

Projet ICARE

Instrumentation, Commande et Architecture des Robots Évolués

Sophia Antipolis

THÈME 4A



*R*apport
*d'**A*ctivité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	4
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	7
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
4	Domaines d'applications	11
4.1	Panorama	11
4.2	Robotique sous-marine	11
4.3	Conduite automatisée	12
4.4	Drônes aériens d'observation	13
5	Logiciels	14
5.1	Simparc	14
5.2	VPI	14
6	Résultats nouveaux	14
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	17
6.1.3	Application à la stabilisation pratique des systèmes sans dérive homogènes et commandables	18
6.1.4	Application à la stabilisation pratique de systèmes sans dérive sur des groupes de Lie	18
6.1.5	Validation expérimentale : stabilisation pratique d'un robot mobile à partir d'images caméra	19
6.2	Perception pour la modélisation	20
6.2.1	Métriologie 3D par vision active	20
6.3	Navigation de robots mobiles	21
6.3.1	Localisation, exploration et cartographie d'un environnement d'intérieur inconnu	23
6.4	Commande référencée vision sans calibration en environnement inconnu	27
6.4.1	Analyse de la stabilité d'une nouvelle classe d'asservissement visuel	28

6.4.2	Asservissement visuel invariant aux paramètres de la caméra	28
6.5	Contrôle d'un dirigeable par asservissement visuel	29
6.6	Moyens Expérimentaux	33
6.6.1	Plate-formes expérimentales (<i>Action de développement VISA</i>)	34
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	34
7.1	Action avec Ifremer	34
7.2	Action Sagem SA	35
7.3	Projet CyberCars	35
8	Actions régionales, nationales et internationales	36
8.1	Actions régionales	36
8.1.1	Groupement Robotique Sud Méditerranée	36
8.1.2	Action de développement VISA	36
8.1.3	Action COLORS Mauve	36
8.2	Actions nationales	37
8.2.1	GDR Automatique	37
8.2.2	GDR Isis	37
8.2.3	Programme ROBEA du CNRS	37
8.3	Actions européennes	37
8.3.1	Collaboration INRIA/ICCTI	37
8.4	Actions internationales	37
8.4.1	Collaboration INRIA/CNPq	37
9	Diffusion de résultats	38
9.1	Animation de la Communauté scientifique	38
9.2	Participation à des colloques	38
9.3	Participation à des activités d'intérêt collectif	38
9.4	Formation par la recherche	38
9.5	Enseignement	39
10	Bibliographie	39

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Claude Samson [DR]

Responsable permanent

Patrick Rives [DR]

Assistante de projet

Agnès Clément-Bessières [TR jusqu'au 01/10/2001]

Patricia Maleyran [TR à partir du 01/10/2001]

Personnel INRIA

Pascal Morin [CR]

Ezio Malis [CR]

Jean-Jacques Borrelly [IR]

Chercheurs doctorants

François-Xavier Espiau [boursier IFREMER jusqu'au 31/12/01]

Alessandro Corrêa-Victorino [boursier CAPES]

Guillaume Artus [boursier INRIA à partir du 01/10/2001]

Nicolas Simond [boursier INRIA à partir du 01/10/2001]

Chercheur post-doctorant

Hellal Benzaoui [boursier INRIA jusqu'au 31/3/01]

Stagiaire

Damien Chastan [Stage de DEA, fin d'études ISTG Grenoble]

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 second semestre 2000, nous permettra dans les prochaines années de mener des expérimentations en environnement extérieur. Les activités sur ce véhicule refléteront notre participation au programme européen CYBERCARS, et elles s'inscrivent dans le cadre de l'axe prioritaire *transports* de l'INRIA. Nous essayons en parallèle de développer d'autres moyens expérimentaux dans le cadre de partenariats, avec l'IFREMER pour ce qui touche à la robotique sous-marine, ainsi

qu'avec l'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, Guillaume Artus.

Mots clés : système holonome, 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), BIP, et SHARP, en particulier.

3.2 Commande des systèmes non-linéaires

Participants : Claude Samson, Pascal Morin, Guillaume Artus.

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.

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

[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.

non-linéaires par *retour d'état continu instationnaire* et, plus récemment encore, d'une nouvelle approche de *stabilisation pratique* des systèmes "fortement" non-linéaires [MS00]

3.3 Perception pour la modélisation

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

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

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 consistera à passer de la mesure brute fournie par les capteurs au modèle nécessaire à l'exécution de la tâche. L'éventail des problèmes de perception en robotique est très large, avec deux types de problèmes que l'on peut qualifier de canoniques :*

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

3.3.1 Modélisation géométrique

Historiquement, le problème de la modélisation géométrique est lié à la manipulation d'objets par des robots industriels à poste fixe. Il s'agissait alors de reconstruire des objets géométriques de forme relativement simple, dont on possédait souvent un modèle et qui se trouvaient

[MS00] 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.

dans un volume de travail limité en dimension. Les approches étaient le plus souvent pilotées par les modèles de façon à exploiter, au mieux, la connaissance a priori sur l'application. L'essor de la robotique mobile a fait apparaître de nouvelles problématiques du fait que :

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

Dans ces conditions, les approches pilotées par le modèle se révèlent le plus souvent inefficaces. Il est donc important de formaliser des méthodes de reconstruction robustes s'appuyant au maximum sur les données en ne conservant de l'aspect modèle que des propriétés élémentaires telles que, par exemple, la contrainte de rigidité globale. Le succès de ces méthodes dépendra fortement de la qualité des algorithmes d'extraction des mesures.

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

3.3.2 Reconnaissance de structures connues

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

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

3.4 Navigation de robots mobiles

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

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

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 [14], [15], [Gha01]. Il se décline en de nombreuses variantes suivant la connaissance a priori dont on dispose : d'une connaissance complète permettant la planification hors-ligne de la tâche jusqu'à une absence totale de connaissance nécessitant une acquisition en ligne du modèle durant une phase d'exploration. On a coutume de distinguer différentes problématiques en fonction du but de la perception : i) percevoir pour planifier un déplacement, ii) percevoir pour se localiser. Dans le premier cas, on fera une distinction supplémentaire entre la construction de *modèles géométriques* destinés à la planification de *trajectoires cartésiennes* admissibles de l'espace libre et la construction de *modèles topologiques* destinés à la planification de couloirs de navigation (*chemins*) et permettant de représenter l'accessibilité entre les différentes régions (*lieux*) constituant l'environnement. Pour ce qui est des modèles géométriques, ils seront fréquemment réduits, dans le cas d'environnements d'intérieurs, à une représentation polygonale des obstacles obtenue grâce à un balayage horizontal d'un télémètre

[Gha01] M. GHALLAB, « Planification et décision », in: *La robotique mobile*, J.-P. Laumond (éditeur), Hermes, 2001.

(laser ou ultrason). Malgré cette apparente simplicité, la construction et la mise à jour de tels modèles demeurent difficiles, notamment au niveau de la gestion des incertitudes lors de la fusion de plusieurs acquisitions durant le déplacement du robot. Les modèles topologiques sont des représentations plus abstraites pouvant être construites par une structuration des modèles géométriques (segmentation en régions connexes définissant des lieux). Leur utilisation ouvre sur une autre problématique qui est la recherche et la reconnaissance des points de passage entre différents lieux (par exemple des portes dans une scène d'intérieur) à l'aide de techniques de reconnaissance des formes.

Dans le cas de la perception dans un but de localisation, la problématique est un peu différente. Il s'agit alors de maintenir une estimée de l'état du robot, (en général, sa position et son orientation) durant son déplacement. Les techniques utilisées sont celles du filtrage. Afin de compenser les dérives introduites par la plupart des capteurs proprioceptifs (odomètres, centrales inertielles...), 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 [11].

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

Un axe de recherche est consacré à l'analyse et la synthèse de lois de commande référencées capteurs. Les formalismes utilisés (fonctions de tâche, liaisons virtuelles) permettent de définir ces lois à tous les niveaux de la spécification jusqu'à l'implémentation effective. En associant à ces lois de commande un comportement logique, il est alors possible de définir des *actions élémentaires référencées capteurs* (par exemple, suivi de mur) pouvant être manipulées au niveau de la planification tout en garantissant une bonne robustesse au niveau de l'exécution. La 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. ICARE est impliqué également dans le projet européen CYBERCARS, sur la thématique des transports de demain.*

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

4.2 Robotique sous-marine

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

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

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, sera soutenue fin 2001.

4.3 Conduite automatisée

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

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

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

L'action Praxitèle, achevée en 1997, a permis de valider un certain nombre de concepts et de concevoir un véhicule électrique, le CyCab, qui a été fabriqué à une dizaine d'exemplaires répartis dans les différentes Unités de Recherches de l'Inria. L'exemplaire disponible sur le site de Sophia, sert 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).

Un second sujet concerne la navigation autonome ou semi-autonome (aide à la conduite) du CyCab à partir d'informations fournies par des capteurs visuels ou télémétriques. Il s'agit là de prendre en compte la problématique d'un véhicule évoluant dans un environnement urbain avec ces aspects spécifiques concernant la localisation, la planification de chemins et leur exécution sous des contraintes dures de sécurité (détection des piétons et des obstacles) et d'environnements structurés mais de grandes dimensions et évolutifs.

4.4 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 l'ITI 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/ITI** a pour objectif de développer un dirigeable d'observation dont le principal domaine d'application envisagé concerne l'étude et la surveillance de l'environnement. Ce dirigeable sera doté de grandes capacités d'autonomie dans toutes les phases classiques de vol (décollage, vol stationnaire, vol de croisière et atterrissage).

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

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

terme être validées sur les engins développés par nos partenaires.

5 Logiciels

5.1 Simparc

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

Participant : Jean-Jacques Borrelly [correspondant].

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

5.2 VPI

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

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

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

6 Résultats nouveaux

6.1 Stabilisation de robots mobiles et de systèmes non-linéaires

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

Mots clés : système non linéaire, stabilisation asymptotique, stabilisation pratique, commande instationnaire, système homogène, groupe de Lie, 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 depuis deux ans 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'elles 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 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* (à 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.* 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.

Le résultat central que nous avons démontré l'année dernière, reliant la *Condition de Rang de l'Algèbre de Lie* pour un ensemble de champs de vecteurs à l'existence de fonctions bornées *transverses* à ces champs de vecteurs, est rappelé dans la sous-section suivante. Les contributions majeures de cette année sont ensuite décrites dans trois autres sous-sections.

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

Un énoncé mathématique de ce résultat est rappelé ci-dessous sous la forme d'un théorème. Les notations utilisées pour l'énoncé du théorème sont les suivantes :

- l'espace tangent à une variété M au point p est noté M_p ,
- étant donné deux variétés M et N , et 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 *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 , est satisfaite pour 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 $f \in \mathcal{C}^\infty(\mathbb{T}^{\bar{n}-m}; \mathcal{U})$ tels que :

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

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 ϵ , 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 : $f_\epsilon \in \mathcal{C}^\infty(\mathbb{T}^{\bar{n}-m}; B_n(0, \epsilon))$ tels que, pour tout $\epsilon > 0$, la Condition de Transversalité suivante est satisfaite :

$$\forall \theta \in \mathbb{T}^{\bar{n}-m}, \quad \text{Rang} \left[H_\epsilon(\theta) \triangleq \begin{pmatrix} b_1(f_\epsilon(\theta)) & \cdots & b_m(f_\epsilon(\theta)) & -\frac{\partial f_\epsilon}{\partial \theta_{m+1}}(\theta) & \cdots & -\frac{\partial f_\epsilon}{\partial \theta_{\bar{n}}}(\theta) \end{pmatrix} \right] = n \quad (2)$$

Signalons que l'énoncé du théorème implique que l'entier \bar{n} est supérieur ou égal à n . Alors que dans la démonstration originale de ce résultat le nombre \bar{n} est égal au nombre d'éléments d'une base de Hall de l'Algèbre de Lie *libre* amputée de tous ses éléments correspondants à des longueurs de crochet de Lie supérieures ou égales au degré de nilpotence d'un ensemble d'approximations homogènes des champs de vecteurs b_1, \dots, b_m , nous avons annoncé dans le rapport d'activité de l'année dernière la possibilité de montrer que ce nombre pouvait être réduit à la dimension de l'Algèbre de Lie de Commande (Control Lie Algebra) générée par ces approximations homogènes. Ce résultat a été démontré cette année en utilisant le cadre de champs de vecteurs invariants sur un groupe de Lie (voir sous-section ultérieure). Ce cadre présente aussi l'avantage de sous-tendre une démonstration plus directe et naturelle du théorème des fonctions transverses, et de conduire à une construction beaucoup plus synthétique d'exemples de telles fonctions f_ϵ .

6.1.3 Application à la stabilisation pratique des systèmes sans dérive homogènes et commandables

Nous nous étions, l'an dernier, concentrés sur l'application du théorème des fonctions transverses au problème de stabilisation *pratique* des systèmes non-linéaires sans dérive dits *chaînés*, utilisés pour modéliser la cinématique de plusieurs types de véhicules sur roues. Ces systèmes forment une sous-classe des systèmes sans dérive homogènes et commandables et une de leur particularité est que leur dimension coïncide avec la dimension de l'Algèbre de Lie engendrée par les champs de commande. En notant $x \in \mathbb{R}^n$ ($n \geq 3$) le vecteur d'état d'un tel système, et $u \in \mathbb{R}^2$ le vecteur de commande, le principe de stabilisation pratique que nous avons proposé reposait sur l'existence d'un changement de coordonnées $z = \phi(x, f_\epsilon(\theta))$ tel que i) $z = 0 \Leftrightarrow x = f_\epsilon(\theta)$, et ii) le long d'une trajectoire quelconque du système

$$\dot{z} = D(x)H_\epsilon(\theta)\bar{u}$$

avec $\bar{u} \triangleq (u^T, \dot{\theta}^T)^T$ le vecteur de commande *augmenté* obtenu en ajoutant les *fréquences* variables $\dot{\theta}_{m+1}, \dots, \dot{\theta}_{\bar{n}}$ aux variables de commande du système chaîné, $D(x)$ une matrice inversible pour tout x , et $H_\epsilon(\theta)$ la matrice définie dans le théorème à partir de la donnée d'une fonction transverse f_ϵ . Nous avons aussi montré que, dans le cas d'un système chaîné, le nombre \bar{n} pouvait être pris égal à n . La matrice $H_\epsilon(\theta)$ est alors carrée inversible pour tout θ . L'équation précédente montre qu'il suffit de considérer un retour d'état préliminaire

$$\bar{u} = H_\epsilon(\theta)^{-1}D(x)^{-1}v$$

pour linéariser la dynamique de z en $\dot{z} = v$. Si K désigne une matrice stable quelconque, on stabilise alors exponentiellement $z = 0$ en posant $v = Kz$.

Nous avons montré cette année que ce principe est généralisable à tout système sans dérive homogène et commandable. Cette généralisation passe par une extension dynamique du système homogène de départ. Le système étendu est lui-même un système sans dérive homogène et commandable, et sa dimension est donnée par le nombre d'éléments dans une base de Hall de l'algèbre de Lie libre dont les "longueurs" (en termes de crochets de Lie itérés) sont inférieures au degré de nilpotence du système homogène initial. La propriété la plus remarquable du système étendu est que sa dimension coïncide avec la dimension de l'algèbre de Lie générée par ses champs de commande —comme dans le cas d'un système chaîné. A partir de ce système étendu, on peut alors, comme dans le cas chaîné, montrer l'existence d'un changement de coordonnées $z = \phi(x, f_\epsilon(\theta))$, et d'un retour d'état préliminaire qui linéarise la dynamique de z . La stabilisation d'un tel système est alors immédiate.

Ce travail a fait l'objet des publications [21, 27].

6.1.4 Application à la stabilisation pratique de systèmes sans dérive sur des groupes de Lie

La notion d'algèbre de Lie est bien connue en Automatique non-linéaire, en particulier à cause de son importance dans l'étude des propriétés de commandabilité. Alors que toute algèbre de Lie de dimension finie est l'algèbre de Lie d'un groupe de Lie, on pourrait s'attendre à ce que la forte structure des groupes de Lie soit plus largement exploitée pour la synthèse

de lois de commande. Nous avons travaillé dans cette direction, en étudiant les systèmes de commande non-linéaires évoluant sur un groupe de Lie. Les deux résultats principaux que nous avons obtenus sont les suivants.

D'une part, ce travail nous a permis de mettre en évidence une forte relation entre la notion de fonction transverse présentée précédemment, et la structure de groupe de Lie. D'un point de vue de la synthèse de commande, ceci a une conséquence importante. Plus précisément, nous avons montré que des fonctions transverses, au sens du Théorème 1, utilisables pour la synthèse de lois de commande pouvaient être définies comme le produit —pour l'opération de groupe— de $\bar{n} - m$ fonctions d'une seule variable ; chacune de ces fonctions étant elle-même exprimée en fonction des champs de vecteurs de commande. On obtient ainsi une expression très explicite de telles fonctions transverses.

Dans une autre partie de ce travail, nous avons cherché à faire le lien entre la notion de groupe de Lie, et la notion —localement générique— de système homogène. Ceci nous a amené à retrouver un résultat un peu ancien de la littérature des EDP montrant comment, par le biais d'une extension dynamique, des champs de vecteurs homogènes peuvent être considérés comme des champs invariants sur un groupe de Lie. Ainsi, tout système homogène peut, à une extension dynamique près, être considéré comme un système sur un groupe de Lie. Ceci permet également de faire le lien avec le résultat présenté dans la section précédente.

Mentionnons finalement qu'un intérêt important de la structure de groupe de Lie, couplée avec la notion de fonction transverse, est qu'elle permet de traiter de la même manière —grâce à la propriété d'invariance des champs de vecteurs— les problèmes de stabilisation pratique d'un point, et celles de stabilisation pratique d'une trajectoire. Ceci est particulièrement intéressant d'un point de vue applicatif, et permet de contourner le problème de commutation entre des lois de commande mentionné en section 6.1.1.

Ce travail a fait l'objet du rapport de recherche [28].

6.1.5 Validation expérimentale : stabilisation pratique d'un robot mobile à partir d'images caméra

Ce travail a fait l'objet du stage de fin d'étude de G. Artus (École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg), et constitue le point de départ de son projet de thèse. Il s'agissait d'évaluer l'approche de commande basée sur les fonctions transverses dans le cas du suivi de cible pour un robot mobile. Le travail a consisté dans un premier temps à faire une étude du choix des gains de commande en simulation, puis à effectuer des premières expérimentations sur la plate-forme mobile ANIS du projet. La position relative du robot par rapport à la cible est obtenue à partir des images de cette dernière, prises par une caméra embarquée sur le robot. L'objectif de commande est de réguler cette position relative autour d'une valeur de référence. Le mouvement de la cible, dans le plan de déplacement du robot, n'est pas contraint. Les premières expérimentations, effectuées pour des vitesses faibles de la cible, ont été conformes à l'objectif de régulation imposé. L'étape suivante consistera à enrichir la loi de commande de base —estimation de la vitesse de la cible, commande référencée vision,...— afin de garantir le suivi pour des vitesses plus élevées de la cible.

6.2 Perception pour la modélisation

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

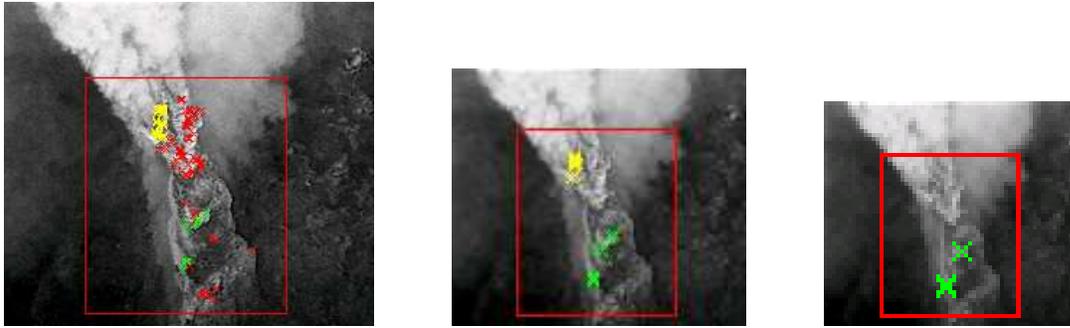
Mots clés : asservissement visuel, vision dynamique, vision active, reconstruction d'objets non structurés, algorithme robuste de vision.

Résumé : *Nous avons poursuivi cette année notre travail sur la modélisation des objets naturels par vision active dans le cadre d'une thèse financée par IFREMER. Les méthodologies développées dépassent largement le cadre de l'application sous-marine et devraient être appliquées notamment à la navigation visuelle de véhicules d'extérieurs. Dans le cas de l'application proposée par IFREMER, nous ne disposons que d'une seule caméra non calibrée dont le mouvement, ainsi que la scène observée, sont inconnus a priori. Le principal élément d'information dont nous disposons est que les objets à observer sont rigides et relativement verticaux (cheminées sous marines, par exemple). Une autre difficulté concerne le filtrage d'objets parasites en mouvement dont les effets perturbateurs tendent à mettre en échec les algorithmes classiques de la vision par ordinateur. Nous avons par le passé étudié diverses approches pour appréhender ces images en vue de faire de la reconstruction de scènes : utilisation de contours, points, méthodes de vision active, modélisation par des équations aux dérivées partielles, ... Dans le cadre de l'asservissement visuel sur des objets naturels, nous souhaitons maintenant apporter des solutions au problème d'implémentation des algorithmes à une cadence proche du temps-réel.*

6.2.1 Métrologie 3D par vision active

Après des études comparatives entre différents détecteurs de points d'intérêt et de coins, notre choix s'est porté sur le détecteur de Harris que nous avons implémenté de manière optimale. Notre approche est basée sur une représentation multi-échelles des images observées. Le détecteur permet, via une pyramide d'images, d'extraire de façon robuste aux bruits des points d'intérêt bien localisés. Nous avons développé une classification, rapide en temps de calcul et suffisante pour nos besoins, des points détectés en utilisant la pyramide. À l'issue de cette étape, nous obtenons des ensembles de points classés en fonction de leur intérêt ou pertinence au sens du signal, mais aussi en fonction de leur classe d'appartenance dans la pyramide. Ce processus permet de trouver les meilleurs points candidats pour effectuer l'appariement entre plusieurs images, comme le montre la Figure 1.

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



(a) Niveau 1

(b) Niveau 2

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

faire du suivi de points d'intérêt, là encore avec succès où d'autres méthodes classiques étaient prises en défaut (cf Figures 2)

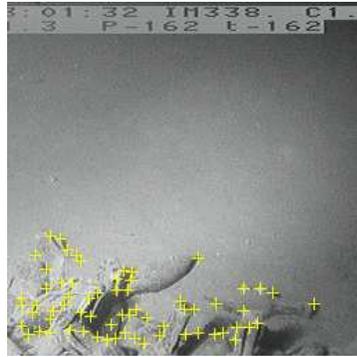
Enfin, pour la reconstruction projective, nous avons utilisé deux méthodes classiques, mais robustes, basées l'une sur l'estimation de la matrice fondamentale, l'autre sur l'ajustement de faisceaux. Les résultats obtenus sont de bonne facture, sans pour autant être toujours exploitables, en raison de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

6.3 Navigation de robots mobiles

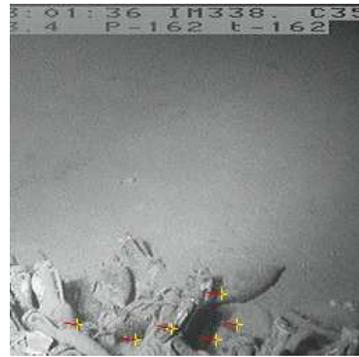
Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Alessandro Corrêa-Victorino.

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

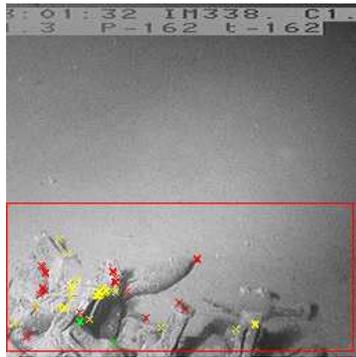
Résumé : *Nous avons poursuivi cette année nos travaux sur la navigation sûre d'un robot mobile dans un environnement inconnu mais structuré. Dans de nombreuses situations, un robot mobile est amené à évoluer dans un environnement dont il ne possède pas la carte a priori. Il faut alors être capable de l'explorer afin d'en construire de manière incrémentale une représentation et, de façon simultanée, maintenir une estimée de la position du robot à l'intérieur de celle-ci. Dans le cas de scènes d'intérieur relativement structurées, l'utilisation de données télémétriques conjointement avec les données odométriques du robot permet la localisation et la cartographie simultanée de la scène. L'année dernière, nous avons présenté les résultats obtenus au moyen d'un télémètre laser à balayage fournissant des mesures denses et précises. La méthode présentée permettait de cartographier l'environnement et de localiser le robot tout au long de son déplacement sous la contrainte de faire évoluer le robot sur une trajectoire définie hors ligne. Cette contrainte est difficilement compatible avec l'exploration d'un environnement inconnu. Cette année, nous avons montré qu'il était possible sans aucune connaissance a priori sur l'envi-*



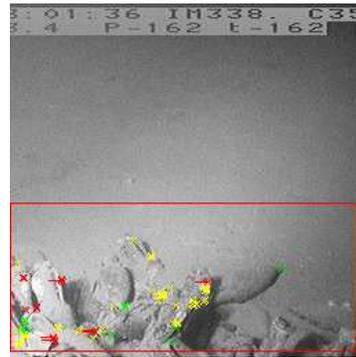
Méthode standard :Première image



Méthode standard :Dernière image



Méthode robuste :Première image



Méthode robuste :Dernière image

FIG. 2 – Comparaison du suivi de points

ronnement et sans calcul de trajectoire, de l'explorer de façon complète uniquement en s'appuyant sur une approche de navigation/commande référencée capteur .

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

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

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

Le diagramme de Voronoï (DV) satisfait de telles propriétés. 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 noeuds 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 est 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 (PB)[11].

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 noeud. Ces deux actions élémentaires ont été implémentées en appliquant le formalisme de la commande référencée capteur au télémètre laser à balayage. Il convient de noter que ces actions sont exprimées en termes de régulation et ne nécessitent aucun calcul explicite du diagramme de Voronoï. La construction de celui-ci est réalisée de manière incrémentale en mémorisant la trajectoire parcourue par le robot et les noeuds du graphe correspondant aux points de bifurcation.

Au cours de cette année des résultats nouveaux ont été obtenus en ce que concerne le traitement des mesures télémétriques, l'extraction du signal utilisée dans la boucle d'asservissement et sur les aspects localisation et cartographie. Ces nouveaux résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

Extraction robuste des signaux télémétriques Le laser délivre une coupe horizontale de l'environnement autour du robot. Ces données bruitées sont filtrées et approximées par un

ensemble de segments qui constitue la représentation de l'environnement local. Cet environnement est décrit par un ensemble de couples $(\delta, \theta)_i$ qui sont les représentations polaires des segments dans le repère laser :

$$I_{min} = \{(\delta, \theta)_0, \dots, (\delta, \theta)_i, \dots, (\delta, \theta)_n\} \quad (3)$$

où δ_i est la distance mesurée avec l'orientation θ_i par rapport à l'axe des abscisses.

Partant de la définition précédente du DV, il est facile de remarquer que contraindre le repère laser à se trouver sur le diagramme peut s'exprimer en termes de contraintes sur cet ensemble I_{min} :

- Si l'origine du repère laser appartient à une branche du DV, alors, il existe deux segments M_i et M_j de l'ensemble I_{min} tel que $\delta_i = \delta_j = \min(\delta_m), m \in 1 \dots n$
- Si l'origine du repère laser appartient à un point de bifurcation (PB) du DV, alors, il existe au moins trois segments M_i, M_j et M_k de l'ensemble I_{min} tel que $\delta_i = \delta_j = \delta_k = \min(\delta_m), m \in 1 \dots n$

Partant de cette remarque, le signal utilisé dans l'asservissement du robot, S_{k+1} , peut être déterminé. Le signal S_{k+1} comprendra : deux distances et deux angles quand le robot est sur une branche, et trois distances et trois angles quand il est dans un PB. Un filtrage temporel permet l'estimation et le suivi de S_{k+1} à partir des estimées à l'instant k . Un exemple de navigation dans notre laboratoire est présenté à la figure (3).

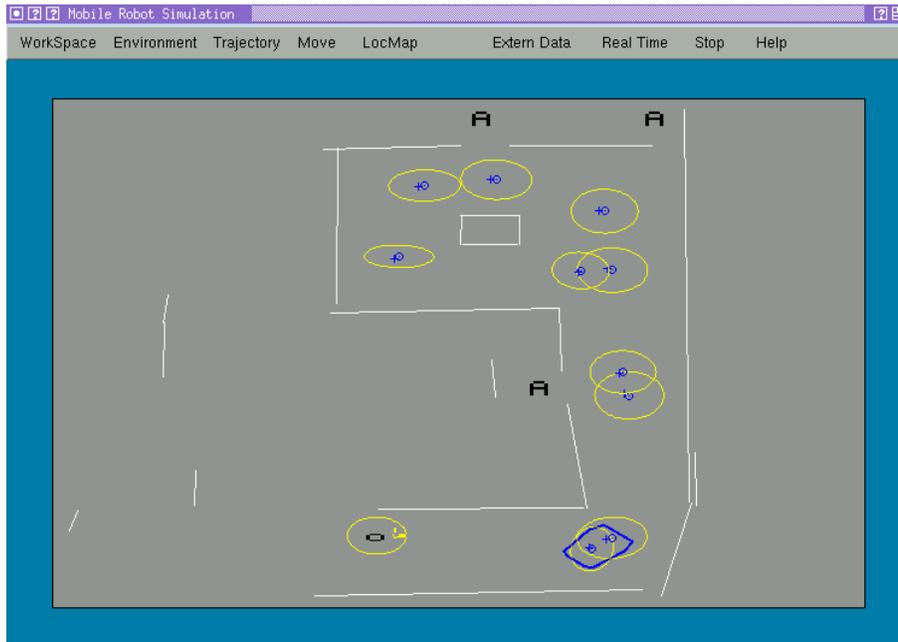


FIG. 3 – Résultat expérimental de la navigation du robot dans la salle robotique.

Le nombre de segments présents dans la coupe laser augmente considérablement quand le robot évolue dans un milieu réel comportant des objets. Il n'est pas forcément souhaitable

dans une tâche de navigation de considérer une représentation exacte du DV mais plutôt de ne conserver que les points de bifurcations ayant une connotation topologique forte : par exemple les PBs correspondant aux portes ou aux carrefours entre couloirs doivent être pris en compte, d'autres correspondant à des ouvertures où le robot ne peut pas passer doivent être détectés. Les régions marquées par "A" dans la figure (3) correspondent à des ouvertures qui ne sont pas exploitables par le robot. Ce problème est pris en compte dans le filtrage des mesures effectué dans le module de segmentation et suivi de minimums. Ce faisant, la méthodologie de navigation autonome proposée est applicable également à des environnements moins structurés.

L'estimation du mouvement pendant le déplacement sur une arête : Les expérimentations ont montré que l'estimation du déplacement le long d'une arête au moyen de l'odométrie se dégrade rapidement lorsque les distances entre les noeuds deviennent plus importantes. La solution que nous avons développée, consiste à utiliser dans le calcul de l'estimation de ce déplacement le fait que le déplacement du robot est contraint par des lois de commande référencée capteur et que la branche du DV est localement continu et différentiable. Les résultats de la validation expérimentale de cette méthode d'estimation du déplacement sont montrés dans la figure (4) correspondant à 5 tours successifs mettant en évidence la dérive de l'odométrie. Ces calculs sont effectués en temps réel pendant le déplacement du robot et prennent en compte les incertitudes liées aux mesures lasers grâce à une modélisation stochastique.

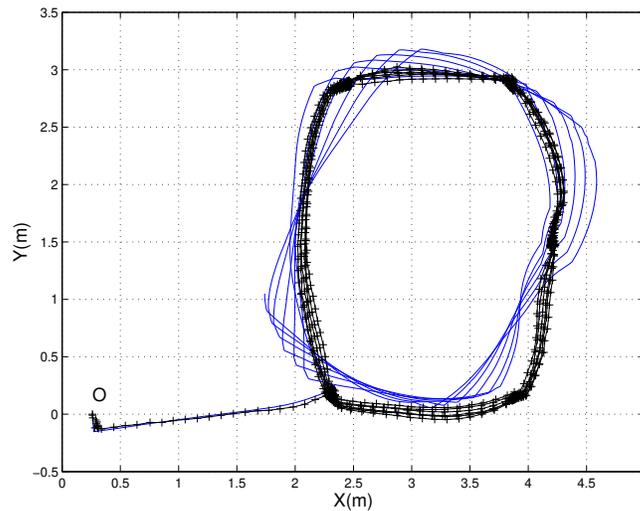


FIG. 4 – Les trajectoires du point x_c de la base mobile représentés dans le repère de référence fixé en O . La ligne continue représente la trajectoire donnée par l'odométrie et la ligne avec des croix les positions estimées par la méthode d'estimation.

Finalement, l'ensemble de ces éléments a été intégré dans un processus complet d'exploration, localisation et cartographie d'un environnement inconnu. La figure (5) montre un déplacement en boucle du robot autour d'un obstacle dans la salle robotique. Le robot part du

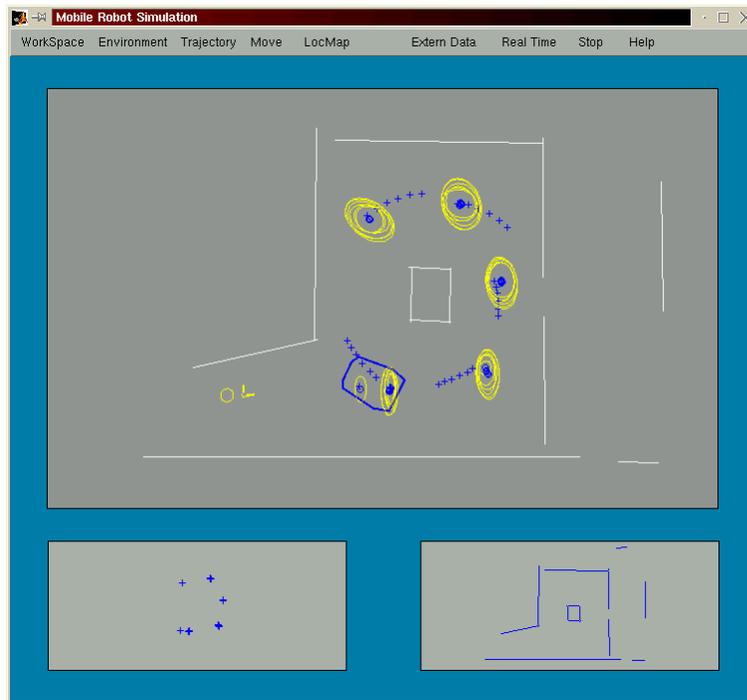


FIG. 5 – Résultats expérimentaux (les ellipses d'incertitude représentant l'erreur de localisation sont affichées 5x plus grandes).

point marqué par une croix (le point de départ du repère commandé X_c) et par un cercle (le point de départ du repère de référence), se dirige vers la boîte où un premier point de bifurcation est trouvé, repart par la gauche et effectue 5 tours dans le sens anti-horaire. Les marques correspondent aux noeuds trouvés. La localisation et la mise à jour de la carte globale sont calculées quand le robot arrive dans les points de bifurcation. Les croix marquent les positions données par l'odométrie et les cercles les positions estimées. Les ellipses d'incertitude représentant l'erreur de localisation sont affichées 5x plus grandes.

6.4 Commande référencée vision sans calibration en environnement inconnu

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

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

Résumé :

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

- *afin d'obtenir une meilleure précision, il est nécessaire d'utiliser plusieurs capteurs. Dans certaines applications les caméras ne sont pas suffisantes et d'autres capteurs (télémètre laser, effort, ultrasons...) peuvent fournir des informations complémentaires et/ou redondantes. Il s'agit donc de résoudre le problème de la commande d'un robot en utilisant les données provenant de plusieurs capteurs.*
- *afin de faciliter la mise en œuvre, il est souhaitable d'éliminer ou de simplifier toutes les procédures de calibration du système, souvent trop lourdes et coûteuses (surtout lors de l'utilisation de plusieurs capteurs). Dans le cas des capteurs visuels avec zoom variable, afin de rendre le système le plus autonome possible, se pose alors le problème de la robustesse aux incertitudes sur les paramètres intrinsèques des caméras.*
- *afin de favoriser la portabilité des méthodes de commande, il est souhaitable de concevoir des schémas de commande exploitables à partir de connaissances minimales a priori sur l'environnement. Il s'agit de procéder à la reconnaissance de ce dernier en privilégiant la reconstruction en ligne des modèles des objets constitutifs de l'environnement, par opposition à l'utilisation de modèles entièrement prédéfinis.*
- *afin d'obtenir une grande fiabilité, après s'être affranchi de la phase de ca-*

libration, les lois de commande doivent, autant que possible, présenter une grande robustesse aux incertitudes sur les paramètres du système et assurer la convergence à partir de n'importe quelle position initiale.

6.4.1 Analyse de la stabilité d'une nouvelle classe d'asservissement visuel

Nous avons proposé une nouvelle classe de schémas de commande exploitables à partir de connaissances minimales a priori sur l'environnement [3]. Avec ces nouvelles méthodes, il n'est pas nécessaire de connaître le modèle 3D de l'environnement ni de procéder à la calibration des capteurs utilisés. Les méthodes de calibration sont souvent lourdes et difficiles à mettre en œuvre, d'où l'intérêt de concevoir un système d'asservissement visuel non tributaire d'une calibration très précise. Cependant les effets négatifs d'une mauvaise calibration resurgissent inévitablement dès lors que la connaissance globale de la transformation entre espace cartésien et plan image est nécessaire à la résolution du problème donné. Tel est par exemple le cas lorsqu'il s'agit de transformer une trajectoire cartésienne désirée du robot dans le plan image afin d'assurer son suivi dans l'espace image. Dans ce cas, plus la calibration est mauvaise et plus la transformation inverse de l'image vers l'espace cartésien produit une trajectoire s'écartant de la trajectoire de référence désirée. Malgré la mauvaise calibration du système il est possible de démontrer de manière analytique la stabilité des lois de commande [17]. On obtient des conditions suffisantes très simples sur les erreurs de calibration de la caméra ainsi que sur les erreurs de modélisation du système caméra-pince. Les résultats obtenus montrent que le système en boucle fermée est très robuste et qu'une approximation très large des paramètres est suffisante.

6.4.2 Asservissement visuel invariant aux paramètres de la caméra

Toutes les méthodes d'asservissement visuel non calibré qui n'utilisent pas de connaissances a priori sur l'environnement sont basées sur l'apprentissage préalable d'une image d'un objet par rapport auquel on veut se positionner. A partir de cette image on extrait des informations visuelles qui sont utilisées comme "référence" à atteindre dans l'image. Après avoir amené la caméra à une position différente, son mouvement est contrôlé, d'une manière ou d'une autre, afin que les informations visuelles observées coïncident avec les informations visuelles de "référence". Ceci étant accompli, la caméra se trouve, par rapport à l'objet observé, dans la même position que lors de l'apprentissage. De manière générale, indépendamment de la méthode d'asservissement visuel employée, ceci est vrai si et seulement si les paramètres intrinsèques de la caméra sont, après convergence, les mêmes que lors de l'apprentissage de l'image de référence. Cette condition est cependant très contraignante. En effet, dans certaines applications il est intéressant de pouvoir changer les paramètres intrinsèques de la caméra pendant l'asservissement (ou utiliser pour l'asservissement une caméra différente de celle utilisée pendant l'apprentissage). Dans ce travail, nous proposons d'éliminer la contrainte sur les paramètres intrinsèques afin d'augmenter considérablement les domaines d'application de l'asservissement visuel. Plus précisément, on a montré qu'il est possible de définir un erreur, à partir des données extraites de l'image, qui ne dépend pas des paramètres intrinsèques de la caméra avec

laquelle l'image a été prise. L'invariance est obtenue grâce à une transformation projective qui peut être calculée à partir des informations extraites dans l'image. Une méthode pour obtenir la matrice de transformation projective a été proposée [19]. Afin de contrôler le mouvement de la caméra et d'asservir l'erreur dans l'espace invariant à zéro, on a proposé une technique d'asservissement visuel basée sur l'approche par fonction de tâche [18]. L'analyse de la stabilité a montré que la loi de commande est robuste aux erreurs de calibration du système [26]. De nombreuses expériences ont été effectuées sur le robot Cartésien AFMA de l'IRISA afin de valider la loi de commande. Les résultats donnés en Figure 6 montrent qu'il est possible de repositionner une caméra par rapport à un objet même si l'image de référence a été apprise avec une caméra différente.

6.5 Contrôle d'un dirigeable par asservissement visuel

Participants : Patrick Rives, José-Raul Azinheira [Instituto Superior Tecnico (Lisbonne, Portugal)], Samuel Bueno [Information Technology Institute (Campinas, Brésil)], Reginaldo Hughes Carvalho [Information Technology Institute (Campinas, Brésil)], Damien Chastan.

Mots clés : drones aériens, modélisation, commande, asservissement visuel..

Résumé :

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

Les principaux résultats obtenus cette année portent sur la modélisation et le contrôle du AS800 qui est le dirigeable servant de plate-forme expérimentale au projet disponible à l'ITI de Campinas (figure 7).

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

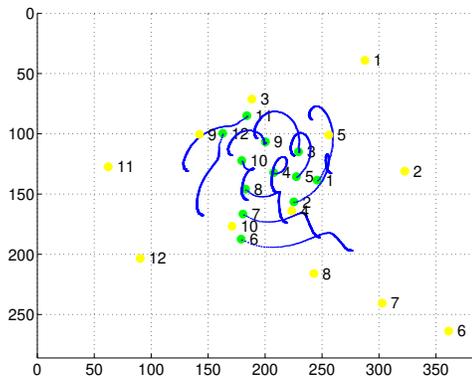
- l'important volume d'air déplacé qui fait que sa masse et ses moments d'inertie sont sensiblement plus importants que ceux dus à la masse physique du véhicule lui-même.



Image de référence



Image initiale



Trajectoire des points

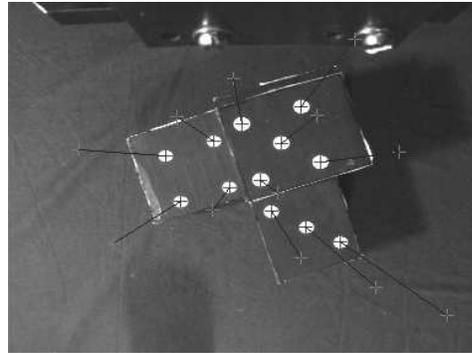
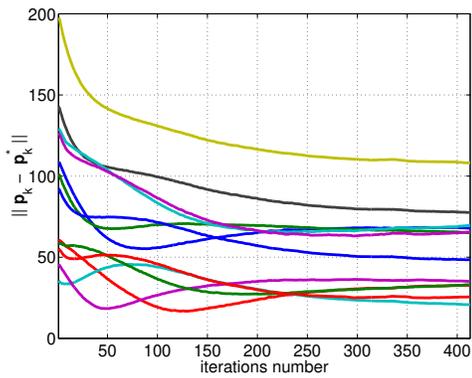
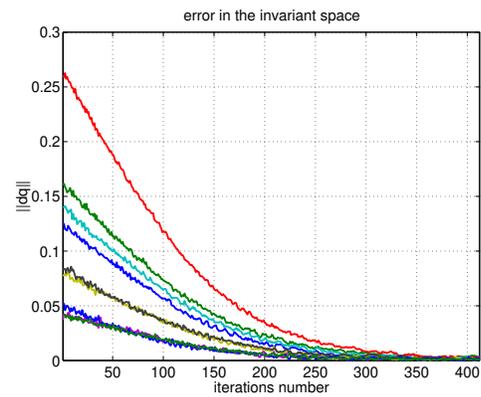


Image finale



Erreur dans l'image



Erreur dans l'espace invariant

FIG. 6 – Expérience avec une focale de 12mm à l'apprentissage (a) et avec une focale de 6mm pour l'asservissement (b) et (c). L'asservissement visuel est indépendant de la caméra utilisée. L'image finale est différente de l'image apprise mais l'erreur dans l'espace invariant est nul (f).



FIG. 7 – Le dirigeable AS800

- la masse du dirigeable qui varie en fonction de l'altitude et de l'état des ballonnets d'air dans l'enveloppe jouant un rôle similaire au ballast des sous-marins. On suppose toutefois que ces variations sont lentes.
- la position du centre de gravité qui est variable en fonction des conditions de vol.

Le AS800 et, d'une façon générale, les dirigeables d'observation, sont le plus souvent dotés de propulseurs vectorisés permettant de contrôler la direction et la force de poussée afin de faire du vol stationnaire ou de reculer. Cette particularité n'est pas sans conséquence sur la modélisation et la commande puisqu'elle va induire des modes de vol - vectorisés ou avec portance - ayant des comportements et des entrées de commande différents. Dans certains modes intermédiaires entre portance et vectorisation, il sera même possible de faire apparaître de la redondance au niveau de la commande. Cette caractéristique se retrouve, à un degré moindre, dans le plan latéral où la présence d'un propulseur de queue s'ajoutant à l'action du gouvernail de direction, autorise une plus grande manoeuvrabilité à basse vitesse.

Modèle linéarisé symbolique : L'analyse [30], montre que, du fait de la forte non linéarité du modèle, le domaine de validité du linéarisé tangent calculé en un point (X_0, U_0) ne saurait s'étendre à l'ensemble de l'espace d'état. Il est donc illusoire de penser qu'un correcteur calculé pour un point de fonctionnement "moyen" aura un comportement satisfaisant sur l'ensemble de la plage de fonctionnement s'étendant de 0 à 15m/s. L'idée est donc de réactualiser en ligne et à une cadence suffisante, le calcul du modèle linéarisé de manière à rester dans sa limite de validité. La mise en oeuvre de cette idée peut se faire de deux manières : soit calculer

le point de fonctionnement puis évaluer le modèle linéarisé numérique par une méthode de perturbation, soit dériver une forme analytique de ce modèle directement paramétrée par le point de fonctionnement dépendant de l'altitude h et de la vitesse longitudinale u . C'est cette dernière approche [30] que nous avons suivie en utilisant la toolbox symbolique de Matlab. Cela a nécessité la réécriture du modèle non linéaire puis sa dérivation en symbolique.

Synthèse du correcteur : Le modèle précédent sert de base au calcul d'un correcteur LQR paramétré en fonction de l'altitude h et de la vitesse longitudinale u . Cette loi de commande a été validée en simulation. Des limites à sa stabilité sont rapidement apparues lorsque la vitesse u devenait supérieure à 8m/s. L'explication à ce phénomène réside dans le choix de la matrice de sensibilité R intervenant dans le calcul des gains et qui, dans un premier temps, avait été choisie constante. Il est clair que l'efficacité des surfaces de contrôle (aileron, gouvernes de direction et de profondeur) dépend de la vitesse-air, nous avons donc choisi de faire varier la raideur des asservissements également en fonction de la vitesse u par le biais des coefficients de la matrice R . Les lois de variation sont des sigmoïdes dont les coefficients ont été fixés expérimentalement. De nombreuses simulations ont été réalisées sur des plages de fonctionnement variant de 0 à 15m/s et des altitudes variant de 0 à 20m sur le modèle longitudinal et sur le modèle latéral (figure 8).

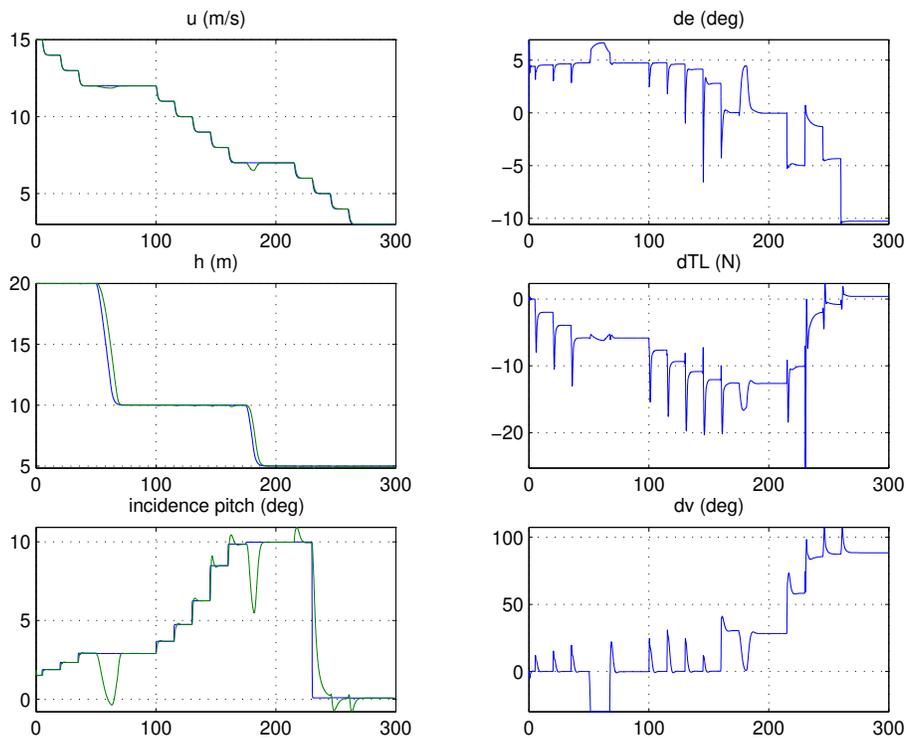


FIG. 8 – Réponse à des échelons de vitesse et d'altitude (simulation)

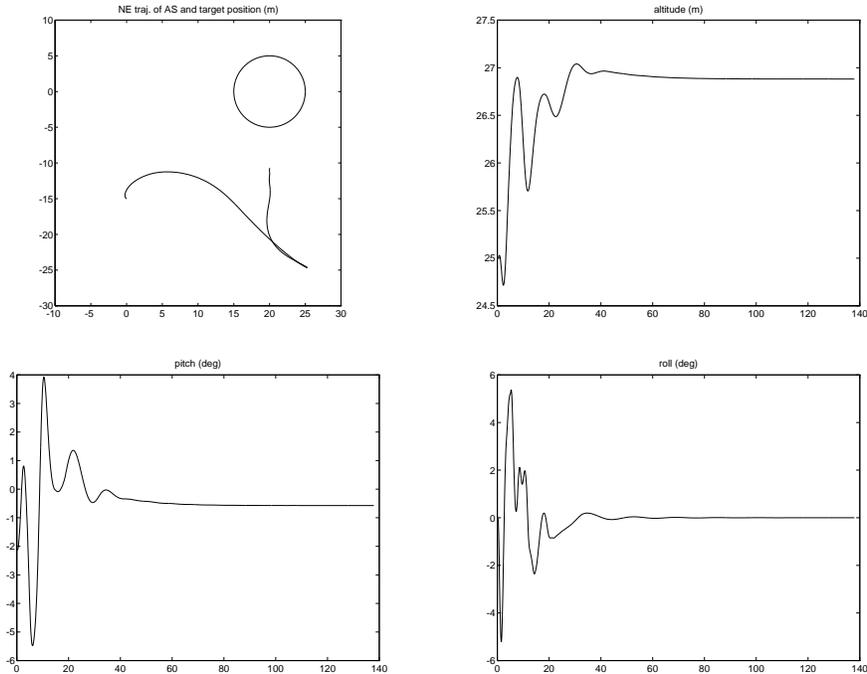


FIG. 9 – Trajectoire du repère dirigeable dans le repère sol.

Stabilisation et atterrissage automatique : Dans cette phase de vol, l'objectif est de se stabiliser au-dessus d'une cible puis de contrôler la descente du dirigeable verticalement par rapport à cette cible. La cible est constituée par un cercle de rayon $r = 2m$ posé au sol surmontée d'un ballon sphérique de $0.1m$ de rayon flottant à une hauteur $h = 4m$ et retenu par une élingue attachée au centre du cercle. Cette cible est observée par une caméra embarquée sur le dirigeable avec un axe optique vertical pointant vers le bas. L'objectif de la tâche d'asservissement visuel est d'amener l'axe optique en coïncidence avec la verticale passant par le centre de la cible au sol puis de descendre le long de cet axe lors de la phase d'atterrissage. Lorsque la tâche est réalisée, la cible se projette sous forme d'un cercle et d'un disque (projection du ballon) centrés dans l'image. Les résultats de simulation d'une commande utilisant le modèle linéarisé sont présentés pour une position finale désirée $x^* = (Nord = 5m, Est = 20m, Alt = 25m)$ partant d'une position initiale $x_{init} = (Nord = -15m, Est = 0m, Alt = 25m)$ avec un vent constant de $4m/s$ de direction Nord activé à $t = 1s$. La figure 9 présente la trajectoire xy et l'évolution de l'altitude, de l'angle de tangage et de l'angle de roulis au cours de la mission.

L'expérimentation en vol réel de cette commande est programmée courant 2002.

6.6 Moyens Expérimentaux

Participants : Jean-Jacques Borrelly, Alexandre Berdery [Ingénieur spécialiste, Action VISA].

6.6.1 Plate-formes expérimentales (*Action de développement VISA*)

Depuis Mai 2001, les moyens expérimentaux du projet Icare sont regroupés au sein de l'*Action de développement VISA* locale à Sophia et ouverte aux autres projets de recherche de l'UR. Cette action est destinée à promouvoir les applications dans le domaine des *Véhicules du futur*. Actuellement différentes plate-formes expérimentales sont mises à disposition des utilisateurs potentiels.

– *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 micro-contrôleurs (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.

– *Plate-forme mobile avec système de perception*

Cette plate-forme est constituée d'une base mobile et d'un bras manipulateur à six degrés de liberté embarqué. Elle est également équipée d'une ceinture de huit capteurs 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 télémètre laser ACCURANGE-4000 dont la portée est de l'ordre d'une quinzaine de mètres, possède un système de balayage par miroir tournant. L'ensemble permet d'obtenir une coupe dans un plan sur 2000 points de mesure en 40 millisecondes.

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 avait été mis en place au début de l'année 2000 avec la société Sagem SA, en collaboration avec le projet Sosso de l'INRIA Rocquencourt. Hellal Benzaoui avait été recruté sur un poste de post-doctorat pour travailler sur ce contrat —son contrat, d'une durée d'un an et renouvelé de deux mois s'est terminé fin mars. Le sujet de cette étude est la commande d'un actionneur électromagnétique. Ce type d'actionneur est destiné à assurer l'ouverture des soupapes d'admission et d'échappement des moteurs à combustion. L'objectif, à terme, est de supprimer l'arbre à cames qui assure traditionnellement cette fonction. L'étude qui nous a été confiée concerne la modélisation et la commande de ce système.

Après une première partie de l'étude principalement "théorique", et réalisée l'an dernier, le travail de cette année a porté sur la mise en oeuvre des schémas de commande sur le prototype. Nous avons principalement travaillé sur trois aspects : i) affinement des modèles, en particulier en ce qui concerne les caractéristiques magnétiques de l'actionneur, ii) synthèse de commandes en temps discret, iii) synthèse d'observateurs. Ce travail a fait l'objet du rapport de contrat [29].

7.3 Projet CyberCars

Mots clés : véhicules urbains, navigation, commande.

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

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

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

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

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.

8.1.2 Action de développement VISA

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Alexandre Berdery [Ingénieur spécialiste], Georges Gallais [Ingénieur expert].

La volonté de valoriser les recherches dans les domaines des véhicules du futur, s'est concrétisée dans la création de l'action de développement (*VISA Véhicules Intelligents et Systèmes Autonomes*). Cette action locale à l'UR de Sophia Antipolis a pour but d'inciter et de coordonner les transferts des résultats de recherches vers les applications. Elle a également pour mission de susciter les collaborations entre organismes et d'animer au niveau de la région les activités de recherche et développement sur le thème des transports du futur. A ce titre, P. Rives a été nommé responsable scientifique de l'action et J.-J. Borrelly, responsable technique du développement de plate-formes expérimentales dont un véhicule électrique urbain, le CyCab, permettant de servir de support expérimental aux différents projets de recherche de l'U.R. de Sophia-Antipolis désirent valider des études dans ce domaine. Cette action a fait l'objet d'une subvention d'investissement de la part du Conseil Régional PACA.

8.1.3 Action COLORS Mauve

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Jérôme Millon [I3S], Marie-Agnès Peraldi-Frati [I3S].

Nous avons collaboré avec le projet *Sport* d'I3S, dans le cadre de l'action *COLORS Mauve* dirigé par Robert de Simone. Il s'agissait d'évaluer les outils de spécification d'applications complexes à fortes contraintes temps réel développés au sein du projet *Sport* sur des applications concrètes, en l'occurrence de robotique mobile.

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 du CNRS dont le mandat de quatre ans se termine fin 2001.

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 Programme ROBEA du CNRS

Participants : Claude Samson, Patrick Rives, Pascal Morin, Ezio Malis.

Nous avons répondu en septembre à l'appel d'offres du programme interdisciplinaire ROBEA du CNRS en Robotique et soumis deux propositions de projet (participation pour l'une d'elles, maîtrise d'oeuvre pour l'autre) intitulées

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

Ces projets ont été retenus. Ils seront menés en collaboration avec des équipes du CNRS : LAAS (Toulouse), ENI (Tarbes), GRAVIR/SHARP (Grenoble). Leur durée est de trois ans.

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 Icare et P. Rives une semaine à l'IST. Cette action est complétée par une coopération avec l'ITI de Campinas (Brésil) sur un thème identique.

8.4 Actions internationales

8.4.1 Collaboration INRIA/CNPq

Dans le cadre de cette action, le projet Icare a accueilli pendant deux semaines un chercheur de l'ITI, Réginaldo Hughes Carvalho à la suite du séjour de P. Rives à Campinas en Décembre 2000. (voir aussi *Collaboration INRIA/ICCTI*)

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la Communauté scientifique

- P. Rives était organisateur des 3^{èmes} *Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'2001)* qui se sont tenues du 15-17 Octobre sur la Presqu'Île de Giens. Ces journées ont réunis 117 participants représentant une grande partie de la communauté scientifique du domaine. Elles ont permis de faire le point sur les avancées récentes dans le domaine de la recherche. Leur succès témoigne du dynamisme de la communauté.
- C. Samson était membre du Comité Scientifique des Journées Doctorales d'Automatique (JDA'2001) qui devaient se dérouler à Toulouse les 25-27 septembre. La conférence a été annulée suite à la tragédie qui a frappé la ville de Toulouse à la mi-septembre.
- C. Samson est membre du Comité de Lecture de la Collection «Mathématiques et Applications» de la SMAI (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles).

9.2 Participation à des colloques

- Les membres du projet ont présenté leurs travaux dans les conférences suivantes :
 - IEEE International Conference on Robotics and Automation, Séoul, Corée, Mai 2001,
 - IEEE International Conference on Computer Vision, Vancouver, Canada, juillet 2001,
 - IEEE European Control Conference, Porto, Portugal, septembre 2001,
 - Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Giens, octobre 2001,
 - OCEANS 2001 MTS/IEEE Conference, Honolulu, Hawaii novembre 2001,
 - IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS2001, Maui, Hawaii, novembre 2001.
 - IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, décembre 2001.

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 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.
 - G. Artus, « Automatisation de manoeuvres pour une voiture électrique », École des Mines de Paris, responsables scientifiques : C. Samson, P. Morin.

- N. Simond, « Localisation et navigation d'un véhicule électrique dans un milieu de type urbain », université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives.
- *Participation à des jurys de thèse* :
 - P. Rives a été rapporteur et membre du jury de trois thèses.
 - C. Samson a été rapporteur et membre du jury de deux thèses.
- *Stages* :
 - G. Artus, stage de fin d'études de l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, « Suivi automatique d'une cible mouvante par un robot mobile sur roues », mars-août 2001.
 - D. Chastan, stage de fin d'études et de DEA de l'Institut des Sciences et Techniques de Grenoble (Université Joseph Fourier), «Stabilisation par asservissement visuel d'un dirigeable», avril-septembre 2001.

9.5 Enseignement

- C. Samson et P. Rives sont membres de la 61^e Commission de Spécialistes de l'Université de Nice - Sophia Antipolis.
- Cours *Vision industrielle*, École Nationale des Télécommunications de Bretagne (P. Rives, 3 heures).
- Encadrement projet ESSI (J.J Borrelly et P. Rives)

10 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] E. MALIS, F. CHAUMETTE, S. BOUDET, « 2 1/2 D Visual Servoing », *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 15, 2, April 1999, p. 234–246.
- [4] P. MORIN, J.-B. POMET, C. SAMSON, « Design of homogeneous time-varying stabilizing control laws for driftless controllable systems via oscillatory approximation of Lie brackets in closed-loop », *SIAM Journal of Control and Optimization* 38, 1, 1999, p. 22–49.
- [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, « Perception et contrôle d'exécution de tâches robotiques », *in : Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Toulouse, France, novembre 1997.

- [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.
- [11] 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, Japan, 1 - 3 Novembre 2000.

Articles et chapitres de livre

- [12] E. MALIS, G. MOREL, F. CHAUMETTE, « Robot control from disparate multiple sensors », *International Journal of Robotic Research* 20, 5, May 2001, p. 364–377.
- [13] P. MORIN, C. SAMSON, « Commande », in : *La robotique mobile*, J.-P. Laumond (éditeur), Hermes, 2001.
- [14] P. RIVES, M. DEVY, « Perception pour la localisation », in : *La robotique mobile*, J.-P. Laumond (éditeur), Hermes, 2001.
- [15] P. RIVES, M. DEVY, « Perception pour la navigation et la commande », in : *La robotique mobile*, J.-P. Laumond (éditeur), Hermes, 2001.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [16] F.-X. ESPIAU, P. RIVES, « Extracting robust features and 3d reconstruction in underwater images », in : *OCEANS 2001 MTS/IEEE Conference*, Honolulu, november 2001.
- [17] E. MALIS, « Hybrid vision-based robot control robust to large calibration errors on both intrinsic and extrinsic camera parameters », in : *IEEE European Control Conference*, p. 2898–2903, Porto, Portugal, September 2001.
- [18] E. MALIS, « Vision-based control using different cameras for learning the reference image and for servoing », in : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems*, Maui, Hawaii, November 2001.
- [19] E. MALIS, « Visual servoing invariant to changes in camera intrinsic parameters », in : *IEEE International Conference on Computer Vision*, p. 704–709, Vancouver, Canada, July 2001.
- [20] P. MORIN, C. SAMSON, « Commande de véhicules sur roues non-holonomes. Une synthèse », in : *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, 2001.
- [21] P. MORIN, C. SAMSON, « Practical stabilization of driftless homogeneous systems based on the use of transverse periodic functions », in : *IEEE Conf. on Decision and Control*, décembre 2001.
- [22] P. RIVES, AL., « Dirigeable d'observation : Le projet AURORA », in : *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, 2001.
- [23] A. C. VICTORINO, P. RIVES, J.-J. BORRELLY, « Localisation d'un Robot Mobile et Cartographie par Télémétrie Laser », in : *12ème Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique*, Bourges, France, Février 2000.
- [24] A. C. VICTORINO, P. RIVES, J.-J. BORRELLY, « Mobile Robot Navigation Using a Sensor-Based Control Strategy », in : *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Seoul, Corée, May 2001.

- [25] A. C. VICTORINO, P. RIVES, J.-J. BORRELLY, « Exploration et cartographies de scènes d'intérieur par navigation référencée laser », in : *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle RFIA2002*, Angers, France, Janvier 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [26] E. MALIS, « Visual servoing invariant to changes in camera intrinsic parameters », *rapport de recherche n°4309*, INRIA, November 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4309>.
- [27] P. MORIN, C. SAMSON, « Practical stabilization of driftless homogeneous systems based on the use of transverse periodic functions », *rapport de recherche n°4184*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4184>.
- [28] P. MORIN, C. SAMSON, « Practical stabilization of driftless systems on Lie groups », *rapport de recherche n°4294*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4294>.

Divers

- [29] H. BENZAOUÏ, P. MORIN, C. SAMSON, « Commande d'un actionneur électromagnétique. Partie II : Validation sur prototype de la commande actionneur », mars 2001, Rapport de contrat avec SAGEM SA.
- [30] D. CHASTAN, « Stabilisation par asservissement visuel d'un dirigeable », Septembre 2001, rapport de stage de fin d'études et DEA.