant une acquisition en ligne du modèle durant une phase d'exploration. On a coutume de distinguer différentes problématiques en fonction du but de la perception : i) percevoir pour planifier un déplacement, ii) percevoir pour se localiser. Dans le premier cas, on fera une distinction supplémentaire entre la construction de *modèles géométriques* destinés à la planification de *trajectoires cartésiennes* admissibles de l'espace libre et la construction de *modèles topologiques* destinés à la planification de couloirs de navigation (*chemins*) et permettant de représenter l'accessibilité entre les différentes régions (*lieux*) constituant l'environnement. Pour ce qui est des modèles géométriques, ils seront fréquemment réduits, dans le cas d'environnements d'intérieurs, à une représentation polygonale des obstacles obtenue grâce à un balayage horizontal d'un télémètre (laser ou ultrason). Malgré cette apparente simplicité, la construction et la mise à jour de tels modèles demeurent difficiles, notamment au niveau de la gestion des incertitudes lors de la fusion de plusieurs acquisitions durant le déplacement du robot. Les modèles topologiques sont des représentations plus abstraites pouvant être construites par une structuration des modèles géométriques (segmentation en régions connexes définissant des lieux). Leur utilisation ouvre sur une autre problématique qui est la recherche et la reconnaissance des points de passage entre différents lieux (par exemple des portes dans une scène d'intérieur) à l'aide de techniques de reconnaissance des formes.

Dans le cas de la perception dans un but de localisation, la problématique est un peu différente. Il s'agit alors de maintenir une estimée de l'état du robot, (en général, sa position et son orientation) durant son déplacement. Les techniques utilisées sont celles du filtrage. Afin de compenser les dérives introduites par la plupart des capteurs proprioceptifs (odomètres, centrales inertiels...), la majorité des approches, qualifiées d'hybrides, utilise des données acquises sur l'environnement par le biais de capteurs extéroceptifs pour effectuer un recalage sur des structures caractéristiques de la scène (amers). La mise en œuvre de ce type d'approche soulève de nombreux problèmes quant à la sélection, l'extraction fiable et l'identification de ces amers dans le cas d'environnements non connus a priori. Les approches que nous développons s'appuient sur deux idées : i) faire coopérer au mieux les différentes modalités sensorielles (proprio et extéroceptives), ii) utiliser des lois de commande référencées capteurs pour imposer des contraintes sur les problèmes de localisation et de modélisation géométrique et, de ce fait, les rendre mieux conditionnés [40].

### 3.4.2. Perception et contrôle d'exécution

De même qu'il est important de prendre en compte le processus de perception très tôt au niveau de la planification de la tâche, il est tout aussi indispensable de contrôler l'interaction entre le robot et son environnement lors de son exécution [37]. Cela se traduit 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 d'événements externes nécessitant une modification du comportement du système (aspect réactif). Dans les deux cas, il s'agit de rendre robuste le comportement du système face à une certaine variabilité des conditions d'exécution de la tâche. Cette variabilité peut provenir d'erreurs de mesures ou de modèle dues aux capteurs ou aux systèmes commandés, mais elle peut également provenir de l'environnement qui peut être mal connu ou incertain. Au niveau des lois d'asservissement, il s'agit de synthétiser des schémas de commande en boucle fermée sur les informations perceptuelles traduisant au mieux les objectifs de la tâche. L'utilisation de lois de commande référencées capteurs et du formalisme des fonctions de tâche permet de traduire ces objectifs en termes de régulation d'une fonction de sortie qui pourra, suivant la tâche, être exprimée soit dans l'espace de configuration du système commandé soit, directement, dans l'espace de perception. L'aspect réactif vis-à-vis d'événements extérieurs perturbant le déroulement de la tâche requiert, d'une part, la détection de ces événements et, d'autre part, d'associer à leur détection un nouveau comportement du système. Dans le cas de la perception, ces deux aspects peuvent être élégamment réalisés en utilisant le formalisme des *capteurs logiques* introduits par Henderson.

Un axe de recherche est consacré à l'analyse et la synthèse de lois de commande référencées capteurs. Les formalismes utilisés (fonctions de tâche, liaisons virtuelles) permettent de définir ces lois à tous les niveaux de la spécification jusqu'à l'implémentation effective. En associant à ces lois de commande un comportement logique, il est alors possible de définir des *actions élémentaires référencées capteurs* (par exemple, suivi de

mur) pouvant être manipulées au niveau de la planification tout en garantissant une bonne robustesse au niveau de l'exécution. La généricité des formalismes permet d'envisager leur application à différents capteurs utilisés en robotique (odométrie, capteurs d'effort, centrale inertielle, proximité, vision locale,...).

### 3.5. Moyens Expérimentaux

**Participant :** Jean-Jacques Borrelly [ Ingénieur DREAM].

Le projet Icare développe et maintient une plate-forme expérimentale dédiée à la robotique mobile d'intérieur.

- *Plate-forme mobile avec système de perception*  
Cette plate-forme est constituée d'une base mobile et d'un bras manipulateur à six degrés de liberté embarqué. Elle est également équipée d'une ceinture de huit capteurs ultra-sonores, d'une caméra située sur l'organe terminal du bras et d'un télémètre laser placé sur le premier axe du bras.
- *Système de vision*  
Le système de vision est constitué d'une carte de traitement bas niveau (gestion de fenêtres, convolutions, extraction de points d'intérêt...), d'une carte de traitement intermédiaire basée sur quatre modules DPS96002 (détermination des paramètres caractéristiques des motifs recherchés par fenêtre) et d'une carte processeur d'usage général pour la gestion de l'ensemble et les traitements haut niveau.
- *Télémètre laser*  
Le télémètre laser ACCURANGE-4000 dont la portée est de l'ordre d'une quinzaine de mètres, possède un système de balayage par miroir tournant. L'ensemble permet d'obtenir une coupe dans un plan sur 2000 points de mesure en 40 millisecondes.

Depuis mai 2001, l'Action de développement VISA locale à Sophia met à la disposition des projets de recherches de l'UR une plate-forme d'expérimentation destinée à valider les recherches dans le domaine des *Véhicules du futur*. Dans le cadre des thèses financées par le projet européen *CyberCars* sur la navigation et la conduite automatique, le projet Icare s'appuiera sur les moyens expérimentaux de l'action *Visa*.

## 4. Domaines d'application

### 4.1. Panorama

Outre le domaine traditionnel de la robotique de manipulation, la robotique est présente dans de nombreuses autres applications impliquant la mise en œuvre de systèmes mécaniques devant fonctionner de façon plus ou moins automatisée et autonome : intervention en milieu hostile, exploration lointaine, robots mobiles, conduite automatisée, drones aériens d'observation... Le projet s'investit à ce niveau applicatif au travers de collaborations nationales et internationales. Un domaine d'application privilégié, en relation avec la vocation maritime de la région PACA, est celui de la robotique sous-marine. ICARE est impliqué également dans le projet européen CYBERCARS, sur la thématique des transports de demain.

Enfin, au niveau international, une collaboration active existe entre l'Institut Technique Supérieur de Lisbonne (Portugal), le Laboratoire de Robotique et de Vision du Centre Technique et Informatique de Campinas (Brésil) et le projet ICARE, sur la problématique des drones aériens d'observation.

### 4.2. Robotique sous-marine

**Mots clés :** *commande d'engins sous-marins, asservissement visuel, vision 3D.*

**Participants :** Patrick Rives, Claude Samson, François-Xavier Espiau, Jean-Jacques Borrelly.

Le domaine de la robotique sous-marine présente un double intérêt pour le projet. D'une part, il permet de valider et de mettre en valeur les travaux réalisés dans les différents thèmes abordés par le projet, dans un

contexte où la robotisation devient incontournable. D'autre part, la proximité du laboratoire de robotique de l'IFREMER à Toulon nous ouvre l'accès à des moyens expérimentaux proches de la réalité opérationnelle.

Les véhicules sous-marins sont souvent sous-actionnés, possèdent de nombreux degrés de liberté fortement couplés et sont soumis à des perturbations généralement non prédictibles (vagues, courant). Leur stabilisation pose de ce fait des problèmes difficiles dont la résolution met à contribution les techniques de commande les plus sophistiquées. Parmi les problèmes de commande étudiés dans le projet, citons à titre d'exemples la stabilisation de sous-marins à proximité de la surface et la navigation en mode suivi de fond à altitude relative constante. La commande référencée capteurs, utilisant des capteurs de vision ou acoustiques, a également été utilisée avec succès pour des tâches de suivi automatique de structures immergées ou de stabilisation d'une plate-forme porteuse libre face à une structure connue, dans le but de faciliter les tâches de manipulation. Ces applications permettent d'envisager l'automatisation partielle de tâches d'intervention actuellement réalisées de façon entièrement téléopérée. La variété des véhicules sous-marins considérés (engins de type torpille, engins d'intervention équipés ou non de bras manipulateurs) et la diversité des opérations d'intervention sous-marine, couplées au besoin de systèmes de programmation adaptés et au souci de sûreté de fonctionnement, font de la robotique sous-marine un domaine privilégié pour mettre en œuvre, tester, et valider l'ensemble des résultats de recherche du projet.

Une thèse sur l'application de techniques de vision active à la modélisation d'objets naturels sous-marins, bénéficiant d'un financement de la part de l'Ifremer, a été soutenue en février 2002.

### 4.3. Conduite automatisée

**Mots clés :** *commande de véhicule automobile, navigation, commande référencée capteur, fusion sensorielle.*

**Participants :** Claude Samson, Patrick Rives, Ezio Malis, Pascal Morin, Jean-Jacques Borrelly, Guillaume Artus, Nicolas Simond.

Le développement et la gestion des transports, tant dans le domaine urbain qu'en zones interurbaines, est certainement un des problèmes cruciaux auxquels se trouve confrontée la majorité des pays industrialisés en cette fin de siècle. Déjà, de nombreux pays (Etats Unis, Japon, Hollande, Allemagne...) ont mis en place des programmes de recherches importants visant à proposer des alternatives aux modes de transport existants. Les objectifs sont de diminuer les nuisances (pollution, bruit, engorgement des centres villes...) mais également d'optimiser l'adéquation des moyens de transports vis à vis des infrastructures et de la sécurité (véhicules électriques en libre service en milieu urbain, conduite automatique sur les autoroutes).

L'action Praxitèle, achevée en 1997, a permis de valider un certain nombre de concepts et de concevoir un véhicule électrique, le CyCab, qui a été fabriqué à une dizaine d'exemplaires répartis dans les différentes Unités de Recherches de l'Inria. L'U.R. de Sophia Antipolis a souhaité mettre en avant le domaine applicatif des *Transports du futur* en créant l'action de valorisation VISA dont le pilotage a été confié à Patrick Rives. Transversale aux projets de recherche, cette action met à disposition des projets les moyens expérimentaux nécessaires à la validation des résultats de recherche. Le projet ICARE, dans le cadre des projets Européens CYBERCARS et CYBERMOVE, a démarré deux thèses portant sur la conduite automatique qui s'appuieront sur les moyens expérimentaux de l'action VISA.

Un premier sujet de recherche concerne l'étude de méthodes de commande d'un système constitué de deux véhicules de type voiture (un véhicule de tête et un véhicule suiveur) en fonction de différentes tâches à réaliser (suivi de route, manœuvres de parking,...) et modes de fonctionnement (commande "coordonnée" et automatisée des deux véhicules, commande manuelle du premier véhicule par un conducteur avec asservissement "en mode esclave" du second véhicule sur le premier, mode "hybride",...). Par la suite, l'étude pourra être généralisée à des trains de plus de deux véhicules, avec extension à des véhicules attelés mécaniquement entre eux (camion avec remorques, par exemple).

Un second sujet concerne la navigation autonome ou semi-autonome (aide à la conduite) du CyCab à partir d'informations fournies par des capteurs visuels ou télémétriques. Il s'agit là de prendre en compte la problématique d'un véhicule évoluant dans un environnement urbain avec ces aspects spécifiques concernant

la localisation, la planification de chemins et leur exécution sous des contraintes dures de sécurité (détection des piétons et des obstacles) et d'environnements structurés mais de grandes dimensions et évolutifs.

## 4.4. Drônes aériens d'observation

**Mots clés :** *modélisation et commande d'engins aériens, drone, dirigeable, asservissement visuel.*

**Participants :** Patrick Rives, Samuel Bueno [ITI de Campinas (Brésil)], José Raul Azinheira [IST de Lisbonne (Portugal)].

Cette coopération avec le CenPRA de Campinas et l'IST de Lisbonne s'inscrit dans le cadre général de la conception et du contrôle de véhicules aériens (*drônes*) susceptibles de réaliser des missions de surveillance et d'intervention dans un mode complètement autonome ou mixte (en partie téléopéré et en partie autonome). Les champs applicatifs de tels véhicules sont nombreux tant dans le secteur civil (surveillance de forêts, de régions rurales ou urbaines, de réserves écologiques, de routes, de zones côtières...) que dans le domaine militaire (observation, appui tactique...) et de nombreux pays y consacrent des budgets importants (Suède, Brésil, Portugal, Israël, Etats Unis...).

Le projet AURORA (*Autonomous Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship*) mené par le LRV/IA/CenPRA a pour objectif de développer un dirigeable d'observation dont le principal domaine d'application envisagé concerne l'étude et la surveillance de l'environnement. Ce dirigeable sera doté de grandes capacités d'autonomie dans toutes les phases classiques de vol (décollage, vol stationnaire, vol de croisière et atterrissage).

Parallèlement, l'IST et l'OGMA au Portugal et le RMCS (Cranfield University) en Grande Bretagne, dans le cadre d'un programme de recherche, ont développé un drone de type avion pour des applications civiles du type prévention d'incendie et surveillance des zones côtières.

Les problématiques en termes de commande, navigation et types de missions se sont révélées très proches de celles que nous poursuivons dans le domaine de la navigation et de la commande des véhicules sous-marins. La coopération, démarrée en 1999 sur ce thème dans le cadre d'accords de collaboration entre l'Inria et le CNPq pour le Brésil et l'ICCTI pour le Portugal, se poursuit en motivant plusieurs missions de visites et d'échanges de chercheurs. Au sein de cette collaboration, nous étudions plus particulièrement l'apport des techniques d'asservissement visuel pour automatiser certaines phases de vol telles que le vol stationnaire ou l'atterrissage qui nécessitent un contrôle précis de l'attitude et de la vitesse par rapport au sol. Les principales difficultés concernent la modélisation et le contrôle des drones aériens qui se révèlent être des systèmes dynamiques très non linéaires pouvant présenter des modèles de vol radicalement différents en fonction des allures (point fixe ou portance). Les approches que nous développons dans le projet, qui permettent d'utiliser des techniques de contrôle robuste pour stabiliser l'attitude d'un engin par rapport à son environnement, semblent très adaptées à ce type d'application. Principalement testées jusqu'à présent en simulation, elles doivent à présent être validées sur les engins développés par nos partenaires.

## 5. Logiciels

### 5.1. VPI

**Mots clés :** *prototypage, traitement d'images, reconstruction 3D.*

**Participants :** Jean-Jacques Borrelly [correspondant Ingénieur DREAM], François-Xavier Espiau [boursier IFREMER].

VPI VISION PROGRAMMING INTERFACE est un outil de prototypage d'applications de vision basé sur la librairie QT (licence GPL GNU Public License sous Linux) afin de lui garantir une bonne pérennité en termes de maintenance et de facilité d'intégration de nouvelles méthodes. Développé au sein du projet Icare, il a servi de support de développement au travail de thèse de F.X. Espiau financé par une bourse *Ifremer*. Un contrat d'étude avec *Ifremer* a permis de transférer VPI sur leur centre de Toulon.

## 5.2. Simparc

**Mots clés :** *robotique, temps réel, simulation, traitement d'images, reconstruction 3D.*

**Participant :** Jean-Jacques Borrelly [correspondant].

SIMPARC est un logiciel de simulation hybride permettant de simuler en parallèle l'évolution d'un processus physique et de son contrôleur. Il permet aussi de modéliser et de simuler les services de base du système d'exploitation temps-réel utilisé. Il est disponible sur demande pour Sun/Solaris, Dec-Alpha/OSF, et PC/Linux.

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Stabilisation de robots mobiles et de systèmes non-linéaires

**Participants :** Claude Samson, Pascal Morin, Jean-Jacques Borrelly, Guillaume Artus, Matthieu Fruchard.

**Mots clés :** *système non linéaire, stabilisation asymptotique, stabilisation pratique, commande instationnaire, groupe de Lie, robot mobile, robot manipulateur.*

On s'intéresse à la stabilisation de systèmes non-linéaires commandables, mais dont le linéarisé n'est pas stabilisable. La motivation majeure est la commande des robots mobiles à roues, dans la mesure où les contraintes de non-holonômie associées au roulement sans glissement des roues sur le sol induisent des modèles non-linéaires de ce type. Dans le passé, nous avons abordé ce problème via le développement de la théorie de la commande par retour d'état instationnaire. Nous nous sommes depuis quelques années tournés vers une nouvelle approche de commande avec l'objectif de stabiliser asymptotiquement, non plus un point d'équilibre du système, mais un « petit » voisinage d'un point pouvant ne pas être lui-même stabilisable. De prime abord cet objectif peut paraître moins ambitieux que le précédent, et sa réalisation peut même sembler découler de la réalisation du premier. Nous pensons qu'il est en fait complémentaire, parce qu'il permet de mieux rendre compte de ce qu'il est possible d'obtenir au niveau de la réjection de perturbations additives agissant sur le système. Les solutions de commande qui en résultent sont de ce fait susceptibles d'avoir une portée applicative plus étendue.

#### 6.1.1. Nouvelles classes de fonctions transverses

Dans le prolongement du travail initié dans [5][24], nous avons proposé de nouvelles expressions pour le calcul de fonctions transverses. Rappelons que dans le contexte de la commande des systèmes non-linéaires sans dérive sur une variété  $X$ , les fonctions transverses sont des fonctions  $f$  bornées, à valeurs dans  $X$ , dont les différentielles ont la propriété de générer les directions complémentaires, dans l'espace tangent, à celles engendrées par un système de champs de vecteurs sur  $X$  commandable (i.e. qui satisfait la classique « Condition de Rang de l'Algèbre de Lie », ou LARC en Anglais), et ceci en tout point image de  $f$ . Cette notion est particulièrement utile dans le cadre de la stabilisation pratique de systèmes commandables sans dérive, comme nous l'avons montré dans [24]. Dans cet article, une expression explicite pour le calcul de fonctions transverses est donnée. Récemment, nous avons obtenu deux autres expressions possibles pour le calcul de telles fonctions. L'une d'elles est assez similaire à celle donnée dans [24], mais relativement plus simple. La deuxième expression fournit des fonctions étendues dans le sens où elles dépendent de variables supplémentaires qui constituent autant de degrés de liberté additionnels pour la synthèse de lois de commande. Ainsi, l'intérêt de ces fonctions est de pouvoir donner lieu à des commandes *hiérarchisées*, i.e. les variables supplémentaires pouvant être utilisées pour réaliser, en plus de la stabilisation pratique, des objectifs secondaires. Dans le cas particulier des modèles cinématiques de robots mobiles, ces fonctions ont été utilisées afin d'obtenir la stabilisation asymptotique de certaines trajectoires (voir paragraphe ci-dessous).

#### 6.1.2. Stabilisation asymptotique de trajectoires de référence

Nous avons étudié la possibilité de stabiliser asymptotiquement, à partir de l'approche par fonctions transverses, des trajectoires de référence réalisables, pour des robots de type unicycle ainsi que pour des systèmes sous forme chaînée. Plus précisément, en utilisant une classe de fonctions transverses étendues, nous avons

montré qu'il était possible d'obtenir la stabilisation asymptotique de points fixes, ainsi que celle de trajectoires de référence correspondant à un déplacement du robot avec une vitesse longitudinale qui ne tend pas vers zéro. Ainsi ces lois de commande garantissent la stabilisation pratique de toute trajectoire de l'espace d'état (i.e. trajectoires qui peuvent ne pas être réalisables par le système), et permettent de surcroît, pour les trajectoires réalisables particulières mentionnées précédemment, d'obtenir la convergence de l'erreur vers zéro.

Ces stratégies pourront être utilisées dans le cadre de nos travaux sur le suivi automatique de véhicule, afin d'améliorer la qualité du suivi, ainsi que dans le cadre de la commande de manipulateurs mobiles, afin de réduire les risques de positionnement de la base mobile correspondant à des singularités géométriques du manipulateur.

Des résultats préliminaires sur ce travail ont été publiés dans [23], et une version complète est en cours de rédaction.

### **6.1.3. Poursuite référencée vision d'une cible manœuvrante par un robot mobile**

Il s'agit d'évaluer l'approche de commande basée sur les fonctions transverses dans le cas du suivi d'une cible par un robot mobile non-holonôme de type unicycle, la cible étant observée par une caméra portée par le robot. Le travail a consisté dans un premier temps à faire une étude de la commande en simulation, puis à effectuer des expérimentations sur la plate-forme mobile ANIS du projet. La position relative du robot par rapport à la cible est obtenue à partir des images de cette dernière, prises par une caméra embarquée sur le robot. L'objectif de commande est de réguler cette position relative autour d'une valeur de référence. Le mouvement de la cible, dans le plan de déplacement du robot, n'est pas contraint.

Les premières expérimentations, effectuées pour des vitesses faibles de la cible, ont été conformes à l'objectif de régulation imposé et ont permis de mieux comprendre le rôle des différents paramètres de la commande. Pour garantir le suivi pour des vitesses plus élevées de la cible, on a dû prendre en compte le déplacement de celle-ci dans la loi de commande. La cible utilisée pour les expérimentations n'étant pas équipée de capteurs, une estimée de sa vitesse est calculée à partir de la fusion des mesures de position relative issues de la vision et des mesures de vitesse du robot issues de l'odométrie du robot. Les mesures issues de la vision étant assez bruitées, l'estimateur d'état a été conçu pour filtrer efficacement les bruits de mesure. Les gains de cet estimateur ont été déterminés en utilisant une approche de type Kalman. Les simulations effectuées ont permis de valider cette approche et l'implémentation de l'ensemble filtre-commande sur notre système expérimental a permis d'atteindre des vitesses de déplacement plus élevées que précédemment sans dégradation visible du comportement du robot.

L'étape suivante consistera à tester d'autres estimateurs de vitesse, dont un filtre de Kalman étendu, afin d'améliorer encore le comportement du robot et ses performances. Nous nous intéresserons par la suite à l'extension de cette approche au cas d'un véhicule de type voiture tel que le CyCab.

### **6.1.4. Commande d'un bras manipulateur mobile appliquée au suivi de cible**

Dans le cadre de notre participation au programme national ROBEA (voir Section 8.1), un nouvel axe de recherche a été initié, portant sur la commande d'une structure mixte bras manipulateur holonôme monté sur une base mobile non-holonôme.

Avant d'aborder le problème de commande d'un robot mobile redondant non-holonôme, il importe de traiter le cas d'un système redondant holonôme. Les principes de base permettant de traiter ce cas avec le formalisme des *fonctions de tâche* sont exposés dans [9]. Nous les avons repris pour les adapter à la tâche de suivi de cible référencée vision [34] prévue pour nos expérimentations ultérieures sur ANIS, en supposant provisoirement que la base mobile qui porte le bras manipulateur est omnidirectionnelle, c'est-à-dire munie de trois degrés de liberté lui permettant de réaliser des déplacements instantanés quelconques en orientation et en translation dans le plan. La première étape de l'étude a consisté à modéliser la géométrie et la cinématique du système robotique. L'étape suivante a concerné la définition des objectifs de commande et leur traduction sous la forme d'une fonction de tâche vectorielle dont il s'agit de réguler les composantes à zéro. Le problème de redondance intervient au niveau de la gestion de la contrainte d'*admissibilité* de la fonction de tâche vis-à-vis de la commande. La méthode de construction de fonctions de tâche que nous avons retenue, pour sa simplicité

conceptuelle et sa souplesse d'emploi, est à rapprocher d'une *méthode de potentiel*. Elle consiste à formuler l'objectif de commande comme la minimisation à tout instant d'une somme pondérée de *fonctions de coût scalaires*, chacune d'entre elles correspondant à un objectif partiel de positionnement du robot par rapport à la cible observée ou à l'évitement des configurations singulières cinématiques du robot. L'addition d'une dernière fonction de coût, globalement convexe, permet alors de régulariser le problème de minimisation et d'assurer l'admissibilité de la fonction de tâche définie comme le gradient du coût global. La loi de commande cinématique est ensuite déterminée de sorte à stabiliser exponentiellement à zéro les composantes de la fonction de tâche. Les détails d'implémentation de cette loi de commande ont été étudiés en s'appuyant sur des résultats de simulation.

Ce travail se poursuivra par l'étude du cas d'un système robotique redondant non-holonôme, par exemple un bras manipulateur monté sur une base mobile de type unicycle, en utilisant l'approche de retour d'état par fonctions transverses développée dans [5]. La synthèse de lois de commande pour un tel système sera validée par des simulations et des expérimentations sur notre bras mobile ANIS.

## 6.2. Perception pour la modélisation

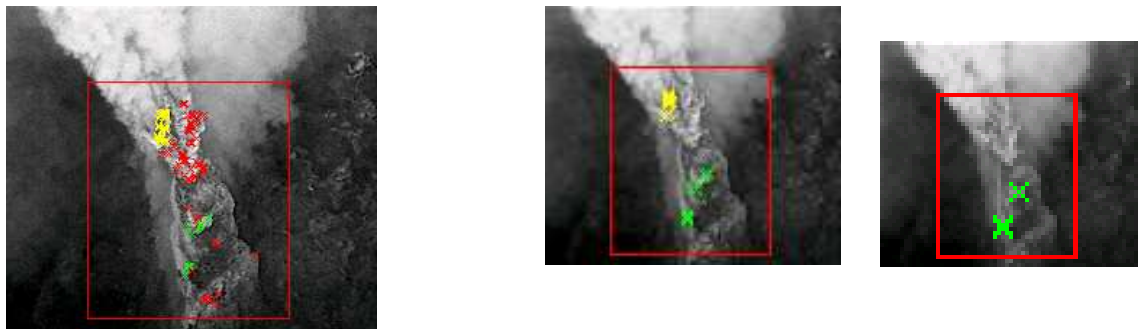
**Participants :** Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, François-Xavier Espiau, Ezio Malis.

**Mots clés :** *vision dynamique, vision active, reconstruction d'objets non structurés, algorithme robuste de vision.*

Nous avons poursuivi cette année notre travail sur la modélisation des objets naturels par vision dynamique dans le cadre d'une thèse financée par IFREMER soutenue en Février 2002. Les méthodologies développées dépassent largement le cadre de l'application sous-marine et devraient être appliquées notamment à la navigation visuelle de véhicules d'extérieurs.

### 6.2.1. Reconstruction 3D d'objets naturels sous-marins par vision dynamique

Dans le cas de l'application proposée par IFREMER, nous ne disposions que d'une seule caméra non calibrée dont le mouvement, ainsi que la scène observée, étaient inconnus *a priori*. Le principal élément d'information dont nous disposons est que les objets à observer sont rigides et relativement verticaux (cheminées sous marines, par exemple). Une autre difficulté concernait le filtrage d'objets parasites en mouvement dont les effets perturbateurs tendaient à mettre en échec les algorithmes classiques de la vision par ordinateur.



(a) Niveau 1

(b) Niveau 2

Figure 1. Points d'intérêt classés grâce à l'algorithme pyramidal

Après des études comparatives entre différents détecteurs de points d'intérêt et de coins, notre choix s'est porté sur le détecteur de Harris que nous avons implémenté de manière optimale. Notre approche est basée sur une représentation multi-échelles des images observées. Le détecteur permet, via une pyramide d'images, d'extraire de façon robuste aux bruits des points d'intérêt bien localisés. Nous avons développé



une classification, rapide en temps de calcul et suffisante pour nos besoins, des points détectés en utilisant les propriétés de la pyramide multi-échelle. À l'issue de cette étape, nous obtenons des ensembles de points classés en fonction de leur intérêt ou pertinence au sens du signal, mais aussi en fonction de leur classe d'appartenance aux différents niveaux de la pyramide. Ce processus permet de trouver les meilleurs points candidats pour effectuer l'appariement entre plusieurs images, comme le montre la Figure 1.

Les techniques d'appariement entre images sont nombreuses, et il s'agit dans l'optique temps-réel, de trouver le meilleur compromis entre qualité et rapidité d'exécution. Pour ce faire nous procédons à la mise en correspondance des points détectés aux sommets des pyramides, cette opération pouvant être réalisée avec un bon degré de fiabilité. Il est alors possible de propager ces points dans les niveaux inférieurs et utiliser des contraintes de localité pour terminer d'apparier les points. Grâce à cette méthode de classification, nous sommes certains de ne pas prendre en compte de points correspondant à du bruit (détectés uniquement au niveau inférieur de la pyramide). Cette approche a été testée avec succès sur les images naturelles dont nous disposons [18]. Dans certaines séquences, nous avons également utilisé cette approche pour faire du suivi de points d'intérêt, là encore avec succès où d'autres méthodes classiques étaient prises en défaut (cf Figures 2)

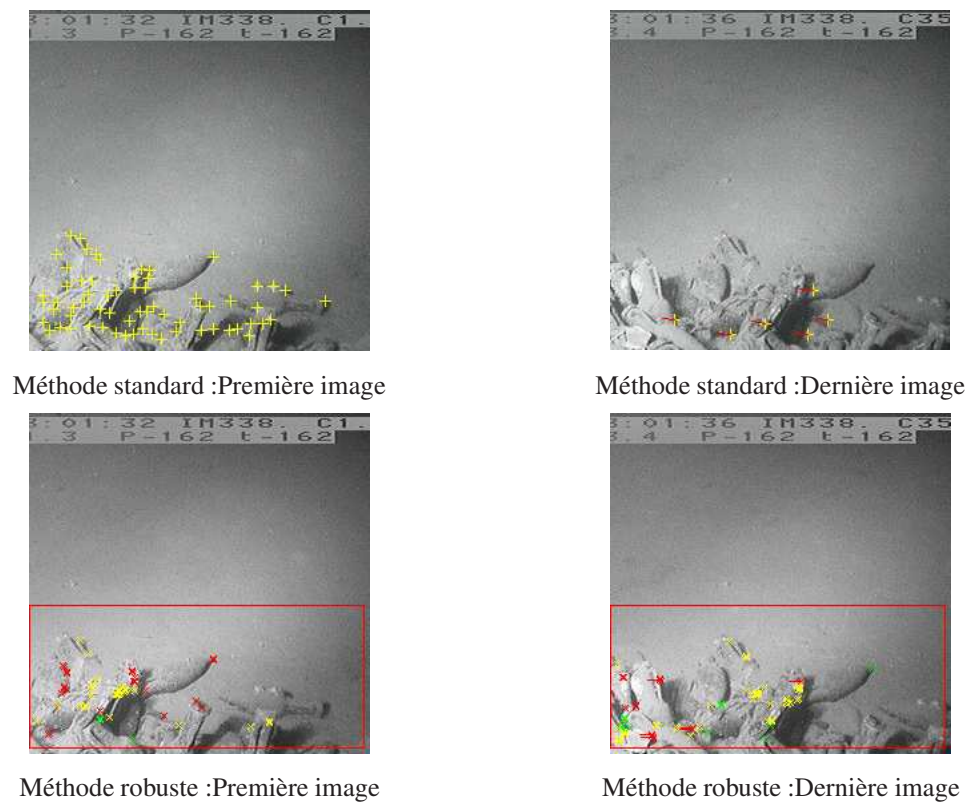


Figure 2. Comparaison du suivi de points

Enfin, pour la reconstruction projective, nous avons utilisé deux méthodes classiques, mais robustes, basées l'une sur l'estimation de la matrice fondamentale, l'autre sur l'ajustement de faisceaux. Les résultats obtenus sont de bonne facture, sans pour autant être toujours exploitables, en raison de problèmes connus de mauvais conditionnement difficiles à résoudre en pratique.

### 6.3. Navigation de robots mobiles

**Participants :** Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Alessandro Corrêa-Victorino, Nicolas Simond.

**Mots clés :** *planification et commande référencée capteur, pilotage et navigation sûre d'un robot mobile, localisation et cartographie, coopération multisensorielle.*

Nous avons poursuivi cette année nos travaux sur la navigation sûre d'un robot mobile dans un environnement inconnu mais structuré. Dans de nombreuses situations, un robot mobile est amené à évoluer dans un environnement dont il ne possède pas la carte a priori. Il faut alors être capable de l'explorer afin d'en construire de manière incrémentale une représentation et, de façon simultanée, maintenir une estimée de la position du robot à l'intérieur de celle-ci. Dans le cas de scènes d'intérieur relativement structurées, l'utilisation de données télémétriques conjointement avec les données odométriques du robot permet la localisation et la cartographie simultanées de la scène. Dans le cadre d'un travail de thèse (soutenue en Septembre 2002), une nouvelle approche a été développée visant à reformuler, dans un cadre méthodologique unique issu de la commande référencée capteur, la problématique de l'exploration et de la cartographie d'un environnement inconnu par un robot mobile complètement autonome. Nous avons montré en particulier qu'il était possible, sans aucune connaissance a priori sur l'environnement et sans calcul de trajectoire, de l'explorer de façon complète uniquement en s'appuyant sur une approche de navigation/commande référencée capteur. Nous avons également montré que cette reformulation dans un cadre unique permet de stabiliser les problèmes de localisation/cartographie simultanées, par nature mal conditionnés, en héritant des propriétés de robustesse des schémas de commande référencée capteurs. Dans le cadre du projet Européen CYBERCARS, un travail de thèse a débuté sur la localisation précise de véhicule en environnement urbain.

### **6.3.1. Localisation, exploration et cartographie d'un environnement d'intérieur inconnu**

Nous considérons un robot mobile évoluant dans une scène planaire et statique composée d'objets inconnus. Nous supposons que cette scène est bornée par un ensemble d'objets appelés frontières. Afin de réaliser notre objectif d'exploration complète avec localisation/cartographie simultanée, les trajectoires suivies par le robot doivent :

- permettre de se déplacer localement de façon sûre dans l'espace libre,
- représenter la topologie de la scène globale en termes de lieux et d'accessibilité (prenant éventuellement en compte la taille du robot),
- être uniques pour un environnement statique donné.

Le diagramme de Voronoï (DV) satisfait de telles propriétés. À partir de ce diagramme, il est possible de définir des tâches de navigation élémentaires permettant au robot de se déplacer dans son environnement : i) parcourir une arête, ii) se positionner sur un nœud. Ces deux tâches élémentaires ont été implémentées en appliquant le formalisme de la commande référencée capteur au télémètre laser à balayage. Il convient de noter que ces tâches sont exprimées en termes de régulation d'une fonction de sortie exprimée à partir des données télémétriques et ne nécessitent aucun calcul explicite du diagramme de Voronoï. La construction de celui-ci est réalisée de manière incrémentale en mémorisant la trajectoire parcourue par le robot et les nœuds du graphe correspondant aux points de bifurcation.

Le travail de l'an passé avait principalement porté sur le traitement des mesures télémétriques, l'extraction du signal utilisé dans la boucle d'asservissement et sur les aspects localisation et cartographie simultanées. Nous avons complété cette année notre approche en proposant une nouvelle méthode d'estimation du mouvement du robot durant son déplacement sur une branche du diagramme de Voronoï, ne s'appuyant plus sur l'odométrie mesurée à partir des codeurs des roues mais sur les observations télémétriques [26]. Cette approche a permis de mettre en évidence des problèmes d'observabilité du mouvement pouvant survenir dans certaines configurations de l'environnement. Une étude théorique s'appuyant sur la condition de rang dans les systèmes non linéaires a permis d'établir une condition nécessaire et suffisante sur l'observabilité du mouvement à partir d'une carte partielle de l'environnement supposé polygonal. Une méthode a été proposée pour compléter, lorsque c'est nécessaire, l'observabilité en utilisant les mesures odométriques projetées dans la direction non observable. Une fois l'état rendu observable, l'estimée du déplacement est calculée en utilisant une méthode à erreur bornée permettant de prendre en compte un modèle de distribution des bruits de mesures plus adapté au modèle physique de notre capteur laser [27].

Le deuxième axe de travail a porté sur la définition d'un modèle mixte, géométrique et topologique, adapté à l'exploration et la navigation dans des environnements d'intérieur de grande dimension. Ce modèle est structuré en *lieux* définis comme les sous-régions de l'environnement où notre méthode de localisation/cartographie permet de construire et maintenir un modèle géométrique consistant représenté dans un repère local associé au lieu. A ce modèle géométrique est associé le diagramme de Voronoï, construit lors de l'exploration, qui constitue le support du déplacement du robot dans le lieu. Lors de l'exploration, un nouveau lieu est créé lorsqu'il n'est plus possible de maintenir la consistance entre la carte locale acquise par le robot et la carte globale du lieu en cours d'exploration. Les cartes n'étant mises à jour que sur les points de bifurcation, ce cas se produit lors de traversée de grandes distances ne comportant pas de points de bifurcation (couloir, par exemple). Il est à noter que, dans ce cas, la notion même de localisation précise du robot durant le passage d'un lieu à un autre n'a plus beaucoup de sens. Par contre, il est important de conserver une représentation de la connexité des différents lieux constituant l'environnement afin de pouvoir y déterminer, par la suite, des chemins d'accès.

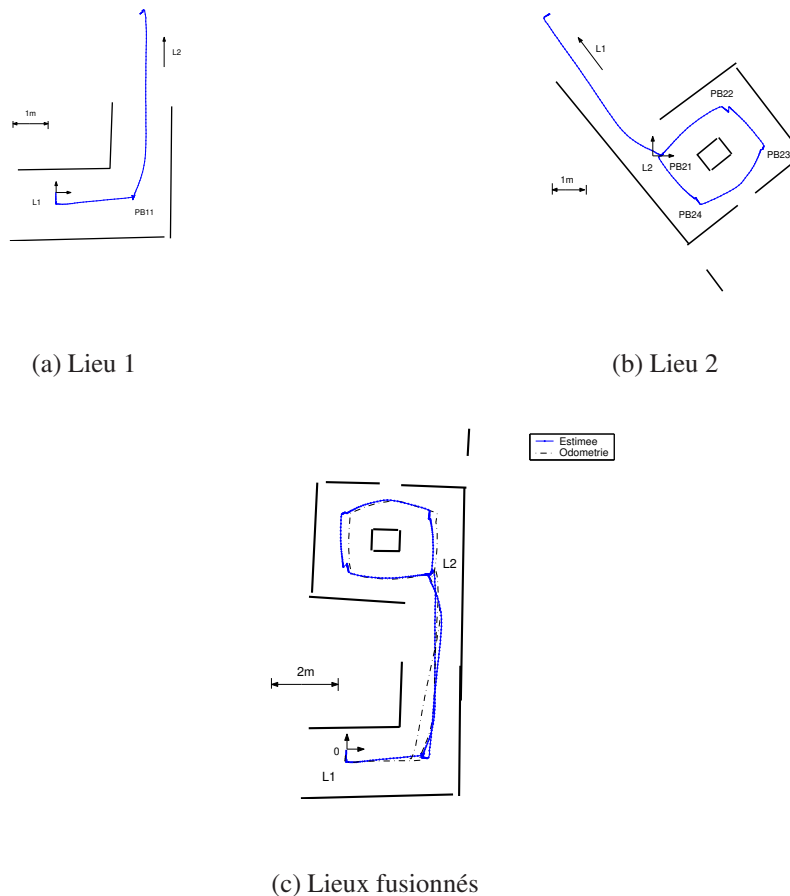


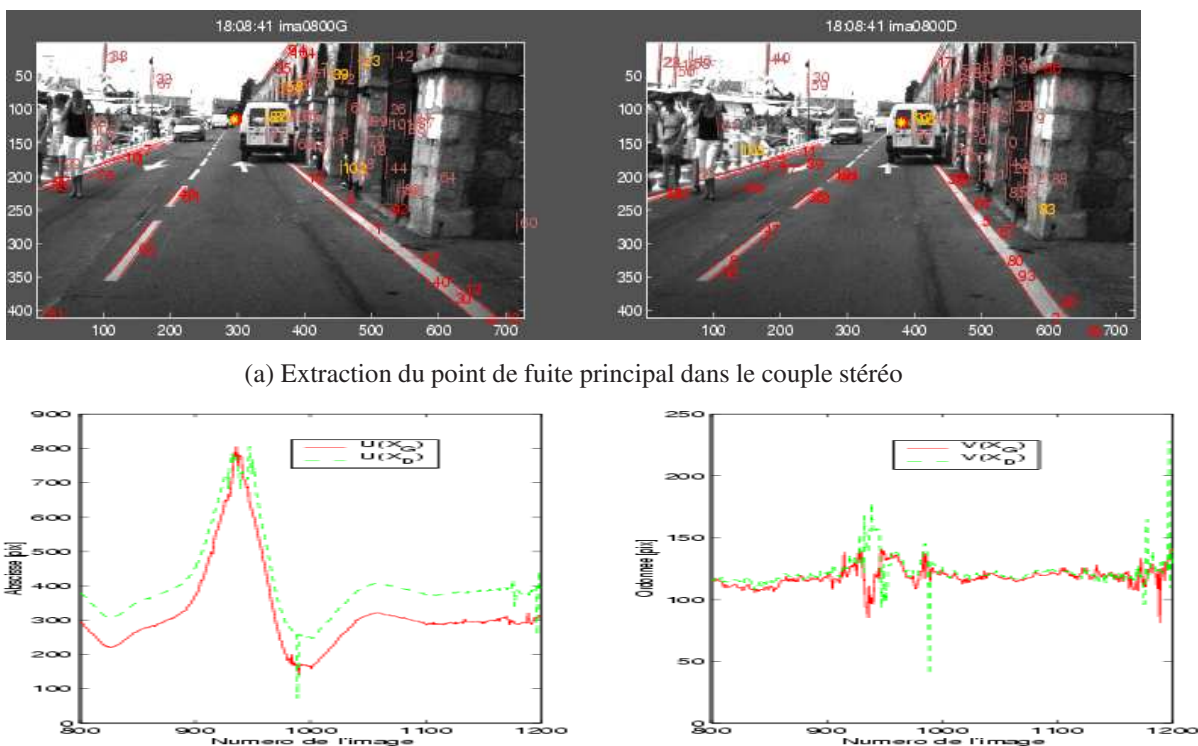
Figure 3. Structuration en lieux

Finalement, l'ensemble de ces éléments a été intégré dans un processus complet d'exploration, localisation et cartographie d'un environnement inconnu. La Figure 3 montre un déplacement du robot ANIS dans notre salle de robotique. Dans cette expérimentation, deux lieux sont créés puis fusionnés au cours de l'exploration. Les cartes géométriques de chacun des lieux sont exprimées dans des repères locaux (figures 3 a et b).

La Figure 3 c montre le recalage du lieu 2 dans le repère du lieu 1. Parallèlement à cette représentation géométrique, le modèle de navigation topologique représentant la connexité entre lieux est mis à jour.

### 6.3.2. Localisation précise de véhicule en environnement urbain

Les systèmes GPS qui réalisent une aide à la navigation des véhicules actuels sont incapables de fournir à tout moment la localisation précise (de l'ordre de la dizaine de centimètres) d'un véhicule. Ceci est essentiellement dû à la mauvaise qualité de réception des signaux émis par la constellation de satellites dont la bonne visibilité ne peut être assurée du fait du paysage urbain. Notre approche est basée sur le recalage entre un modèle construit à partir d'une séquence stéréo non calibrée acquise à bord du véhicule et une carte numérique de l'environnement urbain considéré dont on dispose *a priori*. Pour cela, nous nous appuyons sur des hypothèses réalistes sur la géométrie de l'environnement urbain, à savoir, l'assimilation de la chaussée à une surface localement plane contenant de droites parallèles et la présence de verticales dans la scène. Les premiers résultats obtenus cette année ont porté sur l'extraction et le suivi dans des séquences d'images urbaines des points de fuites correspondant aux droites parallèles présentes dans l'environnement. Ces points de fuites sont utilisés pour calculer l'homographie du plan à l'infini et, par la suite, celles des principaux plans de la scène.



(a) Extraction du point de fuite principal dans le couple stéréo

(b) Suivi du point de fuite principal dans la séquence

Figure 4. Estimation et suivi de points de fuites

Plusieurs séquences vidéo ont été enregistrées sur le port et dans les ruelles d'Antibes à partir d'un véhicule instrumenté par l'INRIA. Les résultats obtenus à partir de ces séquences sont encourageants du fait que l'algorithme parvient à fournir une estimée du point de fuite même pendant un virage et en présence d'éléments mobiles (véhicules, piétons) dans la scène. La Figure 4 illustre l'extraction du point de fuite principal dans un couple stéréo et son suivi sur une séquence de 300 images acquise par les caméras embarquées.

Nous cherchons désormais à identifier les différents plans qui structurent chaque scène de la séquence. Nous nous appliquons à déterminer, parmi les segments qui convergent vers le point de fuite principal (intersection des lignes de fuite passant par les bords de la route), ceux qui appartiennent au plan de la route.

## 6.4. Commande référencée vision sans calibration en environnement inconnu

**Participants :** Ezio Malis, Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Selim Benhimane.

**Mots clés :** *asservissement visuel, vision dynamique, vision active, algorithme robuste de vision.*

L'application des techniques de commande référencée capteurs (et en particulier des techniques d'asservissement visuel) à des systèmes mécaniques complexes requiert généralement une grande précision du contrôle des déplacements, une mise en œuvre aisée, une bonne portabilité sur différentes architectures mécaniques et informatiques, et surtout une grande fiabilité de fonctionnement. Un certain nombre de problèmes sont encore un frein au développement de ces techniques et de leur application :

- afin d'obtenir une meilleure précision, il est nécessaire d'utiliser plusieurs capteurs. Dans certaines applications les caméras ne sont pas suffisantes et d'autres capteurs (télémètre laser, effort, ultrasons...) peuvent fournir des informations complémentaires et/ou redondantes. Il s'agit donc de résoudre le problème de la commande d'un robot en utilisant les données provenant de plusieurs capteurs.
- afin de faciliter la mise en œuvre, il est souhaitable d'éliminer ou de simplifier toutes les procédures de calibration du système, souvent lourdes et coûteuses (surtout lors de l'utilisation de plusieurs capteurs). Dans le cas des capteurs visuels avec objectif à focale variable, il est intéressant d'améliorer la qualité des résultats en utilisant la possibilité d'adapter la focale en cours d'exécution de la tâche. Cette variation de focale doit être prise en compte au niveau de l'asservissement visuel et se pose alors le problème de la robustesse aux incertitudes sur les paramètres intrinsèques des caméras.
- afin de favoriser la portabilité des méthodes de commande, il est souhaitable de concevoir des schémas de commande exploitables à partir de connaissances minimales sur l'environnement. Il s'agit de procéder à la modélisation de ce dernier en privilégiant la reconstruction en ligne des modèles des objets constitutifs de l'environnement, par opposition à l'utilisation de modèles entièrement prédéfinis.
- afin d'obtenir une grande fiabilité, après s'être affranchi de la phase de calibration, les lois de commande doivent, autant que possible, présenter une grande robustesse aux incertitudes sur les paramètres du système. Elles doivent également posséder un large domaine de convergence afin d'autoriser des positions initiales relativement éloignées de la position finale désirée.

### 6.4.1. Une approche unifiée d'asservissement visuel

Un des principaux problèmes en asservissement visuel concerne le besoin d'une calibration précise des capteurs utilisés. Les méthodes de calibration sont souvent lourdes et difficiles à mettre en œuvre, d'où l'intérêt de concevoir un système d'asservissement visuel non tributaire d'une calibration très précise. Pour cette raison nous avons développé une nouvelle méthode d'asservissement visuel [20]. Cette méthode permet de définir une erreur indépendante des paramètres intrinsèques de la caméra. Cependant une approximation grossière de ces paramètres est encore utilisée dans la forme analytique de la matrice d'interaction. Cette connaissance pourrait être levée en utilisant une estimation numérique de la matrice d'interaction. Une autre voie de recherche que nous poursuivons serait la détermination d'une forme analytique non dépendante de la connaissance des paramètres intrinsèques.

La méthode que nous avons développée, unifie les approches classiques proposées dans la littérature : celle basée sur la connaissance du modèle 3D de l'environnement (« model-based visual servoing » en anglais) et celle basée sur un apprentissage préalable de l'image de référence (« model-free visual servoing » en anglais). De plus, avec cette nouvelle méthode il est possible de pallier à un certain nombre de limitations

de l'asservissement visuel classique. Par exemple, il est possible de positionner un robot avec une caméra dotée d'un zoom en utilisant comme référence une image apprise avec une caméra différente. Du fait que l'erreur ne dépend pas des paramètres intrinsèques de la caméra avec laquelle l'image a été prise, le zoom de la caméra peut alors être utilisé afin de garder un objet dans l'image (zoom arrière) ou afin d'augmenter sa taille dans l'image (zoom avant). Dans ce cas, il est possible de séparer l'asservissement visuel de la caméra, de la loi de commande utilisée pour contrôler le zoom. Cette approche permet d'augmenter considérablement les domaines d'application de l'asservissement visuel. Son développement se poursuit dans le cadre d'une collaboration avec le CESBIO et le LAAS de Toulouse dans le projet AEROB de ROBEA (programme interdisciplinaire du CNRS). La méthode d'asservissement proposée a été validée avec succès sur le système robotisé ARGES et sur le manipulateur mobile ANIS de l'équipe ICARE.

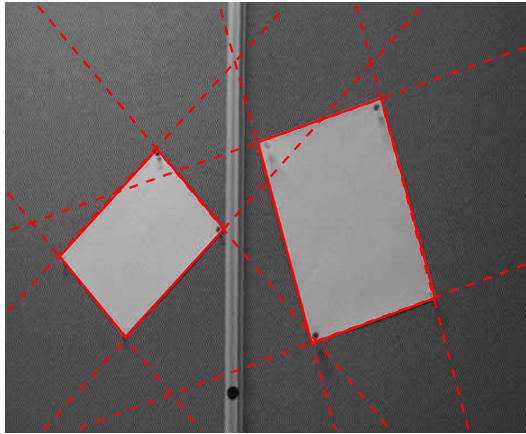
#### 6.4.2. Robustesse de l'asservissement et poursuite de trajectoire dans l'espace invariant

L'asservissement visuel invariant aux paramètres intrinsèques de la caméra est particulièrement intéressant car il est possible de définir des trajectoires dans l'espace invariant sans aucune connaissance des paramètres intrinsèques. Par exemple, il est possible de définir une trajectoire dans l'espace invariant telle que la trajectoire de la caméra dans l'espace cartésien est une ligne droite [22]. La loi de commande qui permet la poursuite de trajectoire est définie directement dans l'espace invariant. Elle doit, autant que possible, présenter une grande robustesse aux incertitudes sur les paramètres du système et garantir un grand domaine de convergence. Dans le cas de notre nouvelle approche d'asservissement visuel par rapport aux incertitudes sur la calibration, nous avons montré que le domaine de robustesse est suffisamment grand pour permettre l'utilisation d'une approximation grossière des paramètres de calibration tout en conservant la convergence et la stabilité de l'asservissement [22][21].

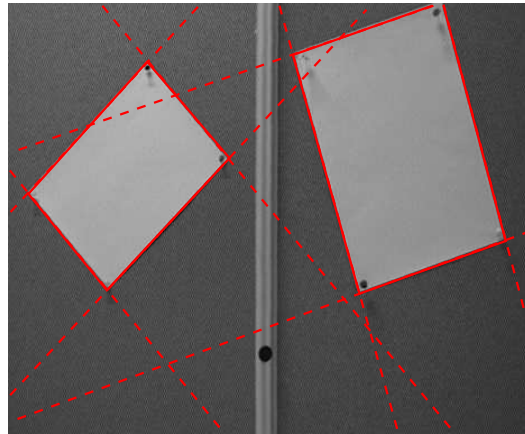
#### 6.4.3. Utilisation des droites comme amers visuels

Le schéma d'asservissement visuel proposé dans [20] est basé sur l'utilisation de points caractéristiques comme amers visuels. Toutefois, dans un environnement artificiel il est fréquent de rencontrer des structures linéiques (routes, constructions par exemple). Cette constatation nous a amené à étudier l'extension de notre méthode d'asservissement visuel au cas des lignes droites. Bien que l'extension ne soit pas immédiate, les résultats obtenus [19] montrent qu'il est possible de positionner une caméra par rapport à un ensemble de lignes droites non-coplanaires. Grâce à la généralité de l'approche utilisée (basée sur la construction d'une fonction de tâche [9]) il est aussi possible de mélanger des points et des droites au sein d'une même tâche d'asservissement visuel.

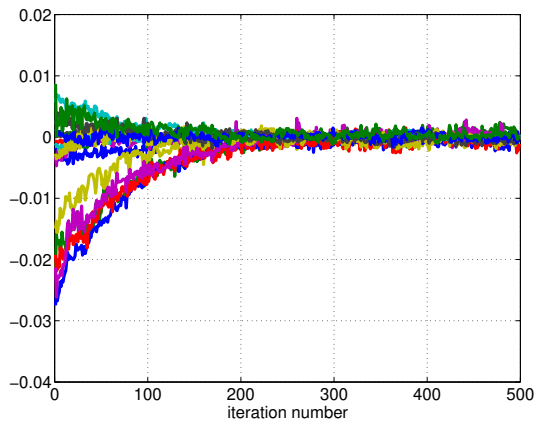
Nous présentons ici les résultats obtenus avec le robot ARGES pour le problème de positionnement par asservissement visuel d'une caméra sur une tourelle pan-tilt montée sur un rail. Nous disposons donc de trois degrés de liberté. La caméra observe huit lignes droites situées sur deux plans différents. L'image de référence (Figure 5(a)), qui correspond à une position finale désirée de la caméra, est enregistrée avec une focale de  $f^* = 1364$  pixels. La caméra est ensuite placée à une position différente, dite initiale. Le déplacement réalisé pour cela est de  $t_x = 140$  mm en translation sur le rail,  $r_x = 3$  et  $r_y = 3$  degrés en rotation pour la tourelle. La caméra effectue alors un "zoom" qui modifie la focale et l'amène à la valeur de  $f = 1671$  pixels. L'image correspondante est montrée sur la Figure 5(b). Les paramètres de la caméra étant inconnus nous utilisons, pour calculer la loi de commande, une approximation de la focale de  $\hat{f} = 1500$  pixels et nous supposons que le point principal est au centre de l'image. Pendant l'asservissement les droites sont suivies en utilisant l'algorithme proposé dans [36]. La loi de commande est illustrée par les Figures 6(a) and (b). Bien que les paramètres de la caméra soient grossièrement approximés la loi de commande est stable. L'erreur dans l'espace invariant (Figure 5(c)) converge vers zéro (aux bruits de mesure près) et la caméra revient à la position de référence. On observe en effet sur la Figure 6(c) et (d) que les erreurs en translation et rotation convergent vers zéro avec une précision de l'ordre du millimètre et du dixième de degré. Bien que les droites dans l'image soient différentes des droites de référence (i.e. l'erreur dans l'image ne converge pas vers zéro, comme illustré par la Figure 5(d)), les droites correspondantes calculées dans l'espace invariant coïncident (aux bruits de mesure près).



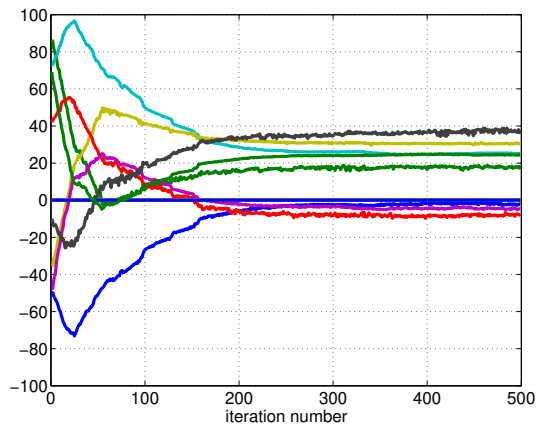
(a) Image de référence



(b) Image initiale

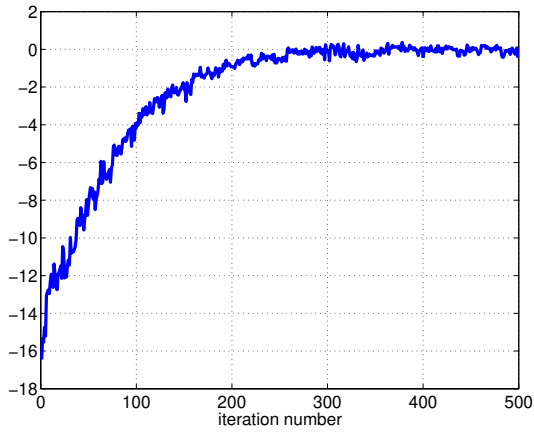


(c) Erreur dans l'espace invariant

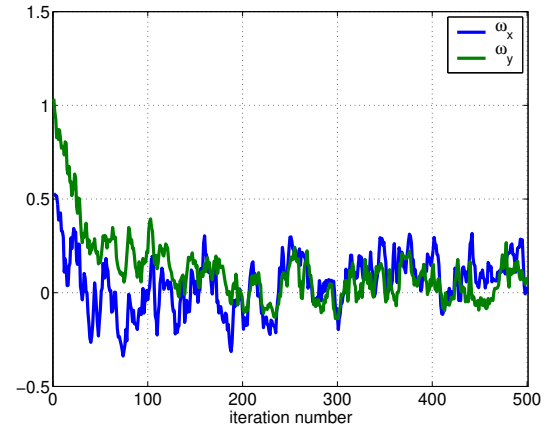


(d) Erreur dans l'image

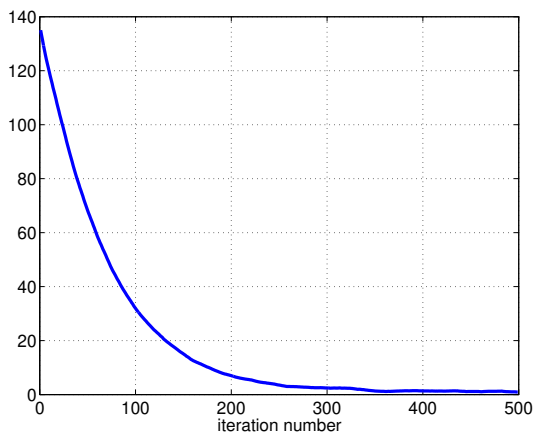
Figure 5. Asservissement visuel par rapport aux droites.



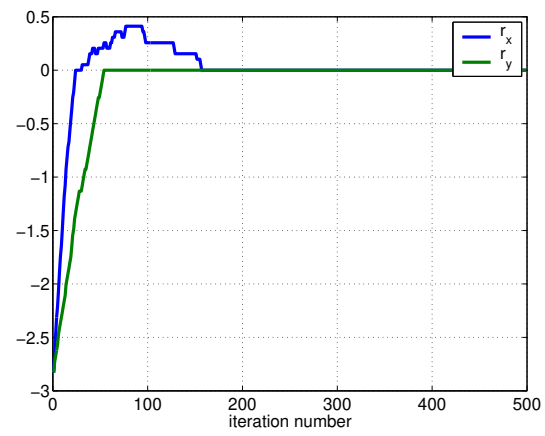
(a) Vitesse de translation



(b) Vitesse de rotation



(c) Erreur en translation



(d) Erreur en rotation

*Figure 6. Convergence de la loi de commande.*



#### 6.4.4. Cas particulier d'une cible plane

Une des principales limitations de la méthode proposée dans [20] réside dans l'impossibilité de positionner la caméra par rapport à des amers visuels (points ou droites) se situant dans un même plan. Cette limitation a été levée au cours du stage de DEA de M. Selim Benhimane. Au cours de ce stage, une étude théorique a été menée pour mieux comprendre les limites de l'approche et pour éventuellement pallier ses défauts. L'étude a abouti à des résultats qui ont permis de mettre en place un algorithme de commande pouvant être utilisé avec des amers coplanaires ou non [30]. Cette commande a été validée expérimentalement en grandeur réelle sur les robots ANIS et ARGES du projet.

### 6.5. Contrôle d'un dirigeable par asservissement visuel

**Participants :** Patrick Rives, José-Raul Azinheira [Instituto Superior Tecnico (Lisbonne, Portugal)], Samuel Bueno [Information Technology Institute (Campinas, Brésil)], Geraldo Silveira [Information Technology Institute (Campinas, Brésil)].

**Mots clés :** *drônes aériens, modélisation, commande, asservissement visuel.*

Synthétiser des correcteurs robustes pour le contrôle de drones aériens est une tâche difficile. Cette difficulté est principalement due à la grande variabilité des modèles en fonction des différentes allures de vol (croisière, montée, descente, approche, atterrissage...). En pratique, les pilotes automatiques possèdent plusieurs systèmes de commande (jusqu'à une trentaine pour des avions de type Airbus) qui commutent en fonction de l'allure de vol. Dans le cas d'un dirigeable, la difficulté est accrue en raison de grandes différences entre les conditions de vol vectorisé et de vol en portance. Notre objectif, pour cette étude, était d'évaluer les limites de validité d'une loi de commande unique synthétisée à partir d'un modèle linéarisé du système. Afin de ne pas avoir à traiter l'aspect de non-holonomie - qui requierait d'autres techniques de commande - notre objectif de commande se limitait à la régulation en  $(x, y, z, u)$ , avec  $(x, y, z)$  représentant la position du repère dirigeable dans le repère de référence sol, et  $u$  la vitesse d'avancement du dirigeable. Le problème se ramène à celui de la poursuite d'un dirigeable virtuel se déplaçant sur une trajectoire de référence. Nous avons opté pour un correcteur de type LQR afin de bénéficier de bonnes propriétés de robustesse globale.

Les principaux résultats obtenus cette année portent sur la modélisation et le contrôle du dirigeable AS800 dont dispose l'ITI de Campinas (Figure 7) à des fins d'expérimentation.

En terme de modélisation, un dirigeable se distingue d'autres types d'engins aériens du fait de :

- l'important volume d'air déplacé rendant sa masse et ses moments d'inertie sensiblement plus importants que ceux résultant de la seule structure mécanique,
- la masse du dirigeable variant en fonction de l'altitude et de l'état des ballonnets d'air dans l'enveloppe qui jouent un rôle similaire au ballast des sous-marins -on suppose toutefois que ces variations sont lentes-,
- la position du centre de gravité qui est variable en fonction des conditions de vol.

L'AS800 et, d'une façon générale, les dirigeables d'observation, sont le plus souvent dotés de propulseurs vectorisés permettant de contrôler la direction et la force de poussée afin de faire du vol stationnaire ou de reculer. Cette particularité n'est pas sans conséquence sur la modélisation et la commande. Elle induit des modes de vol - vectorisés ou avec portance - ayant des comportements et des entrées de commande différents. Pour certains modes intermédiaires, entre portance et vectorisation, il est même possible de faire apparaître de la redondance au niveau de la commande. Cette caractéristique se retrouve, à un degré moindre, dans le plan latéral où la présence d'un propulseur de queue, s'ajoutant à l'action du gouvernail de direction, autorise une plus grande manœuvrabilité à basse vitesse. Nous avons présenté l'année dernière la synthèse d'un contrôleur LQR basé sur un modèle linéarisé symbolique du dirigeable et paramétré par le point de fonctionnement dépendant de l'altitude  $h$  et de la vitesse longitudinale  $u$ . Cette année, notre travail a porté sur l'utilisation de techniques d'asservissement visuel pour automatiser des phases de vol critiques : stabilisation en point fixe, atterrissage et suivi de structures linéiques (route, rivière...) [25].



*Figure 7. Le dirigeable AS800*

### 6.5.1. Stabilisation et atterrissage automatique :

Dans cette phase de vol, l'objectif est de stabiliser le dirigeable au-dessus d'une cible puis de contrôler la descente du dirigeable verticalement par rapport à cette cible. La cible est constituée par un cercle de rayon  $r = 2m$  posé au sol surmontée d'un ballon sphérique de  $0.1m$  de rayon flottant à une hauteur  $h = 4m$  et retenu par une élingue attachée au centre du cercle. Cette cible est observée par une caméra embarquée sur le dirigeable avec un axe optique vertical pointant vers le bas. L'objectif de la tâche d'asservissement visuel est d'amener l'axe optique en coïncidence avec la verticale passant par le centre de la cible au sol, puis de descendre le long de cet axe lors de la phase d'atterrissage. Lorsque la tâche est réalisée, la cible se projette sous forme d'un cercle et d'un disque (projection du ballon) centrés dans l'image. Les résultats de simulation d'une commande utilisant le modèle linéarisé sont présentés pour une position finale désirée  $x^* = (Nord = 5m, Est = 20m, Alt = 25m)$  partant d'une position initiale  $x_{init} = (Nord = -15m, Est = 0m, Alt = 25m)$  avec un vent constant de  $4m/s$  de direction Nord activé à  $t = 1s$ . La Figure 8 présente la trajectoire  $xy$  et l'évolution de l'altitude, de l'angle de tangage et de l'angle de roulis au cours de la mission.

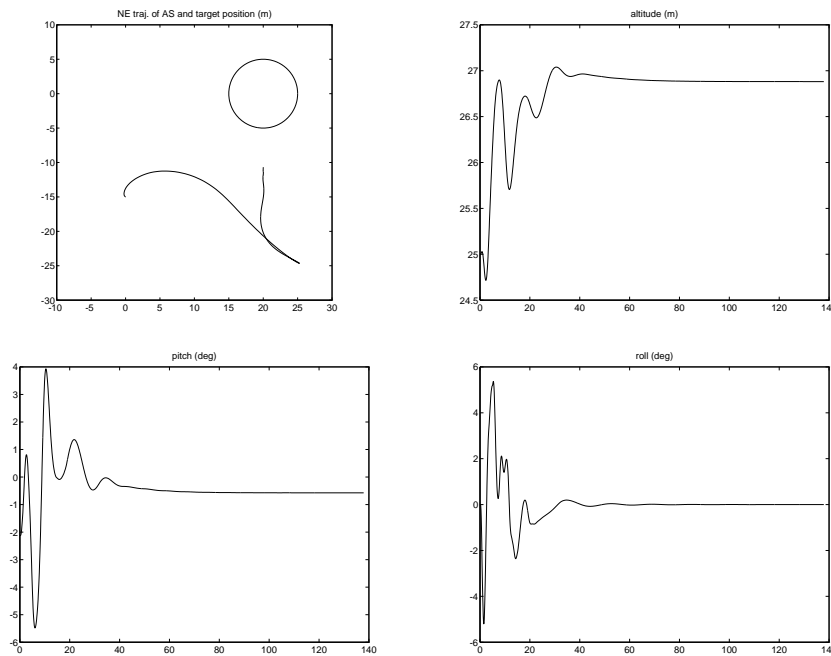


Figure 8. Trajectoire du repère dirigeable dans le repère sol.

### 6.5.2. Suivi de structures linéiques :

L'approche d'asservissement visuel utilisée est similaire à la précédente à ceci près que la cible est constituée de deux ou trois lignes droites parallèles au sol symbolisant des bords de routes ou de rivières. Au cours de la tâche de suivi, le problème de commande est grandement facilité par le fait que la vitesse  $u$  est toujours positive. Cette approche a été également appliquée avec succès à l'atterrissage d'un avion autonome dans le cadre de notre collaboration avec l'IST de Lisbonne.

## 7. Contrats industriels

### 7.1. Action avec Ifremer

**Mots clés :** robotique sous marine, vision, reconstruction 3D.

**Participants :** Patrick Rives, François-Xavier Espiau.

Une bourse de thèse financée par IFREMER a été accordée à F.X. Espiau sur le thème : *reconstruction d'objets naturels par vision active*. Ce travail de thèse a été soutenu en Février 2002. Suite à cette thèse, un contrat de recherche de trois mois a permis de transférer les outils logiciels développés dans le projet ICARE sur le site Ifremer de Toulon.

## 7.2. Action Sagem SA/ Johnson Controls Inc.

**Mots clés :** *actionneur électromagnétique, modélisation, commande.*

**Participants :** Pascal Morin, Claude Samson.

Un contrat de recherche sur une durée de deux ans avait été mis en place au début de l'année 2000 avec la société Sagem SA, en collaboration avec le projet Sosso de l'INRIA Rocquencourt. Hellal Benzaoui avait été recruté sur un poste de post-doctorat pour travailler sur ce contrat -son contrat, d'une durée de quatorze mois s'était terminé fin mars 2001. La suite du contrat a donc été mené par les membres permanents du projet. Le rapport final a été remis à la Société Johnson Controls (qui a repris les activités Automobile de Sagem SA) dans le courant de l'été.

Le sujet de cette étude est la commande d'un actionneur électromagnétique. Ce type d'actionneur est destiné à assurer l'ouverture des soupapes d'admission et d'échappement des moteurs à combustion. L'objectif, à terme, est de supprimer l'arbre à cames qui assure traditionnellement cette fonction. L'étude qui nous a été confiée concerne la modélisation et la commande de ce système. La principale contrainte opérationnelle est d'assurer des vitesses d'impact faibles lorsque la partie mobile de l'actionneur linéaire de type électro-aimant arrive en butée.

Nous avons continué à affiner les lois de commandes utilisées au voisinage des butées, et à les valider sur le banc d'essai. Le travail a porté principalement sur trois aspects : i) réglage des gains des retours d'état, ii) synthèse d'observateurs simplifiés afin de répondre aux contraintes de temps de calcul, iii) robustification de la commande. Ce travail a fait l'objet du rapport de contrat [31].

## 7.3. Projet CyberCars

**Mots clés :** *véhicules urbains, navigation, commande.*

**Participants :** Guillaume Artus, Nicolas Simond, Jean-Jacques Borrelly, Pascal Morin, Patrick Rives, Claude Samson.

Le projet européen IST CYBERCARS rassemble différents acteurs industriels et académiques dans le but de développer de nouveaux moyens de transport en environnement urbain faisant largement appel à l'automatisation (<http://www.cybercars.org/>). Icare collabore à ce projet par l'intermédiaire de deux travaux de thèse :

- G. Artus, « Automatisation de manœuvres pour une voiture électrique »,
- N. Simond, « Localisation et navigation d'un véhicule électrique dans un milieu de type urbain ».

Ces travaux ont débuté début octobre 2001. Les bourses des deux doctorants sont financées par CYBER-CARS.

# 8. Actions régionales, nationales et internationales

## 8.1. Actions nationales

### 8.1.1. RTP « Systèmes Aérospatiaux » du CNRS

**Participant :** Patrick Rives.

P. Rives est membre du Comité de Pilotage du RÉSEAU THÉMATIQUE « SYSTÈMES AÉROSPATIAUX » du CNRS.

### 8.1.2. Programme ROBEA du CNRS

**Participants :** Claude Samson, Patrick Rives, Pascal Morin, Ezio Malis, Selim Benhimane, Matthieu Fruchard.

Nous participons au programme interdisciplinaire ROBEA du CNRS en Robotique au travers de deux projets (participation pour l'un, maîtrise d'œuvre pour l'autre), intitulés

- *Robots mobiles terrestres et aériens en environnements extérieurs : modélisation de l'environnement et navigation sûre basée sur la vision*
- *Commande de manipulateurs mobiles non-holonômes*

Ces projets sont menés en collaboration avec des équipes du CNRS et universitaires : LAAS (Toulouse), ENI (Tarbes), LSIT (Strasbourg), CESBIO (Toulouse). Leur durée est de trois ans.

## 8.2. Actions européennes

### 8.2.1. Collaboration INRIA/ICCTI

Dans le cadre du programme de collaboration entre l'INRIA et l'ICCTI, nous menons une action dans le domaine de la commande de drones aériens d'observation avec l'Instituto Superior Técnico de Lisbonne. Dans le cadre de cette collaboration, le professeur José Raul Azinheira a passé deux semaines dans le projet Icare et P. Rives une semaine à l'IST. Cette action est complétée par une coopération avec l'ITI de Campinas (Brésil) sur un thème identique.

## 8.3. Actions internationales

### 8.3.1. Collaboration INRIA/CNPq

Dans le cadre de cette action, le projet Icare a accueilli pendant une semaine deux chercheurs de L'ITI, Samuel S. Bueno et Geraldo F. Silveira. Un séjour de P. Rives à Campinas est programmé en mars 2003. (voir aussi *Collaboration INRIA/ICCTI* 8.2)

# 9. Diffusion des résultats

## 9.1. Animation de la Communauté scientifique

- C. Samson est membre du Comité de Lecture de la Collection « Mathématiques et Applications » de la SMAI (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles).
- P. Rives a participé en tant qu'expert à la Commission d'Evaluation du CEMAGREF pour l'évaluation globale de l'ATR « Precitech » et individuelle de ses chercheurs.

## 9.2. Participation à des colloques

Les membres du projet ont présenté leurs travaux dans les conférences suivantes :

- EUROPEAN NAVAL SHIP DESIGN SHORT COURSE, ENSIETA, Brest, avril 2002.
- IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, D.C., USA, mai 2002.
- European Conference on Computer Vision, Copenhagen, Danemark, mai 2002.
- CIFA 2002 (Conférence Internationale Francophone d'Automatique), Nantes, juillet 2002.
- Journées du Programme Interdisciplinaire ROBEA, Toulouse, octobre 2002.
- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems, Lausanne, Suisse, octobre 2002.
- Second Joint CSS/RAS International Workshop on Control Problems in Robotics and Automation, Las Vegas, USA, décembre 2002.
- IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, USA, décembre 2002.

### 9.3. Participation à des activités d'intérêt collectif

- C. Samson est membre de la Commission des Postes Associés de l'U.R. de Sophia Antipolis.
- P. Rives est membre du Comité de Suivi Doctoral de l'U.R. de Sophia Antipolis.
- P. Rives représente l'Inria au sein du comité en charge des collaborations avec le Portugal.
- P. Rives est responsable de l'action de développement VISA transversale aux projets de recherche de l'UR de Sophia Antipolis et destinée à valoriser les recherches dans le domaine des VÉHICULES DU FUTUR.

### 9.4. Formation par la recherche

- *Thèses soutenues :*
  - F.X. Espiau, « Métrologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins », université de Nice-Sophia Antipolis, soutenue le 26 février 2002, responsable scientifique : P. Rives,
  - A. C. Victorino, « Commande référencée capteur : une approche robuste au problème de navigation, localisation et cartographie simultanées pour un robot d'intérieur », université de Nice-Sophia Antipolis, soutenue le 27 septembre 2002, responsable scientifique : P. Rives.
- *Thèses en cours :*
  - G. Artus, « Automatisation de manœuvres pour une voiture électrique », École des Mines de Paris, responsables scientifiques : C. Samson, P. Morin.
  - S. Benhimane, « Asservissement visuel avec une optique à focale variable », responsables scientifiques : P. Rives, E. Malis.
  - M. Fruchard, « Commande de bras manipulateurs mobiles non-holonômes », École des Mines de Paris, responsables scientifiques : C. Samson, P. Morin.
  - N. Simond, « Localisation et navigation d'un véhicule électrique dans un milieu de type urbain », université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives.
- *Participation à des jurys de thèse :*
  - P. Rives a été rapporteur et membre du jury de trois thèses.
  - C. Samson a été rapporteur et membre du jury de deux thèses.
- *Stages :*
  - S. Benhimane, « Asservissement visuel avec une optique à focale variable », stage de fin d'études de l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, mars-septembre 2001.

### 9.5. Enseignement

- P. Rives est membre de la 61<sup>e</sup> Commission de Spécialistes de l'Université de Nice - Sophia Antipolis.
- Cours *Vision industrielle*, École Nationale des Télécommunications de Bretagne (P. Rives, 3 heures).
- Encadrement projet ESSI (J.J Borrelly et P. Rives)

- École d'été sur l'asservissement visuel organisée par EURON (European Research Network), Université Jaume I de Castellon, Espagne (E. Malis, 3 heures de cours et 6 heures de TP pour 45 doctorants et chercheurs).

## 10. Bibliographie

### Bibliographie de référence

- [1] J.-J. BORRELLY, E. COSTE-MANIÈRE, B. ESPIAU, K. KAPELLOS, R. PISSARD-GIBOLLET, D. SIMON, N. TURRO. *The ORCCAD architecture*. in « International Journal of Robotics Research, MIT press », volume numéro spécial « Integrated Architectures for Robot Control and Programming », mars, 1998.
- [2] D. DJIAN, P. RIVES. *Reconnaissance d'objets 3D par vision active : Apprentissage de réseaux Bayésiens*. in « 11ième Congrès AFCET RFIA », Clermont Ferrand, France, 19-21 janvier, 1998.
- [3] E. MALIS, F. CHAUMETTE, S. BOUDET. *2 1/2 D Visual Servoing*. in « IEEE Trans. on Robotics and Automation », numéro 2, volume 15, Avril, 1999, pages 234-246.
- [4] P. MORIN, J.-B. POMET, C. SAMSON. *Design of homogeneous time-varying stabilizing control laws for driftless controllable systems via oscillatory approximation of Lie brackets in closed-loop*. in « SIAM Journal of Control and Optimization », numéro 1, volume 38, 1999, pages 22-49.
- [5] P. MORIN, C. SAMSON. *A characterization of the Lie algebra rank condition by transverse periodic functions*. in « SIAM Journal of Control and Optimization », numéro 4, volume 40, 2001, pages 1227-1249.
- [6] P. RIVES, M. DEVY. *Perception pour la localisation*. éditeurs J.-P. LAUMOND., in « La robotique mobile », Hermes, 2001.
- [7] P. RIVES, M. DEVY. *Perception pour la navigation et la commande*. éditeurs J.-P. LAUMOND., in « La robotique mobile », Hermes, 2001.
- [8] 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, 28-30 mai, 1996.
- [9] C. SAMSON, M. LEBORGNE, B. ESPIAU. *Robot control. The Task Function approach*. série Oxford Engineering Series, volume 22, Oxford University Press, 1991.
- [10] C. SAMSON. *Velocity and torque feedback control of a nonholonomic cart*. in « Advanced Robot Control. Proceedings of the International Workshop on Nonlinear and Adaptive Control : Issues in Robotics, Grenoble, France, Nov. 21-23, 1990 », série Lecture Notes in Control and Information Sciences, volume 162, Springer-Verlag, pages 125-151, 1991, C. Canudas de Wit (Ed.).
- [11] C. SAMSON. *Control of chained systems. Application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots*. in « IEEE Transactions on Automatic Control », numéro 1, volume 40, 1995, pages 64-77.

## Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [12] F. ESPIAU. *Métriologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins*. thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, février, 2002.
- [13] A. VICTORINO. *La commande référencée capteur : une approche robuste au problème de navigation, localisation et cartographie simultanées pour un robot d'intérieur*. thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, septembre, 2002.

## Articles et chapitres de livre

- [14] E. MALIS, F. CHAUMETTE. *Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods*. in « IEEE Transaction on Robotics and Automation », numéro 2, volume 18, avril, 2002, pages 176-186.
- [15] E. MALIS, R. CIPOLLA. *Camera self-calibration from unknown planar structures enforcing the multi-view constraints between collineations*. in « IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence », numéro 9, volume 24, septembre, 2002, pages 1268-1272.
- [16] P. MORIN, C. SAMSON. *Feedback control of nonholonomic wheeled vehicles. A survey*. in « Archives of control sciences », volume 12, 2002, pages 7-36.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [17] J. AZINHEIRA, P. RIVES, J. CARVALHO, G. SILVEIRA, E. PAIVA, S. BUENO. *Visual Servo Control for the Hovering of an Outdoor Robotic Airship*. in « IEEE International Conference on Robotics and Automation », volume 3, pages 2287-2793, Washington, D.C., USA, mai, 2002.
- [18] F.-X. ESPIAU, E. MALIS, P. RIVES. *Robust features tracking for robotic applications : towards 2 1/2 D visual servoing with natural images*. in « IEEE International Conference on Robotics and Automation », volume 1, pages 574-579, Washington, D.C., USA, mai, 2002.
- [19] E. MALIS, J.-J. BORRELLY, P. RIVES. *Intrinsics-free visual servoing with respect to straight lines*. in « IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems », Lausanne, Switzerland, octobre, 2002.
- [20] E. MALIS. *A Unified Approach to Model-based and Model-free Visual Servoing*. in « European Conference on Computer Vision », volume 4, pages 433-447, Copenhagen, Denmark, mai, 2002.
- [21] E. MALIS. *Stability Analysis of Invariant Visual Servoing and Robustness to Parametric Uncertainties*. in « Second Joint CSS/RAS International Workshop on Control Problems in Robotics and Automation », Las Vegas, Nevada, USA, décembre, 2002.
- [22] E. MALIS. *Vision-based control invariant to camera intrinsic parameters : stability analysis and path tracking*. in « IEEE International Conference on Robotics and Automation », volume 1, pages 217-222, Washington, D.C., USA, mai, 2002.
- [23] P. MORIN, C. SAMSON. *Commande par retour d'état de systèmes non-linéaires sans dérive. L'approche par*



*fonctions transverses.* in « CIFA'2002 (Conférence Internationale Francophone d'Automatique) », Nantes, France, juillet, 2002.

- [24] P. MORIN, C. SAMSON. *Practical stabilization of driftless systems on Lie groups.* in « IEEE Conf. on Decision and Control », Las Vegas, USA, décembre, 2002.
- [25] G. SILVEIRA, J. CARVALHO, P. RIVES, S. BUENO, M. K.M.. *Optimal Visual Servoed Guidance of Outdoor Autonomous Robotic Airship.* in « Proc. of American Control Conference ACC'2002 », Anchorage, Alaska, USA, mai, 2002.
- [26] A. VICTORINO, P. RIVES, J.-J. BORRELLY. *A Relative Motion Estimation by Combining Laser Measurement and Sensor Based Control.* in « IEEE International Conference on Robotics and Automation », volume 4, pages 3924-3930, Washington, D.C., USA, mai, 2002.
- [27] A. VICTORINO, P. RIVES, J.-J. BORRELLY. *A Relative Motion Estimation Using a Bounded Error Method.* in « IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems », Lausanne, Switzerland, octobre, 2002.
- [28] A. VICTORINO, P. RIVES, J.-J. BORRELLY. *Exploration et cartographie de scènes d'intérieur par navigation référencée laser.* in « Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle RFIA'2002 », Angers, France, janvier, 2002.

## Rapports de recherche et publications internes

- [29] P. RIVES, J. AZINHEIRA. *Visual Auto-landing of an Autonomous Aircraft.* rapport technique, numéro 4606, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4606.html>.

## Divers

- [30] S. BEHIMANE. *Asservissement visuel avec une optique à focale variable.* rapport technique, Rapport de DEA de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, Juillet, 2002.
- [31] H. BENZAOUI, P. MORIN, C. SAMSON. *Commande d'un actionneur électromagnétique. Partie III : Stratégies de commande en butée.* juillet, 2002, Rapport de contrat avec Johnson Controls inc..

## Bibliographie générale

- [32] J.-M. CORON. *Global asymptotic stabilization for controllable systems without drift.* in « Mathematics of Control, Signals and Systems », volume 5, 1992, pages 295-312, New York : Springer-Verlag.
- [33] M. GHALLAB. *Planification et décision.* éditeurs J.-P. LAUMOND., in « La robotique mobile », Hermes, 2001.
- [34] E. MALIS. *Contribution à la modélisation et à la commande en asservissement visuel.* thèse de doctorat, Université de Rennes I, 1998.
- [35] P. MORIN, C. SAMSON. *Practical stabilization of a class of nonlinear systems. Application to chain systems and mobile robots.* in « IEEE Conf. on Decision and Control », décembre, 2000.

- 
- [36] P. RIVES, J. BORRELLY. *Visual Servoing Techniques Applied to an Underwater Vehicle*. in « IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation », Albuquerque, USA, avril, 1997.
- [37] P. RIVES. *Perception et contrôle d'exécution de tâches robotiques*. in « Journées Nationales de la Recherche en Robotique », Toulouse, France, novembre, 1997.
- [38] P. ROUCHON, M. FLIESS, J. LEVINE, P. MARTIN. *Flatness and motion planning : the car with -n- trailers*. in « Proc. Int. Conf. ECC'93 », Groningen, Holland, 1993.
- [39] C. SAMSON. *Développements récents et problèmes ouverts en commande de robots*. in « Journées Nationales de la Recherche en Robotique », Toulouse, France, novembre, 1997.
- [40] A. C. VICTORINO, P. RIVES, J. J. BORRELLY. *Localization and Map Building Using a Sensor-based Control Strategy*. in « IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS2000 », Takamatsu, Japon, 1 - 3 novembre, 2000.