

Projet ICARE

Instrumentation, Commande et Architecture des Robots Évolués

Sophia Antipolis

THÈME 4A

R *apport*
d'Activité

1999

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	6
3.3.1	Modélisation géométrique	7
3.3.2	Reconnaissance de structures connues	8
3.4	Navigation de robots mobiles	8
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	13
5.1	Simparc	13
6	Résultats nouveaux	14
6.1	Stabilisation de robots mobiles et de systèmes non-linéaires	14
6.1.1	Stabilisation exponentielle robuste de systèmes sans dérive	14
6.1.2	Vers une nouvelle approche de la stabilisation de systèmes sans dérive commandables	15
6.1.3	Suivi de route pour le système à N remorques avec attaches déportées	17
6.1.4	Non-existence de solutions à un problème de poursuite de véhicule sur roues	17
6.1.5	Etude d'allures de course non dissipatives d'un mécanisme bipède	19
6.2	Perception et navigation	19
6.2.1	Perception pour la cartographie et la localisation d'un robot mobile	19
6.2.2	Planification de déplacements et navigation sûre	21
6.3	Vision active	24
6.3.1	Métrologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins	24
6.4	Moyens Expérimentaux	25
6.4.1	Laboratoire de robotique	26
6.4.2	Simparc	27
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	28
7.1	Action avec Ifremer	28

8	Actions régionales, nationales et internationales	28
8.1	Actions régionales	28
8.1.1	Groupement Robotique Sud Méditerranée	28
8.2	Actions nationales	29
8.2.1	GDR Automatique	29
8.2.2	Action CyCab	29
8.2.3	ARC AVEC	29
8.2.4	Divers	29
8.3	Actions européennes	30
8.3.1	Collaboration INRIA/ICCTI	30
8.3.2	Divers	30
8.4	Actions internationales	30
8.4.1	Collaboration INRIA/CNPq	30
9	Diffusion de résultats	30
9.1	Animation de la Communauté scientifique	30
9.2	Participation à des colloques	30
9.3	Participation à des activités d'intérêt collectif	31
9.4	Formation par la recherche	31
9.5	Enseignement	31
10	Bibliographie	32

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Claude Samson [DR]

Responsable permanent

Patrick Rives [DR]

Assistante de projet

Agnès Clément-Bessière [TR]

Personnel INRIA

Pascal Morin [CR]

Jean-Jacques Borrelly [IR]

Chercheurs doctorants

Jose-Luis Carrilho-Sequeira [co-tutelle de thèse avec l'IST de Lisbonne]

François-Xavier Espiau [boursier IFREMER]

David Lizarraga-Navarro [boursier SFERE-CONACYT]

Laurence Pelletier [boursier Inria-Praxitèle jusqu'au 30/03/99]

Alessandro Corrêa-Victorino [boursier CAPES]

Chercheur post-doctorant

Dimitris Tsakiris [bourse du programme européen CHM, jusqu'à fin novembre 1998]

Stagiaires

Kahina Guemghar [stage de DEA, Université de Paris XI]

Henri Bain de la Coquerie [stage de deuxième année, Ecole Centrale de Lille]

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. Nous essayons en parallèle de développer d'autres moyens expérimentaux dans le cadre de partenariats et avec l'IFREMER en particulier.

3 Fondements scientifiques

3.1 Robots et commande

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

Mots clés : système holonôme, système nonholonôme, 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 *nonholonome* (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 nonholonomes. 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 nonholonome 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 nonholonôme, 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/nonholonôme 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) impliquant souvent des liaisons nonholonômes de par la conservation du moment cinétique, ainsi que la modélisation de phénomènes d'impact intervenant aux instants où une patte rencontre le sol. L'analyse du fonctionnement de ces systèmes mécaniques est étonnamment complexe, même pour les plus simples d'entre eux (tels que le compas —bipède— marcheur et le monopode —unijambiste— sauteur). Elle augmente encore à mesure que l'on cherche à pousser la correspondance entre certains fonctionnements nominaux de ces systèmes et les *allures* des systèmes biologiques (telles que la marche, la course, le trot, le galop,...) de structure comparable. Il est maintenant communément admis, bien qu'imparfaitement compris, que l'existence de telles allures (pseudo-périodiques), et les mécanismes de transition entre elles, sont étroitement liés à des considérations de consommation énergétique. Dans cette optique, la commande a pour rôle premier «d'identifier» les trajectoires pour lesquelles cette consommation est minimale, et de les stabiliser.

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

3.2 Commande des systèmes non-linéaires

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

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 nonholonomes 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* [4] qui représente aujourd'hui le cadre standard utilisé pour aborder les problèmes de commande référencée capteurs. Nos études de commande de robots mobiles [5] sont, quant à elles, à l'origine de la théorie naissante de la stabilisation des systèmes non-linéaires par retour d'état continu instationnaire.

3.3 Perception pour la modélisation

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Jose-Luis Carrilho-Sequeira,

-
- [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.

Alessandro Corrêa-Victorino, François-Xavier Espiau.

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

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

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

3.3.1 Modélisation géométrique

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

- l'espace dans lequel évolue le robot est de grande dimension et la localisation du robot dans cet espace est le plus souvent incertaine,
- les modèles à reconstruire peuvent provenir d'objets naturels non structurés dont l'observation complète nécessite de déplacer le capteur et de fusionner plusieurs perceptions partielles,

- les déplacements du robot entre les différents points de vue ne sont pas connus précisément, voire sont soumis à des termes de dérives.

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

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

3.3.2 Reconnaissance de structures connues

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

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

3.4 Navigation de robots mobiles

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Laurence Pelletier, Jose-Luis Carrilho-Sequeira, 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, manoeuvrer pour se garer ...), réactions vis-à-vis d'événements provenant de l'environnement (éviter des obstacles, poursuivre une cible...). Le degré d'autonomie et de sûreté du système réside dans la capacité de prendre en compte ces interactions à tous les niveaux de la tâche. En premier lieu, lors de la planification de la tâche, cela se fera par l'acquisition, la modélisation et la manipulation des connaissances sur l'environnement et sur la tâche. Enfin, durant l'exécution, il s'agira d'exploiter les données perceptuelles pour adapter au mieux le comportement du système aux conditions de la tâche qu'il réalise.

3.4.1 Perception et planification de tâches

La modélisation d'environnement en vue de la planification des actions est un thème majeur en robotique [Lac97]. Il se décline en de nombreuses variantes suivant la connaissance a priori dont on dispose : d'une connaissance complète permettant la planification hors ligne de la tâche jusqu'à une absence totale de connaissance nécessitant une acquisition en ligne du modèle durant une phase d'exploration. On a coutume de distinguer différentes problématiques en fonction du but de la perception : i) percevoir pour planifier un déplacement, ii) percevoir pour se localiser. Dans le premier cas, on fera une distinction supplémentaire entre la construction de *modèles géométriques* destinés à la planification de *trajectoires* continues libres d'obstacle et la construction de *modèles topologiques* destinés à la planification de *chemins* dont l'ensemble constitue le graphe des points de passage permettant d'aller d'un *lieu* à un autre. Pour ce qui est des modèles géométriques, ils seront fréquemment réduits, dans le cas d'environnements d'intérieurs, à une représentation polygonale des obstacles obtenue grâce à un balayage horizontal d'un télémètre (laser ou ultrason). Malgré cette apparente simplicité, la construction et la mise à jour de tels modèles demeurent difficiles, notamment au niveau de la gestion des incertitudes lors de la fusion de plusieurs acquisitions durant le déplacement du robot. Les modèles topologiques sont des représentations plus abstraites pouvant être construites par une structuration des modèles géométriques (segmentation en régions connexes définissant des lieux). Leur utilisation ouvre sur une autre problématique qui est la recherche et la reconnaissance des points de passage entre différents lieux (par exemple des portes dans une scène d'intérieur) à l'aide de techniques de reconnaissance des formes telles celles décrites dans la section 3.3.2.

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

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.

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 ^[Riv97]. Cela se traduit par la prise en compte explicite d'informations perceptuelles, d'une part dans la constitution de boucles de commande robustes (aspect continu) et, d'autre part, dans la détection d'événements externes nécessitant une modification du comportement du système (aspect réactif). Dans les deux cas, il s'agit de pouvoir robustifier le comportement du système face à une certaine variabilité des conditions d'exécution de la tâche. Cette variabilité peut provenir d'erreurs de mesures ou de modèle dues aux capteurs ou aux systèmes commandés, mais elle peut également provenir de l'environnement qui peut être mal connu ou incertain. Au niveau des lois d'asservissement, il s'agit de synthétiser des schémas de commande en boucle fermée sur les informations perceptuelles traduisant au mieux les objectifs de la tâche. L'utilisation de lois de commande 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.

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

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

4 Domaines d'applications

4.1 Panorama

Résumé : *Outre le domaine traditionnel de la robotique de manipulation, la robotique est présente dans de nombreuses autres applications impliquant la mise en œuvre de systèmes mécaniques devant fonctionner de façon plus ou moins automatisée et autonome : intervention en milieu hostile, exploration lointaine, robots mobiles, conduite automatisée, drones aériens d'observation... Le projet s'investit à ce niveau applicatif au travers de collaborations nationales et internationales. Un domaine d'application privilégié, en relation avec la vocation maritime de la région PACA, est celui de la robotique sous-marine. Le projet est impliqué également dans l'action de développement LARA (LA Route Automatisée) portant sur la thématique des transports de demain. A ce titre, il gèrera une plateforme expérimentale autour d'un véhicule électrique urbain, le CyCab, qui servira de support expérimental aux différents projets de recherche de Sophia désirant valider des études dans ce domaine. Enfin, au niveau international, une collaboration s'est mise en place 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 libertés 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.

Depuis plusieurs années, le projet retire aussi de son investissement dans ce domaine une partie significative de ses ressources contractuelles. Notamment, une thèse sur l'application de techniques de vision active à la modélisation d'objets naturels sous-marins a débuté en 1998 grâce à une bourse de thèse de l'Ifremer.

4.3 Conduite automatisée

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

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

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

L'action Praxitèle, achevée en 1997, a permis de valider un certain nombre de concepts et de concevoir un véhicule électrique, le CyCab, qui a été fabriqué à une dizaine d'exemplaires répartis dans les différentes Unités de Recherches de l'Inria. L'exemplaire disponible sur le site de Sophia, servira de support expérimental aux recherches dans le domaine des *Transports du futur* notamment sur les aspects de la *conduite automatique*.

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

D'autres sujets concernent la navigation autonome ou semi-autonome (aide à la conduite) du CyCab à partir d'informations fournies par des capteurs visuels ou télémétriques. Il s'agit

là de prendre en compte les contraintes de sécurité (détection des piétons et des obstacles) et les aspects de planification dans des environnements pouvant évoluer.

4.4 Drones aériens d'observation

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

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

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

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

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

Les problématiques en termes de commande, navigation et types de missions se sont révélées très proches de celles que nous poursuivons dans le domaine de la navigation et de la commande des véhicules sous-marins. Nous avons donc initié une coopération 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. Au sein de cette collaboration, nous étudions plus particulièrement l'apport des techniques d'asservissement visuel pour automatiser certaines phases de vol telles que le vol stationnaire ou l'atterrissage qui nécessitent un contrôle précis de l'attitude et de la vitesse par rapport au sol. Les approches que nous développons dans le projet, qui permettent d'utiliser des techniques de contrôle robuste pour stabiliser l'attitude d'un engin par rapport à son environnement, semblent très adaptées à ce type d'application et seront validées sur les engins développés par nos partenaires.

5 Logiciels

5.1 Simparc

Mots clés : robotique, temps réel, simulation.

Participant : Jean-Jacques Borrelly [correspondant].

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

6 Résultats nouveaux

6.1 Stabilisation de robots mobiles et de systèmes non-linéaires

Participants : Claude Samson, Pascal Morin, Jean-Jacques Borrelly, David Lizzaraga-Navarro, Henri Bain de la Coquerie, Kahina Guemghar.

Mots clés : système non linéaire, stabilisation asymptotique, stabilisation pratique, commande instationnaire, système homogène, retour d'état continu, oscillateurs à fréquences contrôlées, commande robuste, 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 nonholonomie associées au roulement sans glissement des roues sur le sol donnent lieu à ce type de système non-linéaire. La majeure partie du travail réalisé cette année porte sur les problèmes de robustesse vis à vis de dynamiques non-modélisées.*

6.1.1 Stabilisation exponentielle robuste de systèmes sans dérive

Pour ce qui est de la classe de systèmes non-linéaires commandables que nous étudions (approximation linéaire non stabilisable, point d'équilibre non asymptotiquement stabilisable par retour d'état continu non-dépendant du temps), après avoir démontré qu'aucun retour d'état homogène continu instationnaire ne peut assurer la stabilité d'un point d'équilibre du système de façon robuste aux erreurs de modélisation, nous nous sommes tournés vers des commande en boucle ouverte réinitialisées périodiquement en fonction de l'état du système observé à ces instants pour dégager des solutions au problème de stabilisation exponentielle robuste des systèmes (S_0) de la forme $\dot{x} = \sum_{i=1}^m f_i(x)u_i$. Les principes généraux de la méthode ont été dégagés l'année dernière et sont exposés dans [10]. Deux extensions, présentées dans [12], ont été étudiées cette année, en relation avec la mise en oeuvre pratique de la méthode.

La première traite de l'extension dynamique du modèle par ajout d'intégrateurs au niveau des variables de commande et la façon dont la loi de commande doit être modifiée en conséquence.

La seconde concerne l'échantillonnage avec bloqueur d'ordre zéro de la loi de commande. Nous avons montré que cette opération préserve les propriétés de convergence et de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation considérées, à condition de choisir convenablement la fréquence d'échantillonnage. Pour que la convergence asymptotique soit assurée, il importe cependant que les intervalles de temps pendant lesquels la commande appliquée au système

est maintenue constante soient très précisément égaux. Cette contrainte n'étant généralement qu'imparfaitement réalisée dans la pratique, elle constitue une source de non-robustesse et, probablement aussi, une obstruction fondamentale quant à la possibilité d'établir des propriétés de robustesse plus fortes que celles déjà obtenues dans le cadre de la stabilisation asymptotique des systèmes fortement non-linéaires.

En complément des études théoriques sur le sujet, les techniques de commande instationnaire hybride (boucle ouverte/boucle fermée) ont fait l'objet d'expérimentations sur la base mobile ANIS du projet. L'objectif choisi était de stabiliser précisément, par retour d'état et sans passer par une étape intermédiaire de planification de trajectoires, le robot mobile face à un objet-cible constitué de trois barres verticales parallèles (non coplanaires) qui matérialisent un repère fixe. Une caméra montée à l'extrémité d'un bras manipulateur porté par la base mobile est utilisée pour observer l'objet-cible et fournir à la cadence vidéo l'information visuelle permettant d'estimer l'erreur de positionnement, elle-même utilisée dans la loi de commande à des fins de correction (stabilisation). Ces expérimentations mettent donc en oeuvre (pour la première fois à notre connaissance) des méthodes de *commande instationnaire hybride référencée vision* [19].

6.1.2 Vers une nouvelle approche de la stabilisation de systèmes sans dérive commandables

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 oeuvre 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 manoeuvres 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 jusqu'à présent sont spécifiquement conçues pour résoudre le premier problème, mais ne sont pas adaptées au second ne serait-ce qu'en raison des termes "d'excitation" périodiques à fréquence constante qu'elle contiennent et dont la présence est inutile, sinon nuisible, dans le cas de la poursuite d'une trajectoire sans point d'arrêt.

Nos études ont d'autre part mis en évidence (voir section 6.1.4) l'impossibilité de dégager une loi de commande "unique" capable de stabiliser asymptotiquement toutes les trajectoires réalisables d'un système sans dérive commandable. En d'autres termes, il est illusoire de chercher à résoudre "l'ensemble" des problèmes de stabilisation asymptotique de trajectoires pour ce type de système –contrairement, par exemple, au cas des systèmes linéaires commandables–.

Sur un autre plan, il faut reconnaître que nos tentatives d'amélioration des propriétés de ro-

bustesse des lois de commande instationnaires (voir section précédente) 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 questionner l'intérêt de poursuivre plus loin l'étude de stabilisateurs "asymptotiques", tout au moins dans le sens que nous avons considéré jusqu'à présent.

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. Etudier 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 asymptotique (dont nous pressentons qu'il n'est pas atteignable de façon robuste) par un objectif plus faible de *stabilisation uniforme d'un voisinage borné* (a priori petit) de l'état désiré du système. 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 "moins ambitieux" est qu'il permet également de s'affranchir d'autres limitations, tel que celles évoquées plus haut de non-existence de retours d'état capables de stabiliser toutes les trajectoires dans l'espace d'état. 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.* [DDZZar] 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

[DDZZar] W. E. DIXON, D. M. DAWSON, E. ZERGEROGLU, F. ZHANG, « Robust tracking and regulation control for a mobile robot », *International Journal of Robust and Nonlinear Control: Special Issue on Control of Underactuated Nonlinear Systems*, to appear.

de commande instationnaires.

Les recherches sur cette approche, qui ont démarré cette année en donnant lieu au stage de DEA de K. Guemghar, nous ont déjà permis d'obtenir des résultats positifs pour la classe des systèmes chaînés. Leur extension à des systèmes plus généraux est en cours et devrait prochainement aboutir à des résultats publiables.

6.1.3 Suivi de route pour le système à N remorques avec attaches déportées

Cette étude est une première étape dans le but d'automatiser la commande d'un système composé d'une voiture tractant N remorques avec attaches déportées, sur une route dont la courbure change lentement en fonction de l'abscisse curviligne. On vise, en particulier, à dégager une méthode simple permettant également de prendre en compte des considérations géométriques liées aux placements des véhicules sur la route.

Le modèle est normalisé par rapport à la vitesse longitudinale, de sorte que la seule variable de commande est la vitesse de braquage de la roue directrice. Afin de fixer le jeu de coordonnées décrivant l'état du système, on sélectionne, dans le plan de roulement, un point P fixe par rapport à une composante quelconque du système (une remorque ou la voiture de tête) et on considère, à tout instant t , la projection orthogonale Q du point P sur la *ligne centrale* de la route. Cette ligne peut être approchée, au point Q , par le cercle qui lui est tangent en ce point. Après avoir choisi une distance d désirée entre les points P et Q , ce cercle constitue le modèle du chemin utilisé pour la synthèse de la commande à l'instant t . Le choix du paramètre d détermine la configuration d'équilibre relative désirée du système de remorques par rapport au cercle. Il est, par exemple, possible de le choisir de sorte à minimiser le déport d'une des remorques par rapport à la ligne centrale, ou encore de minimiser une valeur moyenne des déports de l'ensemble des véhicules. Le choix de ce paramètre représente donc le degré de liberté offert à l'utilisateur pour agir sur la géométrie du système par rapport à l'environnement routier. Dans la simulation de la figure 1, d est calculé de sorte à annuler la somme algébrique des longueurs d_1 et d_{N+1} , qui correspondent aux distances mesurées entre les points au milieu des essieux arrière de la dernière remorque et la voiture, respectivement, et le cercle tangent.

6.1.4 Non-existence de solutions à un problème de poursuite de véhicule sur roues

On considère le problème de poursuite d'un véhicule dit *de référence* par un second véhicule de structure identique. Le mouvement du véhicule de référence est caractérisé par deux fonctions du temps correspondant à ses vitesses longitudinale $v_r(t)$ et de rotation $\omega_r(t)$, toutes deux appartenant à un ensemble \mathcal{U} de vitesses admissibles, e.g., l'ensemble de fonctions continues et bornées par une constante donnée. On définit aussi un vecteur d'erreur de poursuite composé des écarts en position et orientation entre les deux véhicules. En supposant que les valeurs de ce vecteur d'erreur de poursuite et que les vitesses $v_r(t)$ et $\omega_r(t)$ sont accessibles à la mesure à tout instant, le problème consiste à commander le véhicule suiveur par un retour d'état continu, de façon à stabiliser asymptotiquement l'erreur de poursuite vers zéro, *indépendamment du choix de u_r et ω_r dans \mathcal{U}* . Placé dans un contexte plus général, le problème posé est celui de l'existence de retours d'état capables de stabiliser le plus grand ensemble possible

6.1.5 Etude d'allures de course non dissipatives d'un mécanisme bipède

Ce travail, mené à l'occasion d'un stage de fin d'études de deuxième année d'école d'ingénieurs, porte sur la modélisation des équations de la dynamique d'un mécanisme bipède articulé (constitué de trois corps rigides –deux pattes et un tronc– et de ressorts –dans le prolongement de chaque patte et aux articulations de la hanche–) se déplaçant dans le plan sagittal, ainsi que la caractérisation de trajectoires cycliques avec phases balistiques (correspondant à une allure de course) sans apport énergétique extérieur (sans commande). Il s'inscrit dans le prolongement de l'étude réalisée précédemment sur la commande du monopode planaire dans le but d'en étendre les résultats et également pour essayer de comprendre les avantages éventuels, sur le plan de la commande et des vitesses de déplacement atteignables, de la locomotion multi-pattes.

En raison de la plus grande complexité des équations du système, l'existence et la caractérisation complète de telles trajectoires n'a pour l'instant été établie que dans le cas limite correspondant à une raideur infinie des ressorts de pattes.

6.2 Perception et navigation

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly, Laurence Pelletier, Jose-Luis Carrilho-Sequeira, Alessandro Corrêa-Victorino.

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

Résumé : *Le travail réalisé cet année s'inscrit dans la thématique de la navigation d'un véhicule dans un environnement structuré. Cette thématique comprend deux aspects, l'acquisition des modèles de l'environnement nécessaires à la navigation du robot, la génération et l'exécution de déplacements sûrs. Il est maintenant communément admis qu'un robot mobile ne peut effectuer, sans risque de dérive important, des déplacements en se basant uniquement sur les données fournies par ses capteurs d'estime (odomètres, centrale inertielle). Il est donc crucial de pouvoir borner cette dérive en utilisant les informations sur l'environnement fournis par des capteurs extéroceptifs. Deux approches complémentaires sont étudiées au sein du projet: i) utiliser ces informations pour se re-localiser et corriger la dérive par rapport à une trajectoire de référence ii) utiliser directement ces informations dans des schémas de commande référencée capteur pour réguler la position relative du robot vis-à-vis d'objets particuliers de l'environnement (suivi de mur ou positionnement vis à vis d'une porte).*

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

La première action concerne l'utilisation de données télémétriques et odométriques pour la cartographie et la localisation d'un robot mobile évoluant dans un environnement structuré mais inconnu. Nous étudions dans cet axe de recherche des techniques permettant à la fois la

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

Dans le cas de scènes d'intérieur relativement structurées, les proximètres à ultrasons permettent, pour un faible coût, d'obtenir des mesures de distances pouvant être utilisées pour la localisation. En contrepartie, ces mesures sont souvent de mauvaise qualité et contiennent de nombreux artefacts qui doivent être filtrés. Les résultats obtenus l'année dernière portaient principalement sur l'amélioration de la qualité des mesures fournies par les capteurs ultrasons. Nous avons montré qu'il était possible de remonter à des informations plus riches sur la distance et l'orientation d'une cible supposée planaire en associant plusieurs capteurs ultrasons et en utilisant un principe de triangulation géométrique. Afin de rejeter les mesures aberrantes liées aux phénomènes de réflexions multiples, une méthode de rejet utilisant un algorithme de vote avait été implémentée par le biais d'une transformée de Hough. Malgré une amélioration sensible des résultats, il semble que nous soyons parvenu à la limite de ce que l'on peut espérer obtenir en termes de performances de ce type de capteurs ultrasonores [18]. Malgré leurs avantages (faible coût, simplicité de mise en oeuvre...), ils se révèlent peu adaptés à des tâches de localisation, principalement du fait de leur faible portée. Leur intérêt en robotique mobile reste cependant important dans le domaine de la détection et de l'évitement d'obstacles où leur champ large de perception permet de définir un volume de protection autour du robot.

Cette année a été en partie consacrée à transposer les techniques développées dans le cadre des ultrasons à un télémètre laser à balayage qui équipe maintenant notre robot mobile. L'amélioration des résultats est spectaculaire en termes de précision et de cohérence de la carte globale obtenue. Cela s'explique aisément par la forte densité des mesures (2000 points pour un balayage panoramique de 360 degrés), leur qualité (environ 1cm de résolution sur 10 mètres de portée) mais surtout par le caractère moins local de ces mesures facilitant le recalage des cartes locales durant l'exploration de l'environnement par le robot.

Ce nouveau capteur a été intégré à notre logiciel *LocMap*, écrit en MATLAB, qui permet la simulation et l'expérimentation réelle d'algorithmes de navigation de robots mobiles d'intérieur. La figure 2 montre les résultats de la localisation et de la cartographie de notre salle d'expérimentation en utilisant les données fournies par le télémètre laser. La figure centrale montre le déplacement du robot; en bas, à gauche, l'évolution des ellipses d'incertitude concernant sa localisation; en bas à droite la scène reconstruite.

dans un environnement dont on possède une carte.

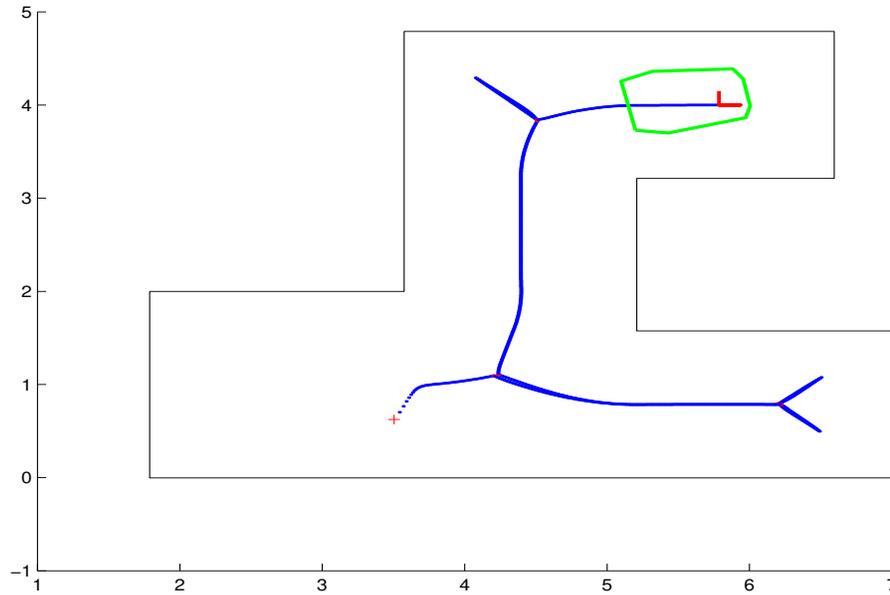
Exploration et navigation réactive : nous considérons un robot mobile évoluant dans une scène plane et statique composée d'objets inconnus. Nous supposons cette scène bornée par un ensemble d'objets appelés *frontières*. L'objectif est de se déplacer dans cette scène et d'en construire une représentation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

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

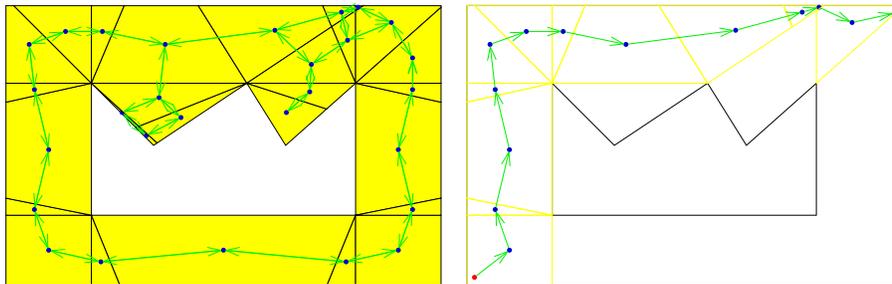
Parmi les représentations possédant de telles propriétés, nous avons choisi d'utiliser le diagramme de Voronoï (appelé aussi squelette ou axe médian) qui peut être défini comme le lieu du centre des disques de rayon minimal tangents aux obstacles. L'ensemble des trajectoires est décrit par un graphe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

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 dont nous avons équipé notre robot. A 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 étant réalisée de manière incrémentale en mémorisant la trajectoire parcourue par le robot et les noeuds du graphe correspondant aux points de bifurcation (figure 3). Dans le cas d'une tâche d'exploration, une méthode de retour arrière a été implémentée afin d'explorer les arêtes du graphe dans leur totalité et obtenir une représentation complète de la scène.

Planification de chemins et enchaînement d'actions élémentaires : nous considérons maintenant que nous disposons d'une carte de l'environnement (par exemple, établie avec la technique précédente) et nous souhaitons planifier un déplacement du robot partant d'une configuration initiale pour atteindre une configuration désirée. Ce déplacement doit être réalisable en enchaînant des actions élémentaires référencées capteur. La méthode que nous avons développée est basée sur le partitionnement de la carte de l'environnement en *régions* caractérisées par le type d'action élémentaire que l'on peut y réaliser. Une action élémentaire étant

FIG. 3 – *Navigation réactive et exploration de scène*

définie par un couple constitué d'une primitive géométrique locale de l'environnement et d'un capteur, le calcul des CARTES DE VISIBILITÉ des primitives présentes dans l'environnement est indispensable au calcul du partitionnement. Il faut noter que notre notion de visibilité est un peu différente de celle manipulée en synthèse d'images, à savoir : quelles sont les primitives visibles d'un certain point de vue. Dans notre cas, il s'agit de déterminer les régions de l'espace d'où une certaine primitive peut être vue, totalement ou partiellement. Les algorithmes existants ne répondant que de façon incomplète à ce problème, nous avons développé un environnement complet de calcul de cartes de visibilité, totales ou partielles, pour les sommets et arêtes de polygones dans le plan. Cet environnement s'appuie sur la bibliothèque de manipulation d'objets géométriques LEDA et permet de calculer une partition de l'espace libre en régions labélisées par les primitives de la scène visibles de l'intérieur de la région (figure 4).

FIG. 4 – *Planification de chemin sous contraintes de visibilité*

Une fois que le partitionnement de l'espace en régions de visibilité étiquetées par l'en-

semble des actions élémentaires référencées capteurs admissibles est réalisé, le problème de la planification de chemin peut être posé en terme d'optimisation d'un critère de parcours de graphe.

6.3 Vision active

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

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

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

La reconstruction d'objets naturels à partir d'images est un problème délicat et de nombreuses approches ont été proposées au cours des quinze dernières années. Dans notre cas, les données sont les suivantes: une séquence vidéo mono-caméra non calibrée, les images représentant des objets naturels rigides, non structurés et fortement texturés (exemples d'images traitées: voir fig. 5 et fig. 6). Nous avons choisi d'échantillonner la séquence vidéo donc de ne travailler que sur des ensembles d'images et de ne pas prendre en compte pour le moment l'aspect temporel.



FIG. 5 – *Fumerole*

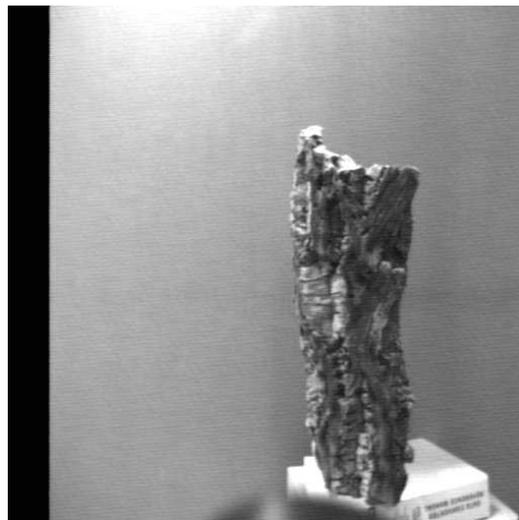


FIG. 6 – *Morceau de liège*

La nature même des objets, et par conséquent leur représentation dans les images rend très délicate la recherche d'informations significatives. Par exemple, les contours étant difficiles à percevoir l'oeil nu, ils n'en seront que plus délicats à localiser avec des détecteurs de type "Canny".

Dans notre étude, nous avons opté pour la détection de points d'intérêt couplée avec d'autres informations. En effet, ce type de détecteurs est conçu pour trouver des coins, au

sens physique, mais il est clair que dans notre cas, il n'y en a pas. C'est pourquoi nous cherchons en fait des points stables dans le sens où ils doivent être robustes aux changements d'échelles, bien localisés, robustes aux réglages de paramètres, ... De plus, ce traitement étant local, nous mettons en oeuvre une approche plus globale, qui est l'utilisation d'une structure reliant tous les points d'intérêt pour avoir une cohérence géométrique.

Nous avons donc effectué une étude sur différents algorithmes bas-niveau afin de déterminer le détecteur qu'il convient d'utiliser: Canny, Canny-Deriche, Susan, Cms et Harris. Egalement, nous avons aussi étudié les approches de segmentation en textures. Finalement c'est le détecteur de points de Harris qui a été retenu. La figure 7 montre le résultat de celui-ci sur une image et l'on voit clairement apparaître les problèmes auxquels nous sommes confrontés en termes de caractérisation des points (localisation, point physique ou non,...) et de la robustesse de leur suivi dans la séquence d'images.

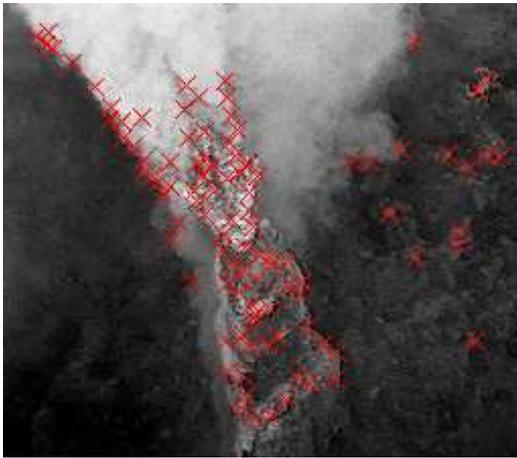


FIG. 7 – Détecteur de Harris

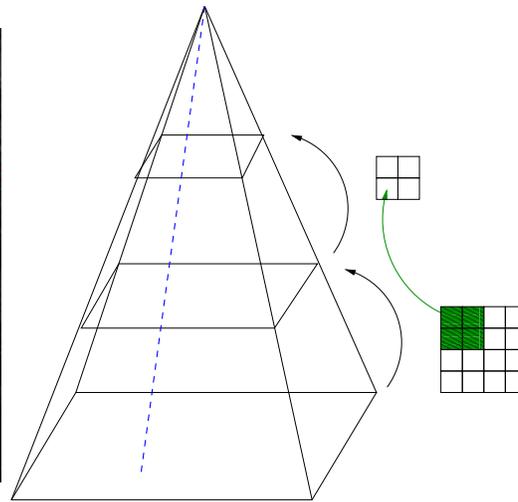


FIG. 8 – Pyramide d'images

Ceci est la première étape de notre processus. En effet, il faut maintenant s'assurer que ces points détectés sont significatifs dans l'image (pour permettre un appariement entre images). Pour cela, nous utilisons une approche multiéchelle. Après avoir construit une pyramide d'images (convolution avec une gaussienne puis sous-échantillonnage, voir fig. 8), nous extrayons les points d'intérêt à chaque niveau de cette pyramide et nous effectuons un appariement spatial de sorte à obtenir les points les plus significatifs, aux endroits de forte variation du signal.

Le travail porte maintenant sur deux points: i) l'étude approfondie de l'exploitation de cette pyramide (et sa mise en oeuvre) et ii) l'utilisation de la géométrie projective pour la reconstruction du modèle 3D. Plus précisément, nous nous retrouvons dans les problèmes classiques de calcul de la géométrie épipolaire et de la matrice fondamentale.

6.4 Moyens Expérimentaux

Participant : Jean-Jacques Borrelly.

6.4.1 Laboratoire de robotique

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

- *Plateforme mobile avec système de perception*

Cette plateforme est constituée d'une base mobile et d'un bras manipulateur à six degrés de liberté embarqué. Elle est également équipée d'une ceinture de huit capteurs ultrasonores, d'une caméra située sur l'organe terminal du bras et d'un télémètre laser placé sur le premier axe du bras.

- *Système de vision*

Le système de vision est constitué d'une carte de traitement bas niveau (gestion de fenêtres, convolutions, extraction de points d'intérêt..), d'une carte de traitement intermédiaire basée sur quatre modules DPS96002 (détermination des paramètres caractéristiques des motifs recherchés par fenêtre) et d'une carte processeur d'usage général pour la gestion de l'ensemble et les traitements haut niveau.

- *Télémètre laser*

Le projet ICARE a fait l'acquisition d'un télémètre laser ACCURANGE-4000 dont la portée est de l'ordre d'une quinzaine de mètres et possédant un système de balayage par miroir tournant. L'ensemble permet d'obtenir une coupe dans un plan sur 2000 points de mesure en 40 millisecondes. Le système d'origine peut être connecté à un PC grâce à une interface sur le bus ISA. L'utilisation embarquée du télémètre sur le robot mobile nous a conduits à développer les éléments suivants:

- *Asservissement de position/vitesse du moteur*

Cet asservissement a été réalisé à partir d'un module TIP102 identique à ceux utilisés pour la base mobile et le bras.

- *Module logiciel de paramétrisation du télémètre*

Ce module permet de définir différents paramètres de fonctionnement du télémètre (fréquence de mesure, distances minimum/maximum...) et d'obtenir la mesure courante via une connection par liaison série.

- *Module de mesure rapide*

Un module matériel (type Industry-Pack) pour la mesure rapide des informations laser a été développé. Ce module permet d'effectuer l'acquisition des données télémétriques à une cadence maximum de 50 KHz en synchronisation avec les informations délivrées par le codeur optique associé au moteur de balayage. Il est possible d'effectuer des mesures à une cadence moins élevée pour obtenir une meilleure résolution. Le module est constitué de :

- Un composant FPGA (XILINX 3190A) pour la mesure et la gestion des acquisitions. Ce composant, cadencé à 80 mégahertz assure les fonctions suivantes :
 - comptage de la durée du signal laser image de la distance mesurée,

- contrôle du convertisseur numérique-analogique pour les mesures de température et d’amplitude du signal lase,.
- gestion des cycles d’écriture dans la mémoire FIFO en synchronisme avec les informations codeur,
- stockage intermédiaire des données avec protection des accès,
- génération d’une interruption et vecteur associé à la fin d’une séquence de mesure.
- Une mémoire FIFO 16Kx9 bits pour le stockage des données,
- Deux PALS 22V10CE pour la sélection et le contrôle du module, et permettant la reprogrammation sur site du XILINX,
- Divers composants d’interfaçage avec le laser (convertisseur numérique-analogique, amplificateurs...).

Un circuit imprimé comportant quatre couches “signaux” a été réalisé pour ce module. Les deux modules de contrôle du télémètre (TIP102 et Mesure rapide) ont été installés sur une carte spécifique support de modules IP (VIP618).

Le logiciel de contrôle de ce module a également été développé. Il permet principalement de configurer le module, la récupération des interruptions et la détermination de la distance mesurée à partir des informations contenues dans la mémoire FIFO du module. Le code correspondant à la détermination des distances a été spécialement optimisé pour améliorer les performances temporelles. Le code original fourni avec le télémètre donnait une durée de calcul de 180 millisecondes pour 2000 mesures, on obtient 95 millisecondes après optimisation.

Actuellement, le module fonctionne en mode déclenché par programme et fournit une interruption de fin de mesure. D’autres modes de fonctionnement (mode périodique, mesure unique, sous échantillonnages..) sont envisageables. La mise en oeuvre de ceux ci est rendue possible par le nombre de blocs logiques actuellement inutilisés dans le FPGA ainsi que par les possibilités de reprogrammation in-situ du module.

La figure 9 présente un exemple de coupe obtenue à partir de ce télémètre.

6.4.2 Simparc

Participant : Jean-Jacques Borrelly.

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

- la description de l’architecture système sous forme de composants interconnectés grâce à un interface graphique,
- la description du modèle dynamique du système commande sous forme d’équations différentielles ordinaires,
- les éléments de base d’un OS temps-réel (multi-tâche, files de messages, sémaphores) en version mono ou multi-processeurs,

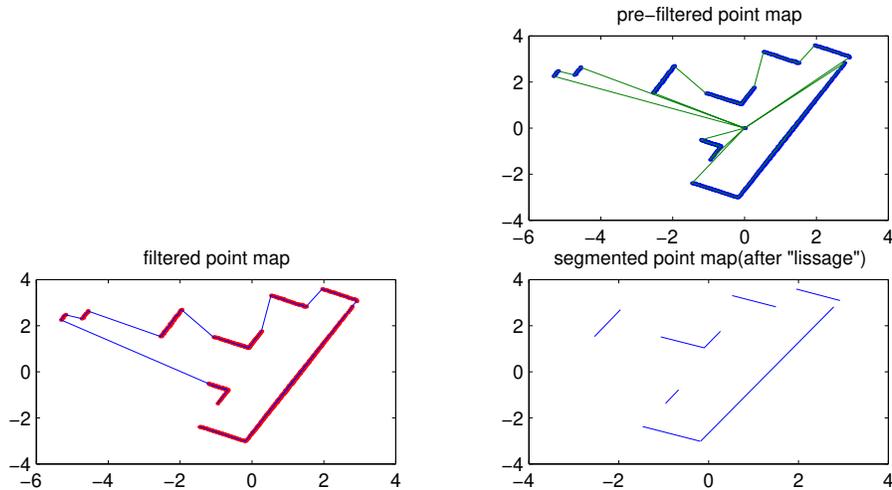


FIG. 9 – Carte fournie par le télémètre laser à balayage

- des composants de type capteur (image, ultra-sons),
- la description de l’environnement sous formes de segments/facettes.

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

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Action avec Ifremer

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

Participants : Patrick Rives, François-Xavier Espiau.

Une Bourse de thèse financée par IFREMER a été accordée à F.X. Espiau sur le thème : *reconstruction d’objets naturels par vision active*.

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 oeuvre dans le centre Ifremer de Toulon ; ce système est mis à la disposition des membres du groupement ainsi que des moyens expérimentaux gérés par l’Ifremer. Ce groupement a également vocation d’aider à la constitution de projets en mettant en relation industriels et partenaires publics et en soutenant leurs demandes de financement auprès des institutions régionales et européennes.

8.2 Actions nationales

8.2.1 GDR Automatique

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

C. Samson est membre du Conseil de Direction du GDR Automatique.

Il participe, en collaboration avec d’autres laboratoires d’Automatique et de Robotique français, au projet de recherche soutenu par le MNERT et le GDR Automatique: « Commande de robots à pattes ».

C. Samson, P. Morin, et D. Lizárraga-Navarro, ont participé au projet de recherche soutenu par le GDR Automatique: « Stabilisation de systèmes non linéaires en dimension finie et apports pour la stabilisation de systèmes régis par des EDP ou de systèmes hybrides ».

8.2.2 Action CyCab

Participants : Patrick Rives, Jean-Jacques Borrelly.

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

8.2.3 ARC AVEC

Participants : Patrick Rives, François-Xavier Espiau.

Une action de recherche coopérative entre les projets Vista de Rennes, Movi et Bip de Grenoble et le projet Icare sur le thème de l’asservissement visuel est actuellement en cours. Deux séminaires scientifiques ont été organisés cette année, l’un à Sophia en Mars et l’autre à Grenoble en Octobre, qui ont permis de définir des objectifs communs et des échanges de logiciels (voir <http://www.irisa.fr/AVEC>). Dans ce cadre, François-Xavier Espiau a passé une semaine à Grenoble afin d’acquérir des séquences d’images numériques sur la plateforme expérimentale dont dispose le projet Movi.

8.2.4 Divers

- C. Samson est membre des Comités Scientifiques des conférences nationales JDA ’99 et CIFA 2000, et du Comité de Lecture de la SMAI.
- L’Académie des Sciences lui a décerné en 1999 le prix thématique Michel Monpetit dans le domaine des “Sciences Mécaniques”.

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. Cette action est complétée par une coopération avec le CTI de Campinas (Brésil) sur un thème identique.

8.3.2 Divers

- C. Samson est membre du Conseil administratif de l'EUCA (European Union Control Association).
- C. Samson était, jusqu'en avril 1999, Éditeur associé de la revue European Journal of Control.

8.4 Actions internationales

8.4.1 Collaboration INRIA/CNPq

Dans le cadre de cette collaboration (voir aussi *Collaboration INRIA/ICCTI*), Patrick Rives a fait un séjour de 15 jours au Laboratoire de Vision et de Robotique du CTI de Campinas. Durant ce séjour, il a donné un module de cours de 15 h sur la commande référencée capteur et initié un axe de recherches dans ce domaine. Un chercheur du CTI sera accueilli par le projet Icare durant 15 jours en décembre afin de poursuivre cette étude.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la Communauté scientifique

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

9.2 Participation à des colloques

- P. Rives a organisé la première réunion de l'Action de Recherche Coopérative (ARC) "AVEC" à Sophia Antipolis le 8-9 avril 1999
- Les membres du projet ont présenté leurs travaux dans les conférences suivantes :
 - ARC AVEC sur l'asservissement visuel, Sophia Rennes, septembre 1998,
 - First Nonlinear Control Network (NCN) Workshop on "Stability and Stabilization", Ghent, 15-16 mars 1999,
 - Journée bilan du projet "Robots à pattes" du GDR Automatique, Institut Henri Poincaré, Paris, 19 mars 1999,
 - International Symposium on Experimental Robotics, 28-31 Mars 1999, Sydney, Australie,

- Fisrt NCN Pedagogical School, Athènes, 6-10 septembre 1999,
- Journées Doctorales d'Automatique (JDA'99), Nancy, 21-23 septembre 1999,
- 38th IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, 7-10 décembre 1999.

9.3 Participation à des activités d'intérêt collectif

- C. Samson était président du Comité des Bourses de l'U.R. de Sophia Antipolis jusqu'en novembre 1999.
- 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* :
 - J.-L. Carrilho-Sequeira, « Fusion multicapteurs en robotique mobile », Université de Nice-Sophia Antipolis et Institutò Superior Tecnico de Lisbonne (co-tutelle), responsables scientifiques : P. Rives (en France), P. Lourtie (au Portugal).
 - D. A. Lizárraga-Navarro, « Commande de robots mobiles. À la poursuite de trajectoires impossibles », université de Grenoble (INPG), responsable scientifique : C. Samson.
 - L. Pelletier, « Intégration de données sensorielles dans la planification de trajectoires de robots mobiles », université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives.
 - F.X. Espiau, « Métrologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins », Université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives
 - A. C. Victorino, « Commande référencée capteur pour des robots mobiles hybrides non-holonômes/ holonômes », Université de Nice-Sophia Antipolis, responsable scientifique : P. Rives
- *Participation à des jurys de thèse* :
 - P. Rives a été rapporteur de 3 thèses et membre du jury d'habilitation à diriger des recherches de E. Mouaddib, Université Jules Verne, Amiens, décembre.
 - C. Samson a été rapporteur et membre des jurys de deux thèses.
- *Stages* :
 - K. Guemghar, « Stabilisation de trajectoires pour un robot mobile », DEA d'Automatique de l'Université de Paris XI.
 - H.-B. de la Coquerie, « Etude de la course d'un robot bipède », stage de deuxième année de l'Ecole Centrale de Lille.

9.5 Enseignement

- C. Samson et P. Rives sont membres de la 61^e Commission de Spécialistes de l'Université de Nice - Sophia Antipolis.

- DEA ARAVIS (Algorithmique, Robotique, Automatique, Vision par ordinateur, Image et Signal) de l'Université de Nice-Sophia Antipolis. C. Samson est responsable du thème « Robotique » comportant trois modules d'enseignement de quinze heures chacun. P. Rives est responsable du module d'enseignement *Introduction à la commande de robot*. Les membres du projet enseignent au sein de ce DEA les cours suivants :
 - *Introduction à la commande de robot* (P. Rives 6 heures, P. Morin 9 heures),
 - *Introduction à la commande de robots mobiles sur roues* (C. Samson 6 heures),
- *Autres enseignements*
 - *Commande Référencée Capteur*, CTI de Campinas (Brésil), (P. Rives 15 heures)
 - *Vision industrielle*, École Nationale des Télécommunications de Bretagne (P. Rives 3 heures),
 - *Commande de Robots*, INSTITUT SUPÉRIEURE D'INFORMATIQUE ET D'AUTOMATIQUE (ISIA), Sophia-Antipolis, (P. Morin 18 heures),

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] 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, May 28 - 30 1996.
- [4] C. SAMSON, M. LEBORGNE, B. ESPIAU, *Robot control. The Task Function approach*, Oxford Engineering Series, 22, Oxford University Press, 1991.
- [5] 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.).
- [6] 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.

Articles et chapitres de livre

- [7] A. DE LUCA, G. ORIOLO, C. SAMSON, « Feedback control of a nonholonomic car-like robot », in: *Robot Motion, Planning, and Control*, J.-P. Laumond (éditeur), *Lecture Notes in Control and Information System*, 229, Springer-Verlag, 1998.
- [8] 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 », p. 22-49, <http://epubs.siam.org/sam-bin/dbq/toc/SICON/38/1>.
- [9] P. MORIN, C. SAMSON, « Control of nonlinear chained systems: from the Routh-Hurwitz stability criterion to time-varying exponential stabilizers », *IEEE Trans. on Automatic Control (tech. note)*, 1999, à paraître.

- [10] 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.
- [11] P. MORIN, C. SAMSON, *La Robotique Mobile*, Hermes, 1999, ch. Commande, à paraître.
- [12] P. MORIN, C. SAMSON, « Robust point-stabilization of nonlinear affine control systems », *in : Stability and Stabilization of Nonlinear Systems*, F. Lamnabhi-Lagarrigue et A. van der Schaft (éditeurs), *Lecture Notes in Control and Information System*, Springer-Verlag, 1999.
- [13] P. RIVES, M. DEVY, *La Robotique Mobile*, Hermes, 1999, ch. Perception, à paraître.
- [14] D. TSAKIRIS, P. RIVES, C. SAMSON, « Extending Visual Servoing Techniques to Nonholonomic Mobile Robots », *in : The Confluence of Vision and Control*, D. Kriegman (éditeur), *Lecture Notes in Control and Information System*, Springer-Verlag, 1998.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [15] D. LIZARRAGA, P. MORIN, C. SAMSON, « Non-robustness of continuous homogeneous stabilizers for affine control systems », *in : IEEE Conf. on Decision and Control*, décembre 1999.
- [16] M. MAINI, P. MORIN, J.-B. POMET, C. SAMSON, « On the robust stabilization of chained systems by continuous feedback », *in : IEEE Conf. on Decision and Control*, décembre 1999.
- [17] P. MORIN, J.-B. POMET, C. SAMSON, « Design of homogeneous time-varying stabilizing control laws for driftless controllable systems via oscillatory approximation of Lie brackets in closed loop », *in : IEEE Conf. on Decision and Control*, décembre 1999.
- [18] P. RIVES, J.-L. SEQUEIRA, P. LOURTIE, « Localization and Map Building for a Mobile Robot », *in : ISER99 Int. Symposium in Experimental Robotics*, Sydney, Australia, March, 27-28 1999.
- [19] D. TSAKIRIS, « Nonholonomic Robot Stabilization by Vision-based Time-varying Controls », *in : Proc. of Nonlinear Control Network Pedagogical School*, p. 381–398, Athènes, Grèce, 6 - 10 septembre 1999.

Divers

- [20] D. TSAKIRIS, P. RIVES, J.-J. BORRELLY, C. SAMSON, « Extending Visual Servoing Techniques to Nonholonomic Mobile Robots », 1998, UCIS Audiovisuel.