



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

## *Projet ICARE*

*Instrumentation, Commande et Architecture des Robots Évolués*

*Sophia Antipolis*

THÈME 4A

*R*apport  
*d'Activité*

2000



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>4</b>
3.1	Robots et commande . . . . .	4
3.2	Commande des systèmes non-linéaires . . . . .	6
3.3	Perception pour la modélisation . . . . .	7
3.3.1	Modélisation géométrique . . . . .	8
3.3.2	Reconnaissance de structures connues . . . . .	8
3.4	Navigation de robots mobiles . . . . .	9
3.4.1	Perception et planification de tâches . . . . .	9
3.4.2	Perception et contrôle d'exécution . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>11</b>
4.1	Panorama . . . . .	11
4.2	Robotique sous-marine . . . . .	11
4.3	Conduite automatisée . . . . .	12
4.4	Drônes aériens d'observation . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>14</b>
5.1	Simparc . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>14</b>
6.1	Stabilisation de robots mobiles et de systèmes non-linéaires . . . . .	14
6.1.1	Quelques arguments pour une nouvelle approche de la stabilisation des systèmes fortement non-linéaires . . . . .	15
6.1.2	Caractérisation d'une propriété de commandabilité par l'existence de fonctions périodiques transverses aux champs de commande . . . . .	16
6.1.3	Application à la stabilisation pratique des systèmes chaînés . . . . .	18
6.1.4	Application à la commande de véhicules non-holonômes et à la planification de trajectoires . . . . .	19
6.2	Perception et navigation . . . . .	19
6.2.1	Perception pour la cartographie et la localisation d'un robot mobile . . . . .	20
6.2.2	Planification de déplacements et navigation sûre . . . . .	21
6.3	Vision active . . . . .	22
6.3.1	Asservissement visuel pour la navigation des robots mobiles . . . . .	22
6.3.2	Métriologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins . . . . .	24
6.4	Moyens Expérimentaux . . . . .	26
6.4.1	Laboratoire de robotique . . . . .	26
6.4.2	Simparc . . . . .	27

---

<b>7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>27</b>
7.1 Action avec Ifremer . . . . .	27
7.2 Action Sagem SA . . . . .	28
<b>8 Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>28</b>
8.1 Actions régionales . . . . .	28
8.1.1 Groupement Robotique Sud Méditerranée . . . . .	28
8.2 Actions nationales . . . . .	28
8.2.1 GDR Automatique . . . . .	28
8.2.2 GDR Isis . . . . .	29
8.2.3 Action CyCab . . . . .	29
8.2.4 ARC AVEC . . . . .	29
8.2.5 Divers . . . . .	29
8.3 Actions européennes . . . . .	29
8.3.1 Collaboration INRIA/ICCTI . . . . .	29
8.3.2 Divers . . . . .	29
8.4 Actions internationales . . . . .	30
8.4.1 Collaboration INRIA/CNPq . . . . .	30
<b>9 Diffusion de résultats</b>	<b>30</b>
9.1 Animation de la Communauté scientifique . . . . .	30
9.2 Participation à des colloques . . . . .	30
9.3 Participation à des activités d'intérêt collectif . . . . .	30
9.4 Formation par la recherche . . . . .	30
9.5 Enseignement . . . . .	31
<b>10 Presentation (english)</b>	<b>31</b>
<b>11 Bibliographie</b>	<b>32</b>

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Claude Samson [DR]

### Responsable permanent

Patrick Rives [DR]

### Assistante de projet

Agnès Clément-Bessière [TR]

### Personnel INRIA

Pascal Morin [CR]

Ezio Malis [CR à partir du 2/10/2000]

Jean-Jacques Borrelly [IR]

### Chercheurs doctorants

François-Xavier Espiau [boursier IFREMER]

David Lizarraga-Navarro [boursier SFERE-CONACYT jusqu'au 31/05/00]

Alessandro Corrêa-Victorino [boursier CAPES]

Arturo Gómez-Cortés [boursier EGIDE du 1/2/00 au 29/9/00]

### Chercheur post-doctorant

Hellal Benzaoui [boursier EGIDE puis INRIA à partir du 1/2/00]

## 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'algorithmique 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. L'acquisition par l'U.R. de Sophia-Antipolis d'un véhicule électrique CyCab, dans le courant du

second semestre 2000, nous permettra dans les prochaines années de mener des expérimentations en environnement extérieur. Les activités sur ce véhicule reflèteront notre participation au programme LA Route Automatisée (LARA) de l'INRIA, dans le cadre de l'axe prioritaire *transports*. 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'université 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, David Lizarraga-Navarro.

**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 et inachevée 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, d'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-holonome* (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 holonome 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-holonome 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 holonômes 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), et BIP (Bernard Espiau), en particulier.

### 3.2 Commande des systèmes non-linéaires

**Participants :** Claude Samson, Pascal Morin, David Lizarraga-Navarro.

**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 [Sam97]. 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*[RFLM93], utilisée pour résoudre des problèmes de planification de trajectoires, ou encore les techniques de commande par *retour d'état continu instationnaire*[Cor92], utilisées pour résoudre le problème de stabilisation asymptotique en un point.

- 
- [Sam97] C. SAMSON, « Développements récents et problèmes ouverts en commande de robots », *in : Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Toulouse, France, novembre 1997.
- [RFLM93] 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.
- [Cor92] J.-M. CORON, « Global asymptotic stabilization for controllable systems without drift », *Mathematics of Control, Signals and Systems 5*, 1992, p. 295–312, New York: Springer-Verlag.



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* [8] qui représente aujourd'hui le cadre standard utilisé pour aborder les problèmes de commande référencée capteurs. Nos études de commande de robots mobiles [9] 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 [21, 15, 16].

### 3.3 Perception pour la modélisation

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

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

**Résumé :** *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 sera de 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, 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.

#### Résumé :

*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 [Lac97]. 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

---

[Lac97] S. LACROIX, « Perception et planification de tâches robotiques », in : *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Toulouse, France, novembre 1997.

se localiser. Dans le premier cas, on fera une distinction supplémentaire entre la construction de *modèles géométriques* destinés à la planification de *trajectoires* continues libres d'obstacle et la construction de *modèles topologiques* destinés à la planification de *chemins* dont l'ensemble constitue le graphe des points de passage permettant d'aller d'un *lieu* à un autre. 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, telles celles décrites dans la section 3.3.2.

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 inertielle...), 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 référencée capteurs pour imposer des contraintes sur les problèmes de localisation et de modélisation géométrique et, de ce fait, les rendre mieux conditionnés.

### 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 <sup>[Riv97]</sup>. 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 pouvoir robustifier 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

---

[Riv97] P. RIVES, « Perception et contrôle d'exécution de tâches robotiques », in : *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Toulouse, France, novembre 1997.

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 généralité des formalismes permet d'envisager leur application à différents capteurs utilisés en robotique (odométrie, capteurs d'effort, centrale inertielle, proximétrie, vision locale,...).

## 4 Domaines d'applications

### 4.1 Panorama

**Résumé :** *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. Le projet est impliqué également dans l'action de développement LARA (LA Route Automatisée) portant sur la thématique des transports de demain. À ce titre, il gère une plateforme expérimentale autour d'un véhicule électrique urbain, le CyCab, servant de support expérimental aux différents projets de recherche de l'U.R. de Sophia-Antipolis désirant valider des études dans ce domaine. 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.

## Résumé :

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, est en cours.

### 4.3 Conduite automatisée

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

**Participants :** Claude Samson, Patrick Rives, Pascal Morin, Jean-Jacques Borrelly.

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'exemplaire disponible sur le site

de Sophia, servira de support expérimental aux recherches dans le domaine des *Transports du futur* notamment sur les aspects de la *conduite automatique*.

Un premier sujet de recherche concerne l'étude de méthodes de commande d'un système constitué de deux véhicules de type voiture (donc, 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).

D'autres sujets concernent 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 les contraintes de sécurité (détection des piétons et des obstacles) et les aspects de planification dans des environnements pouvant évoluer.

#### 4.4 Drones aériens d'observation

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

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

Cette coopération avec le CTI 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/CTI** 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 l'an dernier 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, s'est poursuivie cette année 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 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 terme être validées sur les engins développés par nos partenaires.

## 5 Logiciels

### 5.1 Simparc

**Mots clés** : robotique, temps réel, simulation.

**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, David Lizzaraga-Navarro.

**Mots clés** : système non linéaire, stabilisation asymptotique, stabilisation pratique, commande instationnaire, système homogène, retour d'état continu, robot mobile.

**Résumé** : *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. Les années précédentes, nous avons abordé ce problème via le développement de la théorie de la commande par retour d'état instationnaire. Nous nous sommes cette année 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 Quelques arguments pour une nouvelle approche de la stabilisation des systèmes fortement non-linéaires

Les études sur la commande par retour d'état des systèmes non-linéaires sans dérive commandables font apparaître un certain nombre de limitations inhérentes à la nature des problèmes et aux propriétés structurelles de ces systèmes.

Tout d'abord, la difficulté propre au problème de stabilisation asymptotique en un point (d'équilibre) conduit à distinguer ce problème de celui, généralement plus simple, de stabilisation (poursuite) de trajectoires ne comportant pas de points "d'arrêt". La difficulté du premier problème est directement liée à la non-commandabilité de l'approximation linéaire du système en un point d'équilibre. Cette distinction a elle-même pour conséquence la conception et la mise en œuvre de méthodes et algorithmes de commande distincts et, par suite, de stratégies de "commutation" entre plusieurs lois de commande dans toute situation pratique où la trajectoire à stabiliser contient des points d'arrêt. Tout conducteur de voiture a une expérience pratique et empirique de ce type de commutation lorsqu'il enchaîne une phase de réalisation de manœuvres pour garer sa voiture avec celle de conduite sur route à vitesse non nulle ("cruising", en anglais). Les lois de commande instationnaire que nous avons étudiées ces dernières années sont spécifiquement conçues pour résoudre le premier problème, mais ne sont pas adaptées au second, ne serait-ce qu'en raison des termes "d'excitation" périodiques à fréquence constante qu'elle contiennent et dont la présence est inutile, sinon nuisible, dans le cas de la poursuite d'une trajectoire sans point d'arrêt.

Nos études ont d'autre part mis en évidence ([11]) la non-existence, pour un système "chaîné" (cas particulier de système sans dérive commandable), de lois de commande capables de stabiliser asymptotiquement toutes les trajectoires du système résultant de l'application d'entrées de commande bornées et dérivables, alors que la synthèse d'une telle commande est triviale dans le cas des systèmes linéaires commandables. Dans le cadre du problème de poursuite d'un véhicule de référence, ce résultat signifie par exemple qu'il existe toujours, quelle que soit la loi de commande considérée, des mouvements du véhicule de référence qui mettent en échec la convergence vers zéro de l'erreur de suivi.

Sur un autre plan, il faut reconnaître que nos tentatives d'amélioration des propriétés de robustesse des lois de commande instationnaires n'ont apporté que des réponses partielles qu'il convient de confronter à la pratique. À cet égard, les expérimentations que nous avons menées sur notre robot mobile de laboratoire ont confirmé que les limitations, en terme de robustesse, de l'ensemble des stabilisateurs asymptotiques connus ont des conséquences réelles sur les performances atteintes et interdisent, dans presque tous les cas, la convergence effective vers l'équilibre désiré ainsi qu'une grande précision de positionnement. De ce fait, il nous semble à présent irréaliste, dans de nombreuses situations, d'essayer de garantir simultanément la robustesse aux erreurs de modèle et la robustesse des performances (au sens des approches classiques de commande qui portent sur les systèmes "faiblement" non-linéaires). Ceci nous amène aussi à re-évaluer l'intérêt de poursuivre plus loin l'étude de stabilisateurs asymptotiques, tout au moins dans le sens restreint que nous avons considéré pendant ces dernières années.

Enfin, alors qu'il est connu que toute trajectoire dans l'espace d'état du système peut, sur un horizon de temps fini, être arbitrairement approchée par une solution du système en utilisant des entrées de commande oscillantes, avec une qualité d'approximation d'autant meilleure que la fréquence d'oscillation est grande, force est de constater que les études existantes de commande par retour d'état instationnaire périodique ont très peu exploré les possibilités offertes par des variations contrôlées de la fréquence d'oscillation. La raison tient clairement au fait que ces commandes n'ont pas été originellement conçues pour stabiliser des trajectoires quelconques. Étudier les potentialités d'application de ces techniques de commande dans un contexte d'utilisation plus étendu, en faisant notamment intervenir le réglage de fréquence comme un degré de liberté supplémentaire au niveau de la synthèse de la loi de commande, reste donc une direction de recherche encore largement ouverte.

L'ensemble de ces considérations, et l'enseignement tiré du passé, nous ont récemment amenés à aborder la commande des systèmes sans dérive commandables avec des objectifs différents. En particulier, il nous paraît utile de "relaxer" l'objectif de stabilisation d'un point d'équilibre (dont nous pressentons qu'il n'est pas atteignable de façon robuste) par un objectif plus faible de *stabilisation d'un voisinage borné* (a priori petit) de ce point. Cet objectif est à rapprocher de la notion de stabilisation "pratique" parfois évoquée dans la littérature. Ceci permet déjà de s'affranchir de la contrainte de non-différentiabilité de la loi de commande, source majeure de non-robustesse. Un autre avantage de cet objectif apparemment "moins ambitieux" est qu'il conduit à une formulation plus souple du problème plus général de stabilisation de trajectoires dans l'espace d'état. L'objectif de stabilisation étant moins strict, l'ensemble des trajectoires du système "stabilisables" par un retour d'état unique ne peut que s'en trouver élargi. En se replaçant dans le contexte de la poursuite d'un véhicule de référence, il devient de ce fait imaginable de ne plus devoir recourir à des techniques de commutation entre plusieurs lois de commande et, par suite, de s'affranchir du problème délicat (et non résolu sur le plan théorique) de détermination des instants de commutation.

Une approche possible pour aborder cette nouvelle problématique consiste à "modifier" (ou "adapter") des lois de commande instationnaires existantes. Cependant, un article de Dixon *et al.* [DDZZ00] nous a donné l'idée d'une autre approche, plus directe et également plus élégante sur le plan mathématique. Elle repose sur l'utilisation d'oscillateurs à fréquences contrôlées qui jouent grosso-modo le même rôle que les termes périodiques dépendant du temps dans les lois de commande instationnaires.

Quelques résultats et perspectives de la recherche que nous avons démarrée l'année dernière sur cette approche sont présentés dans les trois sous-sections suivantes.

### 6.1.2 Caractérisation d'une propriété de commandabilité par l'existence de fonctions périodiques transverses aux champs de commande

Nous avons démontré un résultat d'équivalence entre la satisfaction, en un point, de la Condition de Rang de l'Algèbre de Lie par un ensemble de champs de vecteurs réguliers sur une variété et l'existence d'applications projetant un tore sur un voisinage –arbitrairement

---

[DDZZ00] W. E. DIXON, D. M. DAWSON, E. ZERGEROGLU, F. ZHANG, « Robust tracking and regulation control for a mobile robot », *International Journal of Robust and Nonlinear Control: Special Issue on Control of Underactuated Nonlinear Systems* 10, 4, 2000, p. 199–216.

petit- de ce point, chacune possédant la propriété d'être *transverse* à la distribution engendrée par les champs de vecteurs considérés, cela en chaque point image de l'application. Un énoncé mathématique de ce résultat est donné ci-dessous sous la forme d'un théorème.

Les notations utilisées pour l'énoncé du théorème sont les suivantes :

- étant donné deux variétés  $M$  et  $N$ , l'espace tangent à  $M$  au point  $p$  est noté  $M_p$ ,
- soit une application  $f \in \mathcal{C}^\infty(M; N)$ , l'application tangente de  $F$  au point  $p$  est notée  $T_p f$ ,
- le tore de dimension  $k \in \mathbb{N}$  est noté  $\mathbb{T}^k$ .

**Théorème 1** [15, 21] *Soit  $m$  champs de vecteurs  $b_1, \dots, b_m$  infiniment différentiables, sur une variété  $M$  de dimension  $n$  elle-même infiniment différentiable, tels que la distribution d'accessibilité  $D(p) \triangleq \text{Span} \{b(p) : b \in \text{Lie}(b_1, \dots, b_m)\}$  est de dimension constante  $n_0$  dans un voisinage de  $p_0$ . Alors les deux propriétés suivantes sont équivalentes :*

1.  $n_0 = n$ , autrement dit la Condition de Rang de l'Algèbre de Lie (Lie Algebra Rank Condition, dans la terminologie anglophone) en  $p_0$ , que nous noterons  $LARC(p_0)$ , est satisfaite par les champs de vecteurs  $b_1, \dots, b_m$ .
2. Il existe  $\bar{n} \in \mathbb{N}$  et, pour tout voisinage  $\mathcal{U}$  de  $p_0$ , une application  $f \in \mathcal{C}^\infty(\mathbb{T}^{\bar{n}-m}; \mathcal{U})$  telle que :

$$\forall \theta \in \mathbb{T}^{\bar{n}-m}, \quad M_{f(\theta)} = \text{Span} \{b_1(f(\theta)), \dots, b_m(f(\theta))\} + T_\theta f(\mathbb{T}_\theta^{\bar{n}-m}). \quad (1)$$

Tout point  $\theta$  de  $\mathbb{T}^{\bar{n}-m}$  étant représentable par un vecteur  $[\cos(\alpha_{m+1}), \sin(\alpha_{m+1}), \dots, \cos(\alpha_{\bar{n}}), \sin(\alpha_{\bar{n}})]^T$ , avec  $\alpha \triangleq [\alpha_{m+1}, \dots, \alpha_{\bar{n}}]^T \in \mathbb{R}^{\bar{n}-m}$ , toute application allant de  $\mathbb{T}^{\bar{n}-m}$  dans  $\mathbb{R}^n$  peut également être vue comme une fonction périodique allant de  $\mathbb{R}^{\bar{n}-m}$  dans  $\mathbb{R}^n$ , de période  $\Delta = [2\pi, \dots, 2\pi]^T \in \mathbb{R}^{\bar{n}-m}$ .

En identifiant localement la variété  $M$  à une carte dans  $\mathbb{R}^n$ , en posant  $p_0 = 0$ , et en notant  $B_n(0, \epsilon)$  la boule fermée dans  $\mathbb{R}^n$  centrée en zéro et de rayon  $\epsilon$ , un énoncé équivalent de la propriété 2 est :

*CT(0) : il existe  $\bar{n} \in \mathbb{N}$  et une famille  $(f_\epsilon)_{\epsilon > 0}$  de fonctions périodiques  $f_\epsilon \in \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}^{\bar{n}-m}; B_n(0, \epsilon))$  -de période  $\Delta$ - tels que, pour tout  $\epsilon > 0$ , la Condition de Transversalité suivante est satisfaite :*

$$\forall \theta \in \mathbb{T}^{\bar{n}-m}, \quad \text{Rank} \begin{pmatrix} b_1(f_\epsilon(\alpha)) & \dots & b_m(f_\epsilon(\alpha)) & -\frac{\partial f_\epsilon}{\partial \alpha_{m+1}}(\alpha) & \dots & -\frac{\partial f_\epsilon}{\partial \alpha_{\bar{n}}}(\alpha) \end{pmatrix} = n. \quad (2)$$

Signalons que l'énoncé du théorème implique que l'entier  $\bar{n}$  est supérieur ou égal à  $n$ . À partir de la démonstration du théorème, il est en fait possible de montrer que ce nombre peut être pris égal à la dimension (finie) de l'Algèbre de Lie de Commande (Control Lie Algebra) générée par des approximations homogènes des champs de vecteurs  $b_1, \dots, b_m$ . La démonstration du théorème fournit également un algorithme pour construire des fonctions  $f_\epsilon$  qui satisfont la condition de transversalité invoquée dans le théorème.

Nous nous sommes jusqu'à présent concentrés sur l'application de ce théorème au problème de stabilisation *pratique* des systèmes non-linéaires sans dérive et, plus spécifiquement, des systèmes dits *chaînés*, utilisés pour modéliser la cinématique de plusieurs types de véhicules sur roues (voir sous-sections suivantes). Nous pensons cependant qu'il pourrait avoir d'autres

applications dans d'autres domaines de l'automatique, dont celui de la théorie de l'estimation, ne serait-ce qu'en raison de la dualité bien connue de cette théorie avec celle de la commande. Nous indiquons aussi un peu plus loin comment il pourrait contribuer à apporter de nouvelles solutions au problème de synthèse de trajectoires de robots mobiles avec évitement d'obstacles.

### 6.1.3 Application à la stabilisation pratique des systèmes chaînés

Les résultats présentés dans cette sous-section, ainsi que dans les deux suivantes, sont tirés de [16].

Considérons un système mono-chaîné de dimension  $n (\geq 3)$ , à deux entrées de commande et sujet à une perturbation additive  $b_0(x,t)$  :

$$\dot{x} = b_1(x)u_1 + b_2u_2 + b_0(x,t) , \quad (3)$$

avec :

$$b_1(x) = [1, 0, x_2, \dots, x_{n-1}]^T , \quad b_2 = [0, 1, 0, \dots, 0]^T .$$

On suppose qu'à tout instant  $t \geq 0$  le vecteur de perturbation  $b_0(x(t),t)$  est connu ou mesuré. Notons qu'il existe des perturbations  $b_0(x,t)$  qui interdisent la stabilisation asymptotique de  $x = 0$ , cela quelle que soit la stratégie de commande considérée. Tout au plus peut-on alors espérer maintenir  $x(t)$  proche de zéro. C'est précisément ce que permet de faire la loi de commande proposée plus loin.

Il est connu –et simple de vérifier– que les champs  $b_1$  et  $b_2$  satisfont en 0, et par suite en tout point, la Condition de Rang de l'Algèbre de Lie. D'autre part, ces champs sont homogènes de degré  $-1$  par rapport à la dilatation  $\delta_\lambda : x \mapsto \delta_\lambda(x) = (\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda^2 x_3, \dots, \lambda^{n-1} x_n)$ , et les  $n$  champs de vecteurs  $b_1, b_2, L_{b_1}b_2, \dots, L_{b_1}^{n-2}b_2$  (avec  $L_{b_1}b_2 \triangleq [b_1, b_2]$ ,  $L_{b_1}^{k+1}b_2 \triangleq [b_1, L_{b_1}^k b_2]$ , et [...] désignant l'opération de crochet de Lie entre deux champs de vecteurs) constituent une base de l'Algèbre de Lie de Commande générée par les champs  $b_1$  et  $b_2$ . Par application du théorème (1), et en utilisant une remarque faite précédemment à propos de la valeur de l'entier  $\bar{n}$ , on déduit qu'il existe une famille de fonctions périodiques  $f_\epsilon \in C^\infty(\mathbb{R}^{n-2}, \mathbb{R}^n)$  qui satisfont l'équation (2). Introduisons maintenant la variable auxiliaire suivante :

$$z \triangleq \exp(-Ax_1)(x - f_\epsilon(\alpha)) , \quad (4)$$

avec  $A \triangleq \frac{\partial b_1(x)}{\partial x}$ , la matrice  $(n \times n)$  dont les seules entrées différentes de zéro sont  $A_{i+1,i} = 1$ , pour  $i \in \{2, \dots, n-1\}$ . Il est clair que  $z$  est nul si et seulement si  $x - f_\epsilon(\alpha)$  est nul. Une façon d'atteindre notre objectif de stabilisation pratique, avec réjection de la perturbation  $b_0$ , consiste à déterminer une commande qui stabilise  $z = 0$  asymptotiquement. On montre que  $z$  vérifie l'équation suivante :

$$\dot{z} = \exp(-Ax_1) [H_{f_\epsilon}(\alpha)\bar{U} + b_0(x,t) - A\tilde{x}b_{0,1}(x,t)] , \quad (5)$$

avec  $\tilde{x} \triangleq x - f_\epsilon(\alpha)$ ,  $\bar{U} \triangleq [u_1, u_2, \dot{\alpha}_3, \dots, \dot{\alpha}_n]^T$ , et  $H_{f_\epsilon}$  la matrice qui apparaît dans le terme de gauche de l'égalité (2). Notons que  $\bar{U}$  peut être vu comme un vecteur de commande *étendu* qui contient, d'une part, les variables de commande initiales  $u_1$  et  $u_2$  et, d'autre part, les dérivées

temporelles des composantes du vecteur  $\alpha$ .

Au vu de la relation (5), il est simple de vérifier que l'utilisation de la loi de commande :

$$\bar{U}(x, \alpha, t) = H_{f_\epsilon}^{-1}(\alpha) [\exp(Ax_1) (K + b_{0,1}(x, t)A) \exp(-Ax_1)(x - f_\epsilon(\alpha)) - b_0(x, t)] , \quad (6)$$

avec  $K$  désignant une matrice stable arbitraire, conduit à l'équation en boucle fermée suivante :

$$\dot{z} = Kz . \quad (7)$$

Cette loi de commande permet donc de stabiliser  $z = 0$  exponentiellement, cela quelles que soient les conditions initiales  $x(0)$  et  $\alpha(0)$ .

#### 6.1.4 Application à la commande de véhicules non-holonômes et à la planification de trajectoires

La solution du problème de stabilisation pratique présentée dans la sous-section précédente permet –théoriquement– à un robot non-holonôme de type chariot (c'est à dire actionné par deux roues motrices indépendantes montées sur un essieu commun) de "poursuivre" automatiquement avec une précision arbitrairement grande, simultanément en position et orientation, un véhicule de référence se déplaçant sur un plan sans aucune contrainte cinématique. Par rapport aux solutions de commande proposées et publiées par ailleurs, l'originalité de notre solution peut se résumer en trois points : i) il n'est pas imposé que la trajectoire du véhicule de référence soit réalisable par le robot, ii) il n'est pas nécessaire de commuter entre plusieurs lois de commande selon que le véhicule de référence se déplace ou reste immobile, et iii) la précision du suivi, bien que non infinie, est aisément réglable (via le choix de la fonction  $f_\epsilon$ ) et uniformément garantie pour tout mouvement du véhicule de référence.

Notre approche repose sur le fait que l'on peut exprimer –grâce à un système de coordonnées adéquat– les équations caractérisant l'évolution de la différence de position entre les deux véhicules sous la forme chaînée perturbée (3). Il ne reste alors plus qu'à appliquer directement les résultats décrits dans la sous-section précédente pour obtenir une loi de commande réalisant les objectifs annoncés.

Il est montré dans [16] que la même démarche s'étend sans difficulté au cas où le robot est de type voiture (avec roue directrice). Dans ce cas, nous arrivons à un système chaîné perturbé de dimension quatre, au lieu de trois. Plus généralement, la méthode est directement transposable à tout système de remorques avec points d'attache situés sur l'essieu du véhicule qui précède. Le cas de points d'attache déportés est plus difficile et pourra être l'objet d'études ultérieures.

## 6.2 Perception et navigation

**Participants :** Patrick Rives, 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 et cartographie, capteur de vision et de télémétrie, coopération multisensorielle.

**Résumé :** *Nous avons poursuivi cette année nos travaux sur la navigation sûre d'un robot mobile dans un environnement inconnu mais structuré. Cette thématique comprend deux volets : i) l'acquisition des modèles de l'environnement nécessaires à la navigation du robot, ii) la génération et l'exécution de déplacements sûrs. Il est maintenant communément admis qu'un robot mobile ne peut effectuer, sans risque de dérive important, des déplacements en se basant uniquement sur les données fournies par ses capteurs d'estime (odomètres, centrale inertielle). Il est donc crucial de pouvoir borner cette dérive en utilisant les informations sur l'environnement fournis par des capteurs extéroceptifs. Deux approches complémentaires sont étudiées au sein du projet : i) utiliser ces informations pour se re-localiser et corriger l'estimée fournie par l'odométrie, ii) utiliser directement ces informations dans des schémas de commande référencée capteur pour contraindre le robot à se déplacer sur une trajectoire libre d'obstacle, caractéristique de la géométrie de l'environnement et reproductible lors d'une mission ultérieure.*

### 6.2.1 Perception pour la cartographie et la localisation d'un robot mobile

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 construire de manière incrémentale une représentation de l'environnement et, de façon simultanée, maintenir une estimée de la position du robot à l'intérieur de celle-ci. La difficulté du problème réside dans le fait que la localisation à l'instant courant  $k$  va devoir être réalisée à partir des éléments de l'environnement découverts et reconstruits dans les  $N$  perceptions précédentes et qui restent visibles à l'instant  $k$ . Bien entendu, la précision de la localisation est d'autant plus grande que l'étape de reconstruction est fiable. De façon duale, les nouveaux éléments de l'environnement découverts à l'instant  $k$  sont recalés dans le repère initial à  $k = 0$  en utilisant la localisation estimée à l'instant  $k$ . Une analyse simple de la méthode montre qu'elle est d'autant plus précise que les éléments de l'environnement (amers naturels) restent dans le champ de perception longtemps. Il y aura donc à gérer un équilibre entre la fonction d'*exploration* (ie. découvrir le maximum d'éléments inconnus de l'environnement) et la fonction *localisation* (ie. garder le maximum d'amers connus au cours du déplacement).

Dans le cas de scènes d'intérieur relativement structurées, l'utilisation de données télémétriques pour corriger l'estimation fournie par l'odométrie, est désormais classique. L'année dernière, nous avons montré les limites à l'utilisation des télémètres à ultrasons malgré l'utilisation de techniques sophistiquées de filtrage et de rejet des mesures aberrantes [7]. En dépit d'un certain nombre d'avantages (faible coût, simplicité de mise en œuvre...), ils se révèlent peu adaptés à des tâches de localisation, principalement du fait de leur faible portée. Leur intérêt en robotique mobile reste cependant important dans le domaine de la détection et de l'évitement d'obstacles, où leur champ large de perception permet de définir un volume de protection autour du robot. Nous utilisons donc maintenant un télémètre laser à balayage qui, en nous fournissant des mesures denses et précises (2000 points pour un balayage panoramique de 360 degrés et environ 1cm de résolution sur 10 mètres de portée), nous permet de construire une carte globale cohérente de l'environnement tout en acceptant des déplacements importants du robot entre deux étapes d'acquisition et de traitement des mesures qui demeurent coûteuses

en temps calcul. La cartographie incrémentale de l'environnement et la localisation du robot à l'instant courant sont réalisées dans un cadre probabiliste permettant de prendre en compte les erreurs de modèle du robot et les bruits de mesures des capteurs. Divers modèles ont été testés, dont l'un prenant en compte la corrélation entre la localisation du robot et la mise à jour de la carte globale. Les résultats ont montré que le faible gain obtenu dans la précision ne compensait pas la complexité et la lourdeur des calculs qu'entraînait la prise en compte de modèles de bruits corrélés.

### 6.2.2 Planification de déplacements et navigation sûre

La méthode présentée dans la section précédente permet de cartographier l'environnement et de localiser le robot tout au long de son déplacement. Pour qu'elle soit exploitable dans la pratique, il faut être capable de planifier des trajectoires dans l'espace libre permettant d'explorer l'environnement inconnu puis, par le biais d'une commande, de réguler le déplacement du robot le long de cette trajectoire. Une approche classique consiste à utiliser la représentation de la carte courante pour planifier une trajectoire géométrique, puis suivre cette trajectoire au moyen d'une commande définie dans l'espace cartésien utilisant, par exemple, un retour odométrique. À cause de l'imprécision dans l'estimation de la carte et à la dérive odométrique, cette approche est limitée à de petits déplacements et ne peut en aucun cas être considérée comme une technique de navigation sûre du fait qu'elle est en boucle ouverte vis à vis de l'environnement. En s'appuyant sur nos travaux antérieurs dans le domaine de la commande référencée capteur [8],[6], nous développons une méthodologie permettant à un robot mobile d'explorer une scène inconnue a priori et d'en construire une représentation *complète* tout en garantissant une navigation sûre du robot au sein de cet environnement.

Nous considérons un robot mobile évoluant dans une scène planaire et statique composée d'objets inconnus. Nous supposons cette scène bornée par un ensemble d'objets appelés *frontières*. L'objectif est de se déplacer dans cette scène et d'en construire une représentation partielle ou complète. Une première étude a porté sur l'existence et la caractérisation d'un ensemble minimal de trajectoires permettant l'observation et la reconstruction complète d'une scène polygonale bornée. Afin d'être compatible avec notre approche, cet ensemble de trajectoires doit posséder les propriétés suivantes :

- pouvoir être construit localement durant le déplacement du robot,
- permettre de se déplacer localement de façon sûre dans l'espace libre au moyen de commandes référencées capteurs,
- représenter la topologie de la scène globale en termes de lieux et d'accessibilité (prenant éventuellement en compte la taille du robot),
- être unique pour un environnement statique donné.

Parmi les représentations possédant de telles propriétés, nous avons choisi d'utiliser le diagramme de Voronoï (appelé aussi squelette ou axe médian) qui peut être défini comme le lieu des centres des disques de rayon minimal tangents aux obstacles. L'ensemble des trajectoires est décrit par un graphe dont les arêtes correspondent au lieu du centre des disques de rayon minimal ayant deux points de tangence avec les obstacles; les nœuds ou *points de bifurcation*

correspondent aux centres des disques ayant plus de deux points de tangence. Cette représentation se révèle particulièrement adaptée à la navigation des robots mobiles. Par exemple, si l'on calcule une restriction du diagramme de Voronoï aux centres des disques de rayon supérieur au rayon correspondant au disque d'occupation du robot supposé non ponctuel, on obtient une partition de sous-graphes non connexes représentant les domaines d'accessibilité du robot. Cette représentation est également très adaptée à la construction incrémentale d'une carte de l'environnement, puisque les points de bifurcation représentent des changements dans la topologie de la scène (apparition de nouveaux *aspects*). Cette propriété sera utilisée dans notre méthodologie pour réaliser les étapes d'estimation et de mise à jour de la représentation de l'environnement uniquement lorsque le robot se trouvera sur un point de bifurcation [20].

Partant de cette représentation, il est possible de définir deux actions élémentaires permettant au robot de se déplacer dans son environnement : i) parcourir une arête, ii) se positionner sur un nœud. Ces deux actions élémentaires ont été implémentées en appliquant le formalisme de la commande référencée capteur au télémètre laser à balayage dont nous avons équipé notre robot. Il convient de noter que ces actions sont exprimées en termes de régulation et ne nécessitent aucun calcul explicite du diagramme de Voronoï [19]. 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. Dans le cas d'une tâche d'exploration, une méthode de retour arrière a été implémentée afin d'explorer les arêtes du graphe dans leur totalité et obtenir une représentation complète de la scène. Le travail réalisé cette année a consisté à robustifier les schémas de commande référencée laser au niveau de l'extraction des signaux constituant le feedback. Pour ce faire, nous avons développé une méthode originale de transformée de Hough probabiliste associée un estimateur Bayésien du maximum de probabilité a posteriori. Cette méthode permet de rejeter de façon efficace les mesures aberrantes et de gérer les situations critiques où le faisceau laser présente un angle d'incidence élevé avec les objets de la scène. La figure (1) montre la carte globale de notre salle d'expérimentation estimée par le robot au cours de son déplacement. Précisons qu'aucune trajectoire de référence ni aucun modèle de la salle n'ont été fournis au robot durant sa mission d'exploration.

Les résultats expérimentaux montrent que la topologie complète de la scène ainsi que la contrainte de rigidité de l'environnement sont préservées dans la carte globale reconstruite.

### 6.3 Vision active

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

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

#### 6.3.1 Asservissement visuel pour la navigation des robots mobiles

L'asservissement visuel est un des thèmes de recherche privilégié du projet Icare depuis de nombreuses années. Dans son principe, il s'agit d'exprimer l'objectif de contrôle en terme de régulation à zéro d'une fonction d'erreur définie entre l'image courante et une certaine image désirée. Cette spécification de la tâche en terme d'image à atteindre est naturelle pour la plupart



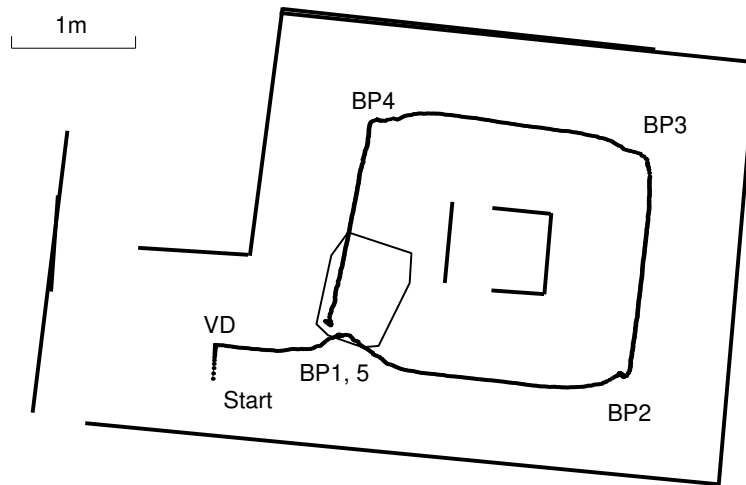


FIG. 1 – *Navigation réactive et exploration de scène*

des applications de robotique manufacturière où l'on cherche à se positionner ou à manipuler des objets dont on possède un modèle. Elle l'est, par contre, beaucoup moins pour des applications de robotique mobile telle que la navigation dans un environnement naturel inconnu. Dans ce cas, il est plus naturel de spécifier la tâche en terme de déplacement dans l'espace cartésien dans lequel évolue le robot. Classiquement, la commande est alors également exprimée dans l'espace cartésien par une boucle de régulation entre une position désirée et la position courante estimée obtenue soit par le biais de capteurs proprioceptifs (odométrie, plateforme inertielle..) sujets à dérive, soit par un processus de reconstruction 3D et de localisation utilisant la stéréovision. Dans les deux cas, les estimées obtenues sont peu fiables dans le temps et nécessitent une réactualisation fréquente et le plus souvent coûteuse en calcul. L'approche originale que nous développons consiste à exprimer le problème de régulation spécifié dans l'espace cartésien en un problème de régulation dans l'image sous les hypothèses suivantes :

- on ne dispose d'aucune connaissance *a priori* sur l'environnement 3D, ni de connaissance *a priori* sur l'image correspondant à la position finale désirée,
- il existe au moins 5 points dans l'image correspondant à la position initiale de la caméra qui seront visibles dans l'image correspondant à la position finale désirée. On dispose d'un algorithme permettant de suivre ces points dans la séquence d'images durant le déplacement de la caméra.

Sous ces hypothèses, nous avons montré qu'il était possible d'exprimer l'objectif de commande en terme de régulation d'une fonction définie directement dans l'espace projectif associé à l'image [18]. Un minimum de 5 points est alors nécessaire pour contrôler les rotations et la direction de translation de la caméra (du fait que l'on travaille dans l'espace projectif, les translations sont définies à un facteur d'échelle près). Ce travail s'est inscrit dans le cadre de l'ARC AVEC (Asservissement Visuel en Environnement Complexe) et a été validé sur la plateforme expérimentale du projet VISTA du centre INRIA de Rennes. La figure 2 montre les

images pour la position initiale et après convergence, la convergence exponentielle de l'erreur et l'évolution de la commande.

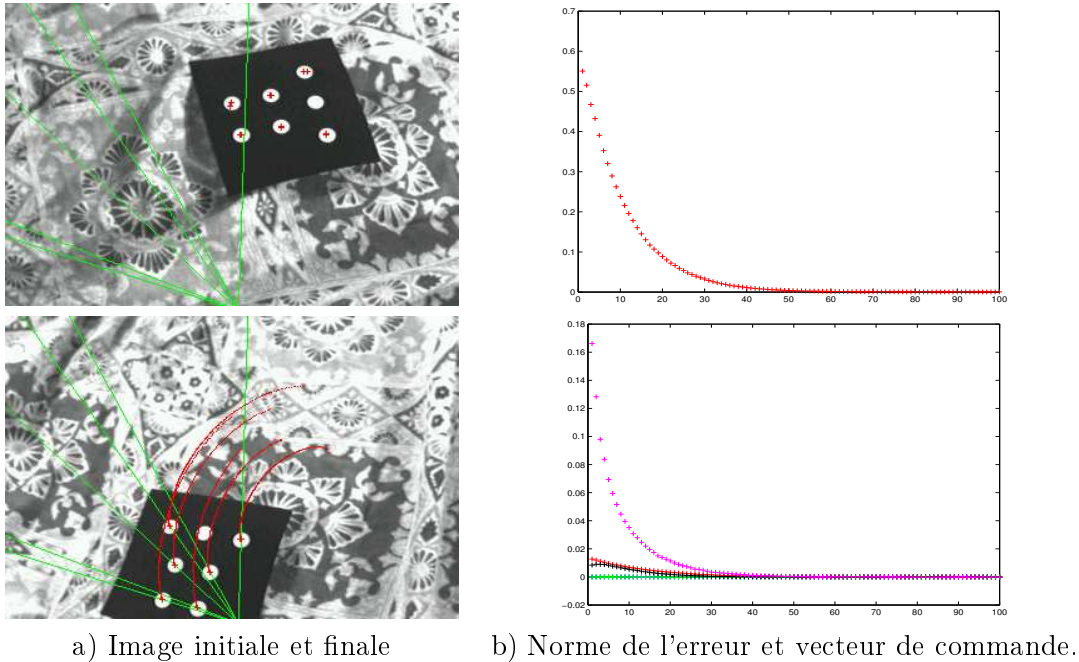


FIG. 2 –

### 6.3.2 Métrologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins

S'il est possible, en vision par ordinateur, de traiter des scènes naturelles structurées (comme une scène intérieure de bureaux), l'environnement naturel est, quant à lui, plus délicat à observer et traiter. Notre problématique est la suivante : comment faire, à l'aide d'une seule caméra non calibrée, pour extraire d'une part des informations caractérisant la scène et, d'autre part, pour que celles-ci soient robustes et stables ? Nous avons décidé de nous pencher sur ces deux problèmes dans le cas d'images naturelles complexes non structurées (ie : pas de formes géométriques simples, telles des coins ou des droites) et plus particulièrement pour les images sous-marines.

Après différentes études sur des algorithmes de traitement bas-niveau, nous avons opté pour le détecteur de points de Harris. Afin d'optimiser la détection de ces points, nous avons construit pour chaque image, une pyramide d'images, par un processus de lissage et de sous-échantillonnage. Le détecteur de Harris est donc utilisé à chaque niveau de la pyramide. Il en résulte un ensemble de points pour chaque niveau. Les points les plus robustes sont ceux détectés au niveau le plus élevé de la pyramide. En effet, les lissages successifs détériorent le signal. En contre-partie, ils permettent de préserver les fortes variations d'intensité dans l'image et, par suite, de conserver les points "forts" tout au long de la pyramide. Néanmoins, leur localisation dans la pyramide est elle aussi détériorée. C'est donc le processus d'appariement

des points dans la pyramide qui permet de suivre les points robustes en remontant jusqu'à l'image de départ et, par la-même, d'assurer une bonne localisation de ceux-ci.

Les figures 3(a), 3(b) et 3(c) montrent un exemple d'extraction de points robustes grâce à l'appariement pyramidal. On le voit, notre approche permet de discerner les points en différentes classes de confiance, chose qui n'est pas possible dans l'approche classique.

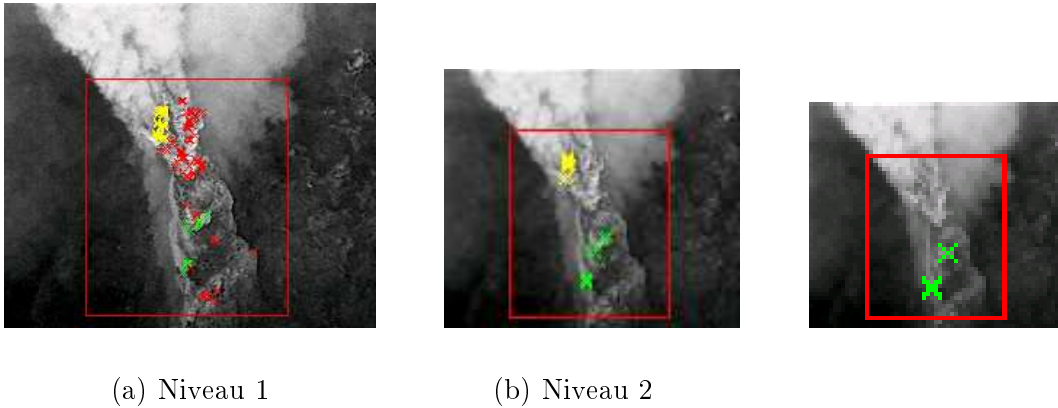


FIG. 3 – Points appariés avec l'algorithme pyramidal

L'approche décrite ci-dessus ne contient que des informations locales et n'utilise pas le fait que les objets de la scène sont rigides. Pour prendre en compte cet aspect, nous introduisons une triangulation de Delaunay dont les nœuds sont les points extraits précédemment. Cette représentation est alors une expression de la rigidité de l'objet observé. Nous espérons ainsi, grâce à cette structure, être capable d'aider à la mise en correspondance entre images et aussi aider à calculer le mouvement rigide de la caméra entre deux images en étudiant la déformation du graphe de Delaunay.

Dans l'optique d'une reconstruction projective 3d de la scène à partir des points extraits nous devons, dans un premier temps, appairier ces points et, dans un second temps, calculer la matrice fondamentale. Or, on le sait, ce calcul est très instable et d'autant plus délicat qu'il y a de mauvais appariements ("outliers"). De nombreuses méthodes d'appariement sont testées. En raison de notre classification en points robustes ou non, nous obtenons un nombre de points appariés plus faible. Cependant, l'appariement obtenu est de meilleure qualité que si le calcul avait été effectué avec tous les points de l'image. Il en résulte aussi un calcul de matrice fondamentale plus précis et plus stable. Ceci est déterminant pour la qualité de reconstruction de la scène. Les premiers résultats que nous avons obtenus pour cette étape du processus global de traitement sont encourageants.

L'ensemble des algorithmes a été implémenté dans notre outil de développement *VPI: Vision Prototyping Interface*. VPI est un logiciel de manipulation/traîtement de séquences de vues pouvant comporter jusqu'à trois images (provenant éventuellement de capteurs différents). Il est possible d'associer à chaque image une pyramide d'images obtenues par filtrage et sous-échantillonnage. Il est également possible de manipuler des régions dans chaque image, la cohérence des régions dans les pyramides étant assurée. Pour chaque région d'intérêt, il est possible de définir un filtre (réponse impulsionnelle finie ou infinie) et également un détecteur

de points paramétrable (Harris, Susan, CSS). Il est également possible d'associer à chaque région un code utilisateur qui peut utiliser les informations associées aux différentes régions (listes de points détectés par exemple pour chaque région des pyramides).

## 6.4 Moyens Expérimentaux

**Participant** : Jean-Jacques Borrelly.

### 6.4.1 Laboratoire de robotique

Le laboratoire de robotique met à disposition des utilisateurs du projet ICARE trois plateformes expérimentales. Chacune de ces plateformes (éventuellement multi-processeurs) fonctionne sous un système opératoire temps-réel (VxWorks). Tous les noyaux temps-réel correspondants possèdent l'option multi-processeurs (VxMP) et l'option d'analyse temps-réel (wind-View). Ces plateformes sont interconnectées entre elles et reliées au réseau général par ETHER-NET.

#### – *Le CyCab*

Nous disposons d'un véhicule électrique CyCab permettant de réaliser diverses expérimentations en extérieur. La partie informatique du système est construite autour du bus CAN et comporte deux microcontrôleurs (MPC555) assurant le contrôle en vitesse des roues ainsi que la direction de chaque train de roues. Le contrôle actuel du véhicule est réalisé par un joystick et permet de piloter le véhicule dans trois modes différents selon l'utilisation que l'on fait du mécanisme de direction des roues arrière. Un rack capteur embarqué est actuellement en cours de réalisation. Ce rack comportera (dans un premier temps) un système de vision stéréoscopique (IMAGING TECHNOLOGY) et une interface vers le bus CAN basé sur un module Industry-Pack et la carte porteuse associée.

#### – *Plateforme mobile avec système de perception*

Cette plateforme 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 ultrasonores, 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 projet ICARE a fait l'acquisition d'un télémètre laser ACCURANGE-4000 dont la portée est de l'ordre d'une quinzaine de mètres et possédant 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. Le système d'origine peut être connecté à un PC grâce

à une interface sur le bus ISA. L'utilisation embarquée du télémètre sur le robot mobile nous a conduit à développer les éléments suivants :

- *Asservissement de position/vitesse du moteur*  
Cet asservissement a été réalisé à partir d'un module TIP102 identique à ceux utilisés pour la base mobile et le bras.
- *Module logiciel de paramétrisation du télémètre*  
Ce module permet de définir différents paramètres de fonctionnement du télémètre (fréquence de mesure, distances minimum/maximum...) et d'obtenir la mesure courante via une connexion par liaison série.
- *Module de mesure rapide*  
Un module matériel (type Industry-Pack) pour la mesure rapide des informations laser a été développé. Ce module permet d'effectuer l'acquisition des données télémétriques à une cadence maximum de 50 KHz en synchronisation avec les informations délivrées par le codeur optique associé au moteur de balayage. Il est possible d'effectuer des mesures à une cadence moins élevée pour obtenir une meilleure résolution.

#### 6.4.2 Simparc

**Participant :** Jean-Jacques Borrelly.

Le simulateur SIMPARC permet de simuler aussi bien l'évolution dynamique du système (robot manipulateur ou mobile) que l'architecture de contrôle, y compris en prenant en compte des notions de temps de calcul ou d'interruption. Les principaux éléments pris en compte par SIMPARC sont :

- la description de l'architecture système sous forme de composants interconnectés grâce à une interface graphique,
- la description du modèle dynamique du système commande sous forme d'équations différentielles ordinaires,
- les éléments de base d'un OS temps-réel (multi-tâche, files de messages, sémaphores) en version mono ou multi-processeurs,
- des composants de type capteur (image, ultra-sons),
- la description de l'environnement sous formes de segments/facettes.

Actuellement SIMPARC fonctionne sur SUN (sunOS5), DEC ALPHA (osf1) et PC (linux). La couche "run time" propre à ORCCAD [1] a été écrite en utilisant les possibilités de SIMPARCOS.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 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.*

## 7.2 Action Sagem SA

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

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

Un contrat de recherche sur une durée de deux ans a été mis en place au début de l'année avec la société Sagem SA, en collaboration avec le projet Sosso de l'INRIA Rocquencourt. Hellal Benzaoui a été recruté sur un poste de post-doctorat pour travailler sur ce contrat. 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 came qui assure traditionnellement cette fonction. L'étude qui nous a été confiée concerne la modélisation et la commande de ce système. La première partie de l'étude (partie théorique) a été réalisée [22]. La deuxième partie, qui correspond à la validation sur le système réel, est actuellement en cours. Les difficultés de cette étude tiennent principalement à deux aspects : i) des non-linéarités importantes du système autour du point de fonctionnement qui nous intéresse, ii) des mesures partielles et fortement bruitées de l'état du système.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions régionales

#### 8.1.1 Groupement Robotique Sud Méditerranée

**Participant :** Patrick Rives.

Ce groupement constitué d'industriels de la robotique et de laboratoires publics a pour vocation de fédérer la recherche, le développement et le transfert industriel. Il est soutenu par le Conseil Général du Var et le Conseil Régional PACA. Cette année, un système de localisation à base courte a été financé par la région PACA et mis en œuvre dans le centre Ifremer de Toulon ; ce système est mis à la disposition des membres du groupement ainsi que des moyens expérimentaux gérés par l'Ifremer. Ce groupement a également vocation d'aider à la constitution de projets en mettant en relation industriels et partenaires publics et en soutenant leurs demandes de financement auprès des institutions régionales et européennes.

### 8.2 Actions nationales

#### 8.2.1 GDR Automatique

**Participants :** Claude Samson, Pascal Morin, David Lizárraga-Navarro.

C. Samson est membre du Conseil de Direction du GDR Automatique et responsable du suivi de deux projets/groupes de travail soutenus par le GDR.

### 8.2.2 GDR Isis

**Participant** : Patrick Rives.

P. Rives est membre du *GT: Fusion de données pour les véhicules intelligents*. À ce titre, il a présenté les résultats obtenus dans le contexte de la navigation des robots mobiles.

### 8.2.3 Action CyCab

**Participants** : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly.

P. Rives et J.J. Borrelly sont les coordinateurs pour l'UR de Sophia Antipolis de l'action nationale de l'INRIA autour du CyCab.

### 8.2.4 ARC AVEC

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

Une action de recherche coopérative entre les projets Vista de Rennes, Movi et Bip de Grenoble et le projet Icare sur le thème de l'asservissement visuel est actuellement en cours (voir <http://www.irisa.fr/AVEC>). Un séminaire scientifique a été organisé le 13 et 14 Juin à Rennes. Ce séjour nous a permis d'implémenter et de valider notre algorithme d'asservissement visuel basé sur la géométrie projective sur la cellule expérimentale de l'IRISA. François-Xavier Espiau a également présenté ses travaux sur la reconstructions 3D d'images naturelles.

### 8.2.5 Divers

- C. Samson était membre des Comités Scientifiques de la conférence nationale CIFA 2000, Lille 5-8 juillet, et du Workshop IFAC "Lagrangian and Hamiltonian Methods for Non-linear Control", Princeton University 16-18 mars.
- C. Samson est membre du Comité de Lecture de la Collection «Mathématiques et Applications» de la SMAI (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles).

## 8.3 Actions européennes

### 8.3.1 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 une semaine dans le projet fin août. Cette action est complétée par une coopération avec le CTI de Campinas (Brésil) sur un thème identique.

### 8.3.2 Divers

- C. Samson était membre du Conseil administratif de l'EUCA (European Union Control Association), jusqu'en août 2000.

## 8.4 Actions internationales

### 8.4.1 Collaboration INRIA/CNPq

Dans le cadre de cette collaboration (voir aussi *Collaboration INRIA/ICCTI*), Patrick Rives fera un séjour de 15 jours au Laboratoire de Vision et de Robotique du CTI de Campinas en décembre. Durant ce séjour, il est prévu de transférer les algorithmes d'asservissement visuel validés en simulation sur le dirigeable du CTI et de les valider en grandeur réelle. Un chercheur du CTI a été accueilli par le projet Icare durant 15 jours en décembre 1999. Sa visite s'est concrétisée par l'écriture d'un article commun présenté à IEEE Conference on Control Applications (CCA2000) en septembre 2000 [13].

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 Animation de la Communauté scientifique

P. Rives est membre du comité de programme des 2<sup>ièmes</sup> *Journées Nationales de la Recherche en Robotique* qui se sont tenues à Montpellier en septembre 1999. Il sera l'organisateur de la prochaine édition de ces journées qui se tiendra en octobre 2001 à Sophia Antipolis.

### 9.2 Participation à des colloques

- Les membres du projet ont présenté leurs travaux dans les conférences suivantes :
  - 12<sup>ième</sup> JJCR Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, Bourges, février 2000,
  - 13<sup>ième</sup> JJCR Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, Rennes, septembre 2000,
  - ARC AVEC sur l'asservissement visuel, Rennes, juin 2000,
  - American Control Conference 2000, Chicago, 28-30 juin 2000,
  - 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, 12-15 décembre 2000,
  - IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS2000, Takamatsu, Japon, 1-3 novembre 2000.

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

- P. Rives est membre du Comité des Bourses 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 représente l'Inria aux comités directeur et scientifique du Groupement Robotique Sud-Méditerranée.

### 9.4 Formation par la recherche

- *Thèses soutenues* :
  - D. A. Lizárraga-Navarro, « Contributions à la stabilisation de systèmes non-linéaires et à la commande de véhicules sur roues », université de Grenoble (INPG), soutenue le 25 avril 2000, responsables scientifiques : C. Samson et P. Morin.



- *Thèses en cours* :
  - F.X. Espiau, « Métrologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins », université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives,
  - A. C. Victorino, « Commande référencée capteur pour des robots mobiles hybrides non-holonômes/ holonômes », université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives.
- *Participation à des jurys de thèse* :
  - P. Rives a été rapporteur de trois thèses et membre du jury d’habilitation à diriger des recherches de E. Mouaddib, université Jules Verne, Amiens, décembre 1999,
  - C. Samson a été rapporteur et membre des jurys de trois thèses, dont une soutenue à l’Université d’Enschede, Hollande.
- *Stages* :
  - A. Gomes-Cortés, en année doctorale préparatoire de l’École des Mines de Paris, « Poursuite de véhicules sur roues », février-septembre 2000.

## 9.5 Enseignement

- C. Samson et P. Rives sont membres de la 61<sup>e</sup> Commission de Spécialistes de l’Université de Nice - Sophia Antipolis.
- F.X. Espiau a donné 60h de TD à l’IUT Département « Information et Communication » et 14h de Cours de probabilités à l’UNSA Valrose (1<sup>ère</sup> année de Magistère),
- *Vision industrielle*, École Nationale des Télécommunications de Bretagne (P. Rives, 3 heures),
- *Commande de Robots*, INSTITUT SUPÉRIEURE D’INFORMATIQUE ET D’AUTOMATIQUE (ISIA), Sophia-Antipolis, (P. Morin, 12 heures).

## 10 Presentation (english)

This project is dedicated to the study of the problems of command and control in autonomous mechanical systems, with a special but not exclusive focus on robotics. The underlying objectives are, on one hand, to extend the control theory of nonlinear systems by addressing robotics applications and, on the other hand, to confer more autonomy to robotic systems by taking into account interactions with the environment via the use of sensors. Besides theoretical advances, the project considers it important to experiment and validate its results on realistic benchmarks.

The main research themes of the project are :

- Algorithms and theoretical aspects of control. Extending the theory through handling non-standard problems.
- Acquisition and use of sensory data. Robot autonomy capacity is linked to the utilization of exteroceptive sensors and the use of sensory data in the control loops.
- Validation of theoretical results via simulation and experiments performed on physical systems. To this purpose, the project has an instrumented mobile arm (a manipulator

mounted on a mobile platform) for indoors experiments, and uses an electrical car CyCab, which the research center of Sophia-Antipolis has acquired with the help of the PACA region council, for outdoors experiments.

## 11 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] J.-J. BORRELLY, E. COSTE-MANIÈRE, B. ESPIAU, K. KAPellos, R. PISSARD-GIBOLLET, D. SIMON, N. TURRO, « The ORCCAD architecture », *International Journal of Robotics Research, MIT press 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] 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 », *SIAM Journal of Control and Optimization* 38, 1, 1999, p. 22–49.
- [4] P. MORIN, C. SAMSON, « Time-varying exponential stabilization of a rigid spacecraft with two control torques », *IEEE Transactions on Automatic Control* 42, 1997, p. 528–534.
- [5] P. MORIN, C. SAMSON, « Exponential stabilization of nonlinear driftless systems with robustness to unmodeled dynamics », *Control, Optimization and Calculus of Variation (COCV)*, 1999, p. 1–35.
- [6] 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.
- [7] P. RIVES, J.-L. SEQUEIRA, P. LOURTIE, « Localization and Map Building for a Mobile Robot », *in : ISER99 Int. Symposium in Experimental Robotics*, Sydney, Australia, 27-28 mars 1999.
- [8] C. SAMSON, M. LEBORGNE, B. ESPIAU, *Robot control. The Task Function approach*, *Oxford Engineering Series*, 22, Oxford University Press, 1991.
- [9] 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, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 162, Springer-Verlag, p. 125–151, 1991. C. Canudas de Wit (Ed.).
- [10] C. SAMSON, « Control of chained systems. Application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots », *IEEE Transactions on Automatic Control* 40, 1, 1995, p. 64–77.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [11] D. LIZARRAGA, *Contributions à la stabilisation de systèmes non-linéaires et à la commande de véhicules sur roues*, thèse de doctorat, thèse de l'INPG, avril 2000.

### Articles et chapitres de livre

- [12] P. MORIN, C. SAMSON, « Control of nonlinear chained systems: from the Routh-Hurwitz stability criterion to time-varying exponential stabilizers », *IEEE Trans. on Automatic Control (tech. note)*, 2000, p. 141–145.

**Communications à des congrès, colloques, etc.**

- [13] J. R. H. CARVALHO, P. RIVES, A. SANTA-BARBARA, S. BUENO, « Visual Servo Control for a Class of Mobile Robot », *in: IEEE Int. Conf. on Control Applications*, Anchorage, USA, 25-27 septembre 2000.
- [14] F. ESPIAU, « Extraction de points robustes dans des images naturelles complexes », *in: Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique*, Rennes, France, 28-29 septembre 2000.
- [15] P. MORIN, C. SAMSON, « A characterization of the lie algebra rank condition by transverse periodic functions », *in: IEEE Conf. on Decision and Control*, décembre 2000.
- [16] 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.
- [17] P. MORIN, C. SAMSON, « Robust stabilization of driftless systems with hybrid open-loop/feedback control », *in: American Control Conference*, juillet 2000.
- [18] P. RIVES, « Visual Servoing Based on Epipolar Geometry », *in: IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS2000*, Takamatsu, Japan, 1-3 novembre 2000.
- [19] A. C. VICTORINO, P. RIVES, J. J. BORRELLY, « Localisation d'un Robot Mobile et Cartographie par Télémétrie Laser », *in: Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique*, Bourges, France, 3-4 février 2000.
- [20] 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.

**Rapports de recherche et publications internes**

- [21] P. MORIN, C. SAMSON, « A characterization of the Lie Algebra Rank Condition by transverse periodic functions », *rapport de recherche*, INRIA, 2000, no. 3873. Soumis pour publication.

**Divers**

- [22] C. S. H. BENZAOUÏ, P. MORIN, « Commande d'un actionneur électromagnétique. Partie I: Modélisation et commande du système actionneur », août 2000, rapport de contrat avec SAGEM SA.