

LAPIERRE Lionel

Campus St Priest - BAT 5
860 rue de St Priest
34095 Montpellier cedex 5
lapierre@lirmm.fr

FICHE DE SYNTHÈSE
(en vue de l'obtention de l'HDR)

Maitre de Conférence LIRMM / Polytech Montpellier

Marié
3 enfants
44 ans
Français

FORMATION

- 1996-1999 Doctorat de l'Université Montpellier II**
Spécialité robotique, soutenu le 26 Novembre 1999.
'Etude et réalisation de la commande hybride position/force d'un robot sous-marin équipé d'un bras manipulateur'
- 1995-1996 DEA SyAM de l'Université Montpellier II**
Systèmes Automatique et Microélectronique, option Robotique.
'Recalage automatique avec un capteur 3D'

EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

- 2008 – Enseignant-Chercheur (MdC), Polytech-Montpellier**
Aujourd'hui Robotique sous-marine, application à l'exploration Karstique, l'archéologie sous-marine et la biologie marine.
- 2003-2008 Chercheur contractuel au LIRMM, Montpellier**
Conception de véhicules autonomes marins et direction des missions
Architecture de contrôle d'AUV
Navigation, Guidage et Commande de flottille de robots marins hétérogènes
Locomotion anguilliforme
Contrôle combiné suivi de chemin/évitement d'obstacles de robots non-holonomes
- 2000-2003 Post Doctorant à l'ISR / IST de Lisbonne (Portugal)**
Contrôle, guidage et déploiement des AUV Infante et ASC Delfin
Contrôle coordonné multi véhicules

PUBLICATIONS

Ouvrages	3	ARS, In-Tech
Revue	14	OE, IJRR, JOE, JRNC, RINA, JRS, RAM, JFR, AuRo, TII, RAS
Conférences	34	CDC, ECC, ICRA, ICAR, IROS, OCEAN, SYROCO, MED, MCMC, GCUV

ENCADREMENTS

Thèses	6	X. Xiang (2008-2011), A. Lasbouygues (2012-2015), B. Ropars (2012-2015), L. Jaïem (2013-2016), S. Louis (2014-2017), R. Hamdi (2013-2016),	direction : B. Jouvencel direction : D. Andreu direction : D. Andreu direction : D. Crestani direction : R. Zapata direction R. Zapata
Ingénieurs	12		
Master 2	6		

RELATIONS ET PROJETS INTERNATIONAUX**Projets européens**

- FREESUB (5°PCRD) Manipulation sous-marine autonome
US (GB), CEA, Ifremer, Cybernetix (FR), JRC (IT), IST (P), DUTH (GR)
- MEDITATE (5°PCRD) Exploitabilité de sources d'eau douce marines
LIRMM, BRGM (FR), Cranfield University (UK), Pridesa (ES), UKAM (TK), WERSC (JD), ESIB CREEN (LB), AECS (SR)
- FREESUBNET (6°PCRD) Faisabilité de missions ss-marines complexes
IST (P), CEA, Ifremer, Cybernetix, LIRMM (FR), US, OSL (UK), NTNU (NO), UdG (ES), CNR,

- JRC (IT), UCV (RO), HCMR (GR)
- UNION (4°PCRD) Télé-opération sous-marine
LIRMM (FR), LBM (DE)
- 2 Accords bilat. de collaborat° Nav., Guid. et Com. de flottilles hétérogènes
CNR/CNRS
LIRMM (FR), CNR (IT)
- Accord de coopération tripartite Robotique pour l'archéologie sous-marine
CNR/CNRS/FCT
LIRMM (FR), CNR (IT), IST (P)

Projets nationaux

- Wacif (RNTL) Suivi de chemin et évitement d'obstacle coordonnés
- Panache (RITEAU) Identificat° et évaluat° des panaches d'émerg^{nces} karst^{ques} ss-marines
- Robot Anguille (ROBEA) Contrôle d'une locomotion anguilliforme
- REI (DGA) Positionnement d'un AUV en pleine eau
- C-Flam (ANR) Contrôle d'une flottille d'engins marins hétérogènes

Relations scientifiques hors projet

- IST – Lisbonne, Portugal Contrôle de flottilles d'engins sous-marins
- Univ. de Lecce – Lecce, Italie Contraintes de saturation des actionneurs
- CNR ISSIA – Gênes, Italie Comm. Coododnnée d'engins marins

ANIMATIONS SCIENTIFIQUES

Conférences et revues internationales

IPC Member IAV 2010, Lecce, Italie	2010
Chairman MCMC'06, CMM'06, Brest, France	Sept/Oct2006
IPC Member MCMC'06, Lisbonne, France	Sept.2006
Consultant Editorial pour le journal Advanced Robotic Systems	Jan. 2007
Re-lecteur des revues JFR (Wiley) et JOE (Wiley)	Jan. 2006
Evaluateur prix Roberval (21 ^{ième} édition – UTC Compiègne)	2007

Tables Rondes et séminaires

GDR MACS, Journées MOSAR, Montpellier, séminaire	Nov. 2006
Condition d'essais et de mise en œuvre en RSM, Brest	Oct. 2006
Concours AUV EuroSub, Paris	Sept. 2005
Workshop MEDITATE, Beyrouth, Liban , séminaire	Mars 2005
Workshop FREESUB, 5 réunions et 4 séminaires	2000-2003

Séjours à l'étranger

ISSIA – Gênes, Italie	Accord CNR/CNRS	1 sem.	Déc. 2006
OSL – Edimburgh, Ecosse	Accord EIERO	1 sem.	Mars 2004
IST – Lisbonne, Portugal	Proj. Européen FreeSub	3 ans	2000-2003
LBM- Munich, Allemagne	Proj. Européen Union	6 mois	1998

Responsabilités scientifiques

Membre du conseil scientifique du LIRMM	2015
Montage et conduite du projet REEA	2012
Membre du comité de pilotage du LABEX NUMEV	2012
Montage du renouvellement du projet bilatéral CNR/CNRS	2007
Montage du projet européen FREESUBNET	2006
Montage du projet bilatéral CNR/CNRS	2006
Responsable scient. des WP3 et 4 du projet européen MEDITATE	2004-2005

Participation à 8 jurys de thèse

A. Puttipipatkajorn (2005), T. Salgado (2004), J.M. Spiewak (2007), A.E. Jalaoui (2007), O. Parodi (2007), A. Belbachir (2011), L. Zhang (2010), X. Xiang (2011).

ACADÉMIE DE MONTPELLIER
UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

HDR

présentée au Laboratoire d'Informatique de Robotique
et de Microélectronique de Montpellier pour
obtenir l'Habilitation à Diriger les Recherches

Spécialité : **Robotique**
Formation Doctorale : **SyAM**
École Doctorale : **Information, Structures, Systèmes**

**À la recherche de Garanties de Performances en Robotique
Mobile
Application au contexte sous-marin**

par

Lionel LAPIERRE

Version du 27 juillet 2015

Rapporteurs

M. Rogélio LOZZANO, Dir. de Recherche Heudiasyc, Université de Technologie de Compiègne
M. Simon LACROIX, Directeur de Recherche LAAS, Université de Toulouse
M. Luc JAULIN, Professeur ENSTA, Université de Bretagne Sud

Examineurs

M. René ZAPATA, Professeur LIRMM, Université de Montpellier
M. David ANDREU, Maître de Conférence LIRMM, Université de Montpellier
M. Antonio PASCOAL, Professeur ISR, Instituto Superior Técnico, Lisbonne, Portugal
M. Massimo CACCIA, Professeur ISSIA, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bari, Italie



Table des matières

Table des matières	i
1 Introduction	1
1.1 Diriger les recherches	1
1.2 Les enjeux de la robotique mobile	3
1.3 Garantir des performances	6
1.4 Organisation du document	8
2 Itinéraire et rencontres	11
2.1 Le 3 ^{me} cycle : 1996 – 2000	11
2.2 Le post-doc : 2000-2003	12
2.3 Les contrats : 2003-2008	13
2.4 Explore : 2008–Aujourd’hui	13
2.5 Implications dans les projets	15
3 De l’Automatique...	21
3.1 De l’unicycle...	21
3.2 ...à l’AUV	23
3.3 Le suivi de chemin	26
3.3.1 Inclusion de la limitation des actionneurs	28
3.3.2 Evitement d’obstacles	29
3.3.3 Généralisation à la flotte	33
3.3.4 Retour sur la stabilisation	36
3.3.5 Dynamique et Robustesse	38
3.3.6 Etage d’actionnement	40

3.4	La commande NGC	41
4	... à l'Implémentation	49
4.1	Le contexte d'exécution	49
4.2	Le processus d'implémentation	53
4.2.1	Algorithmique et Automatique	54
4.2.2	Architectures logicielles	55
4.2.3	Contrôle de mission et Commutations de modes	63
5	Le projet REEA	65
5.1	Génèse	65
5.1.1	Partenaire industriel : CISCREA	66
5.1.2	Partenaires académiques : HSM et Marbec	66
5.1.3	Client : CENOTE	67
5.1.4	Donneur d'ordre : Montpellier Métropole	68
5.2	Le projet Karst	69
5.2.1	Principes	69
5.2.2	Avancement du projet	70
5.3	Le projet MDA : <i>Marine Diversity Assessment</i>	73
5.3.1	Principes	74
5.3.2	Avancement du projet	74
5.4	Le projet Archéo	74
6	Conclusion et Perspectives	77
7	Annexes	81
7.1	Encadrements	81
7.1.1	Encadrements de thèse	81
7.1.2	Encadrements d'élèves ingénieurs et master 2	84
7.2	Enseignement	88
7.2.1	Polytech Montpellier	88
7.2.2	Responsabilités	92
7.3	Bibliométrie	93
7.3.1	liste des publications en revues internationales avec comité de lecture	93
7.3.2	liste des publications soumises en revues internationales avec co- mité de lecture et en attente d'acceptation	95
7.3.3	Liste des publications en conférences internationales avec comité de lecture	95
7.3.4	Conférences nationales, avec comité de lecture	99
7.3.5	Chapitres d'ouvrages	100
7.4	Animation Scientifique	101

TABLE DES MATIÈRES

iii

7.4.1	Participation à des jurys de thèse	101
7.4.2	Le LABEX NUMEV	102
7.4.3	Le conseil scientifique du LIRMM	102
Bibliographie		103
Bibliographie		103

Introduction

Embrasser la carrière scientifique académique est un privilège qu'il faut savoir reconnaître. Cela permet d'entretenir cette illusion enfantine qui voudrait que tout soit possible par la simple force de l'esprit. Le gamin se jette des défis insurmontables, à éviter les lignes d'un trottoir bétonné ou battre un impitoyable simulateur de voitures, motos, avions, combats urbains... Le scientifique s'intéresse plutôt à une absconse relation mathématique, dont il pressent les charmantes propriétés à établir, mais l'énergie qu'il y consacre tient de la même veine. Une utopie que l'organisation de la recherche doit continuer à entretenir.

1.1 Diriger les recherches

Chercher est un exercice spéculatif qui produit des 'visions' particulières du monde, qu'on soit poète, musicien, scientifique ou jardinier. Chaque discipline a ses règles. Celles relatives à la recherche scientifique tiennent à l'objectivité, la rigueur, l'éthique et l'intelligibilité. Leur respect conduit à produire des résultats critiquables qui, après acceptation par les pairs, deviennent de nouvelles *connaissances* scientifiques. Un étrange exercice qui consiste à découvrir ce qui, somme toute, pré-existait. L'archéologue ne crée pas, il met à jour et spéculé. L'automaticien, le physicien, le sociologue font de même. L'artiste crée, pas le scientifique. Il ouvre des sentiers dans son propre champ disciplinaire, s'aventure parfois sur des terrains adjacents, et propose sa vision particulière pour qu'elle intègre et complète un *modèle* cohérent du monde, une fois admis par sa communauté.

Cependant, en tant que science appliquée, la robotique requiert la concrétisation de l'exercice *spéculatif* en un système physique : le robot. Un complément *opératif* qui fait de la robotique une science bien singulière. L'exercice est passionnant - ceux qui me liront en sont certainement déjà convaincus - et il faut qu'il le reste.

Le contexte dans lequel l'exercice de la recherche académique s'effectue a considérablement évolué. Dorénavant, la mission du chercheur intègre un lourd aspect comptable, qu'il soit financier, bibliométrique ou encore sur la gestion de son temps. Remplir des feuilles de temps ou parader dans des salons d'investisseurs ne font pas partie de la mission première du chercheur, mais deviennent des compétences requises. D'aucuns le regrettent, mais c'est une réalité avec laquelle il faut vivre, et soulignons que nombre d'autres professions ont suivi cette évolution. La société demande des comptes, tant au niveau financier qu'en termes de valorisation, en particulier pour la discipline appliquée qu'est la robotique.

L'activité du chercheur se définit maintenant à l'échelle du *projet*, porté par un consortium - partenaires académiques et privés, industriels ou financeurs - qui doit, autant que faire se peut, assurer que chacun travaille au cœur de son domaine de compétences. De plus, ce projet doit répondre aux attentes sociétales, éventuellement les devancer, et afficher une pertinence irréprochable quant à l'intérêt de son existence. Enfin, il est une facette de la mission du chercheur qui donne à ce projet une particularité unique : celle de la transmission des savoirs, depuis l'animation scientifique jusqu'à l'enseignement, doctoral ou de second cycle, pour les enseignants-chercheurs. L'implication de doctorants et de stagiaires est souvent essentielle et confère une métrique particulière à la conduite du projet, celle du temps de formation. Il est essentiel que chaque membre du consortium ait compris et accepté les attentes de tous.

On pourrait définir cinq grandes qualités qu'un tel projet se doit d'avoir :

- Produire de nouvelles connaissances et les transmettre, mission première du chercheur.
- Ouvrir de nouveaux axes de recherche, et pour se faire, décroiser les disciplines, écoles ou courants de pensées.
- Impacter les territoires, locaux et internationaux, dans leurs attentes socio-économiques et leur identité.
- Réunir les personnes de bonne volonté, identifier les intérêts de chacun, et les solliciter dans leurs domaines de compétences.
- Lever des fonds, ce qui devrait se résumer à une question technique sur le choix des guichets et la rédaction des contrats de collaborations, académiques et industrielles, si cette alchimie prend...

Dorénavant, diriger les recherches, c'est organiser ce nouveau terrain professionnel, et y accomplir ses missions premières : mettre à jour de la connaissance et la transmettre.

1.2 Les enjeux de la robotique mobile

La robotique mobile s'est longtemps cherchée, à l'ombre des succès de ses nombreuses disciplines sœurs, dont entre autres les robotiques manufacturières et médicales qui permettent d'accomplir quotidiennement - ce que ma génération considère encore comme - des exploits. Les machines parallèles optimisent les cadences de production ; on opère maintenant des coeurs sans plus devoir les arrêter ; on réhabilite les fonctions perdues de personnes handicapées... Autant de branches de la robotique pour lesquelles les résultats de laboratoire ont trouvé les applications que la société civile attend, ou dont elle découvre le besoin. On ne peut en dire autant de la robotique mobile, bien qu'on nous promettait, il y a vingt ans, des voitures qui volent. Certes, *Curiosity* visite Mars et *Philaé* s'arrime à sa comète, mais au quotidien, les robots mobiles sont encore discrets. On attend pourtant de la robotique mobile qu'elle produise des objets qui colonisent la société civile, comme l'ordinateur individuel l'a fait il y a trente ans, se répandant viralemment dans les foyers, les voitures, les poches et sacs à mains de tout le monde. Ces petits objets que sont, pour l'exemple, le Roomba¹ et l'AR.Drone² (Parrot), cumulant près de 10 millions de ventes en seulement 10 ans, en sont les premiers exemples. Ils témoignent d'une maturité technologique certaine, ouvrant des champs applicatifs qui n'ont pour limite que l'imagination. Notons qu'ils ont pu ainsi percer ce marché naissant de par, bien sûr, leur reproductibilité et surtout leur petite taille et leur cinématique réduite, garantissant leur innocuité. Lâcher des robots autonomes au milieu des gens requiert certaines garanties que la robotique n'est pas encore en mesure de fournir. Il pourrait être démontré que l'usage généralisé de voitures autonomes réduirait massivement le nombre de victimes de la route. Mais malgré cette hypothétique démonstration, cette perspective ne sera envisageable que lorsque la question de la responsabilité sera juridiquement résolue, autre forme de garantie. Vaste programme qui, pour l'anecdote, trouve un début de solution dans le contexte de la robotique marine, saluons à ce titre les travaux de l'Ifremer sur le principe du 'faire au mieux'³. Notre société est en quête de garanties, la robotique mobile devra en fournir. Pour cela elle dispose des puissants outils des corpus de l'automatique et du génie du logiciel, mais recèle des particularités qui en font un champ disciplinaire distinct et singulier.

Toujours est-il que le temps passé à murir auprès de ses grandes sœurs, la robotique mobile a permis de poser tout un ensemble de questions théoriques qui ont passionné des générations d'automaticiens. Que faire de cette non-holonomie ? De ces non-linéarités

1. <http://www.humanoides.fr/2013/07/25/marche-des-robots-aspirateurs-japon-france/>

2. <http://frenchweb.fr/zoom-sur-ar-drone-2-parrot-zik-les-produits-stars-de-parrot-en-2012/101410>

3. Le 16 octobre 2006, dans le cadre de la Sea Tech Week de Brest, le GESMA et IFREMER ont organisé un workshop sur le thème « les conditions d'essais et de mise en œuvre des robots sous-marins et de surface ». L'objectif premier de ce workshop était de réunir la communauté des acteurs de la robotique navale afin de partager leurs expériences et identifier les difficultés qui peuvent faire l'objet d'actions communes. En particulier, les aspects juridique et de sécurité, qui sont de nature à affecter toute la communauté, ont fait l'objet d'une attention particulière.

structurelles qui rendent caduques les approches conventionnelles? On sait maintenant fabriquer des structures hyper-redondantes qui imitent le vivant, de l'anguille artificielle au robot humanoïde, qu'on pressent pouvoir atteindre des performances inégalées en termes de rendement propulsif et de manœuvrabilité. Mais que faire pour que ces machines, en dehors du singulier objet d'étude qu'elles représentent pour l'automaticien, deviennent des robots compagnons, secouristes, archéologues, biologistes marins ou encore coursiers aériens? La diversité des applications sur lesquelles la robotique mobile est attendue impose un défi nouveau : *la polyvalence* qui, rigoureusement considérée, impacte profondément les architectures matérielles, logicielles et algorithmiques du robot mobile.

Avec de telles perspectives, la conception d'un robot mobile requiert d'agréger de nombreuses compétences complémentaires, de faire converger les visions de l'automaticien, de l'informaticien, du mécanicien, de l'électronicien et bien sûr celle de l'utilisateur. Le rôle de l'automaticien est de proposer des solutions de régulation (lois de commande), basées sur le modèle qu'il se donne du système, et d'invoquer divers principes mathématiques pour *garantir* certaines propriétés à son modèle asservi, dont l'essentielle : la *stabilité*. Le recours à la rigueur mathématique aide aussi, voire surtout, à aiguiller la conception de la loi de commande, en fonction d'un critère à préserver. Les questions de robustesse, d'incidence de perturbations bornées et d'imprécision bornée des mesures, sont ainsi traitées (la considération des effets de la dynamique non-modélisée requiert une attention particulière, nous y reviendrons). Toujours est-il qu'avec un modèle crédible, mais aux paramètres imprécis, l'automaticien est (parfois) en mesure de proposer une loi de commande qui confère au système une garantie de convergence pratique. Aussi appelée convergence BIBO⁴, elle garantit que le système converge vers et demeure dans un voisinage défini de son objectif. Une garantie forte, qu'on aimerait bien pouvoir attribuer au robot lui même, plutôt qu'à son modèle. Mais propager cette garantie, et en étudier le devenir, au travers de tout le processus d'implémentation (depuis la traduction algorithmique, son déploiement au sein d'une architecture logicielle, elle-même portée par des unités de calculs qui pilotent aussi capteurs et actionneurs...) est une question essentielle, et un défi pour l'automaticien qui devra nécessairement s'ouvrir au savoir des autres disciplines. Ces dernières ont des approches complémentaires, parfois des éléments théoriques communs, mais restent souvent cloîtrées au fond d'une chapelle disciplinaire qu'il est bien difficile de rejoindre. La démarche transdisciplinaire n'est reconnue que depuis peu, publier peut être encore un chemin de croix pour celui qui s'engage dans cette voie. Et pourtant, la transdisciplinarité est inévitable pour ce qui concerne la robotique mobile. Avec la mobilité, vient la question de la limitation des ressources, e.g. énergétiques, relatives aux capacités sensorielles et de calculs, ou encore en termes d'accès limité à des informations issues d'un tiers (autre robot ou opérateur), du fait de la limitation des ca-

4. *Bounded Input, Bounded Output*

pacités de communication, question essentielle pour le cas sous-marin. Les points de vue de chaque spécialiste (automaticiens - du contrôle et de la planification - génie du logiciel, électronicien, mécanicien, traiteur du signal...) participant à la conception du système doivent converger vers une cible unique, et les capacités du robot mobile dépendront des *performances* des solutions de chacun et de leur *composition*. La complémentarité des approches est essentielle, mais délicate à mettre en oeuvre. La robotique puise ses fondements dans l'automatique, et doit par la suite intégrer les solutions et concepts des disciplines connexes, pour enfin réaliser un système physique qui réponde aux objectifs avec éventuellement des *garanties*, terme que nous déclinerons plus loin. Mais à nouveau se pose la question de la multitude de ses objectifs. Volant, sous-marin, terrestre, spatial ou fouisseur, le robot mobile évolue dans des environnements qui apportent tous des contraintes différentes. Il est, pour l'instant encore, illusoire d'espérer définir des concepts généraux sur une bonne conception du robot qui s'applique indépendamment de son milieu d'évolution, et surtout des objectifs applicatifs auxquels il doit répondre. Car il est une dimension essentielle au problème que l'on ne peut plus ignorer, celle de l'*utilisateur*. La robotique pour la robotique amuse le roboticien, j'en suis, mais la société nous demande de faire mieux. L'utilisateur est l'acteur qui définit les besoins et, au final, la raison d'être du système. Il est de plus celui qui met en oeuvre, sur un terrain qu'il connaît, ou du moins sur lequel il a identifié un défaut de connaissance et pour lequel il conçoit une stratégie d'investigation, à laquelle le système, dans la mesure du possible, devra se conformer. L'expertise humaine est, et restera, irremplaçable. La singularité⁵ restant encore lointaine, c'est encore l'humain qui fixe les objectifs. Et de la place qui lui sera réservée au sein de l'architecture du système, dépendra la qualité des services que la machine pourra lui rendre. C'est par l'ouverture à *l'application* que le problème généralement complexe deviendra soluble et spécialisera le système aux attentes de l'utilisateur, de l'industrie, de la société civile.

Cette spécialisation peut profondément affecter la solution canonique de l'automaticien. Elle doit pouvoir se saisir de l'ensemble des connaissances exploitables de l'utilisateur : modèles, dynamiques et/ou *a priori*, objectifs, outils d'analyse, stratégies. Le garder dans la boucle de commande peut s'avérer d'une aide précieuse, mais implique des capacités de communication et d'*autonomie adaptative* encore loin d'être atteintes, en particulier dans le contexte sous-marin. Il faut donc pouvoir embarquer au mieux les intentions et capacités d'analyse de l'utilisateur. Ici, la transdisciplinarité est à l'oeuvre et prépare le terrain. Si l'utilisateur est un scientifique qui exploite des modèles mathématiques de données mesurables ou observables, ses objectifs peuvent, éventuellement, résulter en une question de *guidage* répondant à une fonction de coût, pour une identification paramétrique (observation du modèle) ou une navigation éclairée (exploitation du modèle). Il s'agit là de la vision 'automaticienne' du problème, elle permet de formuler la question de la garantie de performance en conditions mathématiques vérifiables. L'automaticien concevra donc

5. http://fr.wikipedia.org/wiki/Singularité_technologique

un système de régulation, une suite algorithmique, dont l'exécution (idéale) vérifiera ces conditions. Cependant, les objectifs de l'utilisateur ne sont pas toujours exprimables sous une forme exploitable par l'automaticien. De plus, cette hypothétique solution exprimée dans le repère des 'intentions de l'utilisateur' – que par commodité on va imaginer décomposable en une suite de tâches réalisables par le système – va amalgamer l'ensemble des paramètres du système et des modèles qu'il embarque, pour une solution certes élégante du point de vue mathématique, mais incomplète car conçue par le seul prisme de l'automaticien. L'objectif du roboticien n'est pas seulement d'assurer la régulation d'un système dynamique, il doit aussi l'ouvrir, autant que faire se peut, aux intentions et objectifs de l'utilisateur, plutôt des utilisateurs, dans toute leur diversité. Faisons des robots hydrogéologues, archéologues, biologistes marins. Servons nous de la science et des bonnes pratiques de nos collègues pour y voir plus clair dans la notre. C'est par l'intégration de leurs problématiques que se dessinera l'architecture du système fiable, polyvalent, et structuré pour les applications qu'on attend de la robotique mobile.

En résumé, telles sont les préconisations qu'on pourrait faire pour que la robotique mobile engendre le saut technologique que l'on attend d'elle :

- **L'humain**, opérateur, utilisateur ou 'charge' doit trouver sa place dans le système.
- La confrontation à la diversité des problématiques applicatives mènera à la **polyvalence** du système.
- Le système doit offrir des **garanties de performance**.

Un vaste programme, qui fait plonger le roboticien dans de nouveaux abîmes de réflexion.

1.3 Garantir des performances

Le terme a différentes significations, suivant le contexte. L'automaticien s'appuie sur des propriétés mathématiques fortes, pour garantir la stabilité d'un système, sa vitesse de convergence, l'uniformité de cette dernière, ou encore l'existence d'une borne supérieure à son erreur asymptotique. Il attribue ainsi au système des propriétés GEC, GUAC, GAC, BIBO⁶... Garantir implique aussi, et surtout, de pouvoir relâcher les contraintes lorsque cela s'avère nécessaire, et possible, sinon détecter les situations dans lesquelles elles ne sont plus applicables, et agir en conséquence. Mais pour cela, l'automaticien s'entoure d'hypothèses lourdes : sur la précision des modèles, des perturbations bornées, une gestion éclairée des commutations, la continuité de l'action du contrôle, des actionneurs disciplinés, des capteurs obéissants, le tout porté par une architecture logicielle docile.

6. *Global Exponential Convergence, Global Uniform and Asymptotic Convergence, Global Asymptotic Convergence, Bounded Input Bounded Output*. qui pourraient être vus comme les critères de performance de la stabilité.

L'automaticien garantit ainsi la stabilité du - modèle qu'il se donne du - système. La performance associée est la qualité de la convergence du système vers son objectif, considérant des hypothèses, si possible vérifiables, sur l'environnement de sa loi de commande, incluant la considération de l'ensemble des périodes d'échantillonnage des mesures, voire leur sporadicité. Ainsi la problématique de la robustesse se trouve augmentée des questions sur la variabilité de ces périodes, la gigue, et sur la réactivité 'opportuniste' de la commande, i.e adaptation du critère de convergence et gestion de la commutation des lois de commande associées. C'est une question clef qui défie à la fois les automaticiens et les informaticiens, et pour laquelle la robotique devra trouver une réponse.

Avec l'étape de transformation des équations de la loi de commande en algorithmes, vient la question de la discrétisation du processus de commande et de la quantification de ses effets sur les garanties précédemment établies. Le problème est complexe. Quelles garanties établir à ce stade? Une garantie de stabilité, en revisitant la solution d'origine à l'aune de l'automatique discrète. Les outils pour approcher cette question sous l'angle non-linéaire manquent. Mais imaginons un instant que la précédente solution (continue) ait été réécrite, les hypothèses adaptées et augmentées d'une plage de périodes auxquelles exécuter le contrôle et ses commutations, le tout garantissant la stabilité du système. Alors, les performances en jeu seront similaires aux précédentes, auxquelles s'ajoute l'étendue de cette plage temporelle, et la bonne gestion des commutations.

Ces algorithmes viennent ensuite s'exécuter sur l'(es) unité(s) de calculs du système, suivant la partition portée par l'architecture logicielle et l'orchestration qu'en fait le système d'exploitation. Sont recherchées alors des garanties temporelles d'exécution, assurant que des données suffisamment 'fraîches' soient produites, et conduisent à une mise en musique cohérente (stable) des composants physiques du système. Ainsi les 'intentions logicielles' prennent corps au sein de l'architecture physique du système, en accord avec les conditions relatives aux hypothèses faites par l'automaticien.

L'architecture physique du système est enfin à considérer. Elle doit répondre aux attentes de la partition qui, globalement analysée, doit produire une liste de requêtes quant aux performances des composants que sont les capteurs, les calculateurs, les actionneurs, le réseau de communication, et toute l'électronique qui les assemble.

Mes travaux n'abordent pas la question du contrôle de 'haut niveau', étage décisionnel et planificateur dynamique de mission. Il est bien sûr indispensable et nous avons de brillants collègues qui s'y consacrent⁷. La garantie de performances s'exprime ici en termes d'ordonnancement (dynamique et sous contraintes de communications, pour

7. Il est vrai qu'au sein même de l'automatique, plusieurs écoles existent, dont celles du 'contrôle' et de la 'planification', un nouvel exemple de (sur)cloisonnement disciplinaire malheureux, mais les lignes bougent...

le contexte sous-marin), de gestion des commutations, de réactivité opportuniste et de tolérance aux fautes.

La recherche de garantie de performances impacte profondément non seulement l'ensemble du système, mais aussi les visions particulières que les spécialistes en ont. Elle confronte les *a priori* de chaque discipline à ceux des autres et crée un terreau fécond pour la transdisciplinarité. Non seulement à l'interface de l'automatique et du génie logiciel (sans compter l'électronique, la mécanique...), mais aussi vers l'utilisateur, sa science, ou du moins ses connaissances et expertise. Leur prise en compte implique de revisiter l'ensemble des architectures du système, de le spécialiser. De plus, cela soulève la question de la supervision, en lien avec des capacités de communication contextuellement variables pour le sous-marin.

Le contexte terrestre disposant de solutions de communication bien plus performantes, il permet d'aborder la question de la garantie de performances de manière plus aisée. L'inclusion au système des compétences de l'utilisateur (qu'on considère, pour l'exercice comme garanti lui aussi) en tant que superviseur de robot, mais aussi en tant que suppléant des fonctions fautives de ce dernier, peut conduire à une forme de garantie de réussite d'une mission simple, du moins réalisable intégralement par les moyens humains de l'utilisateur. Si le robot est en panne, il sera sur le pont. Le robot développant de nouvelles compétences, il ne fera plus que superviser. Cette vue simpliste, voire naïve, du problème, permet cependant d'exprimer des contraintes globales, à l'échelle de la mission, et le souci de leur respect devient un enjeu palpitant dans le contexte sous-marin.

Garantir les performances d'un robot, en action, constitue une forme de Graal pour la robotique mobile ; peut être encore inaccessible, mais qui mérite d'être recherché. De plus, c'est une quête qui passe par des champs disciplinaires si nombreux, qu'elle ne peut être que collective, et passionnante. Elle est le projet dans lequel je souhaite poursuivre mes travaux, en tant qu'enseignant-chercheur et directeur de travaux de recherche.

1.4 Organisation du document

Le prochain chapitre expose mon itinéraire professionnel et les rencontres qui l'ont aiguillé. Mes travaux scientifiques sont évoqués au cours des deux chapitres suivants. Le premier traite d'automatique appliquée à la commande de systèmes mobiles, terrestres et sous-marins. Le second expose mes réflexions sur la question de l'implémentation de la loi de commande. Il présente aussi mes travaux actuels et l'organisation que je leur donne. Le chapitre 5 expose la structure du projet que je poursuis. Les axes de recherche qu'il ouvre et l'impact sociétal qu'il prétend avoir y sont présentés. Le chapitre 6 comprend les annexes qui détaillent mes activités d'enseignant, les références bibliographiques de

mes travaux et brièvement mes activités en termes d'animation scientifique. Les cinq publications significatives tirées de mes travaux sont à retrouver à la fin du document.

Les renvois bibliographiques sous la forme [#*] font référence à des travaux personnels, à retrouver à la section 6.3.

Itinéraire et rencontres

La science, c'est la modélisation
du bon sens.

M. PRÉVOT

Le bac E en poche, de Nîmes à Montpellier, j'entame le cycle universitaire EEA et passe par le DEA SyAM en 1996, au LIRMM¹.

2.1 Le 3^{me} cycle : 1996 – 2000

Ma première expérience de recherche, en DEA sous la direction de B. Jouvencel, a consisté en un problème d'optimisation non-linéaire à implanter sur une cible DSP temps-réel d'acquisition d'images. Il s'agissait, par l'analyse des réflexions d'un plan laser, de reconstituer l'attitude des éléments cylindriques d'une scène sous-marine.

S'en est suivi la thèse, dirigée par P. Dauchez et encadrée par P. Fraisse, consacrée à la conception d'une commande hybride position-force pour la stabilisation d'une plateforme sous-marine, lorsque son bras est en action, au contact de l'environnement. Trois années à découvrir la pratique du métier, depuis la rédaction scientifique, la rigueur mathématique, et la *conspiracy of goodwill*² qui embrume l'objectivité avec laquelle inspecter ses propres résultats, dont la portée reste si réduite face au désir de découverte du jeune chercheur.

1. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier.

2. voir U. Nehmzow citant P. Medawar, dans [1]

Cheminant, on précise son propre ‘schéma du monde’, et fait d’heureuses rencontres. À l’instar des principes de la commande hybride externe, j’ai découvert le sérieux avec lequel la question de la simulation doit être traitée. Ce fût l’occasion de rencontrer D. Andreu, et les discussions d’alors ont fondé les bases de la posture scientifique que je défends ici.

2.2 Le post-doc : 2000-2003

Le Portugal, Lisbonne, je retrouve la robotique sous-marine au laboratoire DSOR³ du Professeur A. Pascoal. Ce fût une rencontre majeure. Dans ce que d’aucun appelle avec nostalgie la ‘liberté du post-doc’, j’évoluais dans un laboratoire de culture expérimentale, dirigé par un automaticien habité. Antonio vous amène à percevoir l’intuition d’A. Lyapunov en déclamant les Évangiles, affirme que la bonne recherche prend du temps, et ne baissera jamais les armes, en hommage à ce pauvre Giordano Bruno. De là, il vous conduit sur le terrain, en été aux Açores, sur les deux véhicules marins d’alors, Delfim et Infante. Deux joyeux drilles, catamaran et sous-marin autonomes, qui chevauchent l’océan, recueillant des données pour les biologistes marins de DOP⁴, et validant les lois de navigation, guidage et contrôle (Commande NGC) développées dans l’année.

Bien sûr ce laboratoire tient par la solide structure qui lie ses membres, que je salue au passage⁵. Cette heureuse expérience a été aussi permise par le projet Européen FreeSub⁶ et le réseau international qui s’est ouvert : M. Caccia, P. Willson, M. Athans, D. Lane, D. Yoerger, I. Kaminer... ont été des rencontres déterminantes.

Outre l’aspect relationnel extrêmement positif, j’ai découvert les horizons étourdissants de l’approche non-linéaire. De plus, la robotique marine emprunte grandement des termes et concepts au monde de la navigation maritime. Et il se trouve que ces marins, et dans bien des domaines, apportent un éclairage décisif à la sombre relation mathématique que le roboticien essaye de dompter. Ainsi j’ai découvert la structuration de la commande NGC, l’élégante formulation du suivi de chemin, les garanties qu’apporte l’approche non-linéaire et la portée de ses outils, les joies et affres de l’expérimentation ainsi que l’émulsion transdisciplinaire qui prend lorsqu’un roboticien et un biologiste marin marient leurs objectifs scientifiques.

3. Dynamical Systems and Ocean Robotics lab. Lisbonne, Portugal

4. Departamento de Oceanografia e Pesca, Universidade dos Açores, Horta, Portugal

5. António Manuel Santos Pascoal, Didik Soetanto, Paulo Jorge Ramalho Oliveira, Carlos Jorge Ferreira Silvestre, Luís Amorim Coelho Sebastião, Manuel Cecílio Rufino, Rita Maria Mendes de Almeida Correia da Cunha, Loïc Bamdè, Sergueï Rumiantzev, Dejan Milutinovic, Peter Weiss, David Labbé, Alex Alcocer, et bien d’autres.

6. Autonomous Underwater Vehicle for Subsea Intervention, EU-FP5-Human Potential Research Training Network No. HPRN-CT-2000-00032, 2000-2004

2.3 Les contrats : 2003-2008

17 au total. Outre la précarité de cette situation, partagée par beaucoup, j'ai eu la chance de travailler sur des sujets très divers, qui m'ont permis de parfaire mon approche scientifique.

Nous avons, avec R. Zapata, reformulé la question de l'évitement d'obstacles réactif (ZVD⁷ puis SMZ⁸) en principe de guidage, découplant ainsi la dynamique du système de la stratégie cinématique d'approche de l'objectif, dans un contexte non-linéaire permettant d'obtenir des garanties conjointes pour l'évitement et l'objectif primaire, exprimé sous la forme d'un suivi de chemin. Ce principe de suivi de chemin, à différencier de celui suivi de trajectoire, permet d'exprimer le système global sous une forme autonome, par le retrait de la contrainte temporelle. S'ouvrent alors les puissants outils de l'automatique des systèmes autonomes qui permettent de formellement démontrer le respect d'un critère de convergence global, uniforme et asymptotique (GUAC). Une analyse conservative de la solution permet, parfois, de garantir la convergence exponentielle (GEC) et pousser l'analyse jusqu'à établir les valeurs des gains du contrôle, en fonction des propriétés physiques d'un système non-holonyme de type unicycle, nous y reviendons.

La généralisation de cette approche au cas sous-actionné hyper-redondant d'un robot anguille a été ensuite abordée en collaboration avec B. Jouvencel et F. Boyer⁹. L'expression de la question de la génération et du contrôle du mouvement d'un tel système gagne à être exprimée sous une forme autonome.

Cette période a été aussi l'occasion de retrouver les partenaires du réseau FreeSub, au travers du projet Européen FreeSubNet¹⁰ pour lequel je suis intervenu au montage et comme responsable scientifique pour le LIRMM, et co-encadrant de la thèse de Xianbo Xiang, sous la direction de B. Jouvencel. Nous avons avec Xianbo traité de la question du contrôle en flottille d'engins marins et sous-marins autonomes, soumis à de sévères contraintes de communication. Xianbo est maintenant *associate professor* à la *Huazhong University of Science and Technology* (HUST, Wuhan, Hubei, Chine). Cette fructueuse collaboration se poursuit encore.

2.4 Explore : 2008–Aujourd'hui

Recruté Maître de conférences au LIRMM en 2008, j'ai intégré l'équipe NERO (Networked Robotics) qui, après 2 années de restructuration, est devenue EXPLORE. Mon rôle dans cette restructuration a été d'appuyer le caractère complémentaire des compétences des

7. Zone Virtuelle Déformable

8. *Safe Maneuvering Zone*

9. Soulignons au passage les travaux de F. Boyer sur non seulement la locomotion anguilliforme, mais aussi la transposition technologique du 'sens électrique' des poissons, et les perspectives applicatives inouïes que cela ouvre.

10. <http://www.freesubnet.eu>, MRTN-CT-2006-036186, 2006-2010

membres de l'équipe, et de travailler sur la définition de projets dont les défis scientifiques sous-jacents nécessitent une vision collective. Le thème de recherche qui a émergé et qui est maintenant porté par l'équipe est la Robotique d'Exploration de l'Environnement. Je dirige, en partenariat avec D. Andreu son volet sous-marin au travers du projet REEA : Robotique d'Exploration de l'Environnement Aquatique. Je reviendrai plus en détail sur la structure et les objectifs de REEA. EXPLORE se compose de 9 membres aux origines diverses et aux compétences complémentaires, ce qui nous permet d'appréhender nos sujets d'études conjointement sous les angles de l'automatique et du génie logiciel. L'enrichissement mutuel est une réalité quotidienne et je salue mes collègues, dont les compétences et l'ouverture d'esprit ont permis, eux aussi, d'enrichir le projet de recherche que je défends ici. Les publications conjointes et les divers co-encadrements de thèses témoignent de cette approche collective.

Avec, par ordre d'apparition :

- Bruno Jouvencel (PR UM) : initiateur de la robotique sous-marine au LIRMM, Bruno est automaticien et traiteur du signal. Il ouvre maintenant l'environnement aérien aux domaines applicatifs de l'équipe. Nous avons ensemble dirigé la thèse de Mr Xianbo Xiang, dont les résultats sont exposés plus loin. Bruno m'a par ailleurs permis de m'impliquer dans les travaux de ses autres doctorants (Amornrit Puttipipatkajorn, Thomas Salgado, Jean-Mathias Spiewak, Olivier Parodi). Ma participation à leur jury de thèse et les publications cosignées en témoignent.
- David Andreu (MdC-HDR UM) : David s'est volontairement positionné à l'interface de la robotique et du génie logiciel. Nos échanges m'ont permis de mettre en perspective le principe de la garantie de performance, que je n'avais alors qu'entrevue par le prisme de l'automatique. Cette vision conjointe permet d'étendre le champ d'application des garanties à l'exécution elle-même. Je co-encadre actuellement 2 thèses (Adrien Lasbouygues et Benoît Ropars) sous sa direction.
- René. Zapata (PR UM) : automaticien et père de la ZVD, René a posé des résultats majeurs dans le champ du contrôle réactif et de la navigation en robotique mobile. La formulation analytique de ses intuitions est précieuse. Il dirige actuellement la thèse (Sylvain Louis), que je co-encadre conjointement avec Karen Godary.
- Didier Crestani (PR UM) : issu de la modélisation d'entreprise, Didier s'est converti à la robotique mobile par son aspect architectural. Ses vues sur la gestion de ressources, compétences et rôles, supervision et planification dynamique apportent non seulement des outils d'analyse de faisabilité déterministes, mais surtout un regard nouveau sur des questions allant de l'architecture logicielle individuelle jusqu'à la gestion de flotte. Ses travaux traitent d'autonomie adaptative et de garantie de performances. Je co-encadre la thèse de Lotfi Jaiem sous sa direction.
- Karen Godary-Dejean (MdC UM) : l'expertise de Karen est la validation formelle et la tolérance aux fautes. Autres aspects essentiels de la garantie de performances que de

pouvoir détecter les fautes et défaillances du système, et agir en conséquence, suivant un schéma de commutation de plans formellement validé. A l'instar des systèmes à événements discrets, elle est aussi spécialiste de réseau. Deux domaines dans lesquels la garantie de performance prend un sens particulier. Ensemble, nous co-encadrons la thèse de Silvain Louis, sous la direction de R. Zapata.

- Jean Triboulet (MdC UM) : Jean est spécialiste de reconstruction multimodale. Aussi plongeur et archéologue, son faisceau de compétences lui permet d'avoir une vision 'environnée' de la question de la modélisation multi-échelle appliquée à l'archéologie sub-aquatique. Il pilote l'axe ARCHEO du projet REEA.
- Sébastien Druon (MdC UM) : depuis la robotique humanoïde et hexapode jusqu'aux BCIs¹¹, les thématiques de recherches de Sébastien couvrent un large spectre et lui confère une vision pragmatique, appréciée lors de nos débats scientifiques. De plus, formé à la rigueur japonaise, il maîtrise la gestion de projets collaboratifs à grande échelle et apporte les bonnes pratiques structurantes pour assurer la cohérence et la thésaurisation des productions scientifiques de l'équipe. Spécialiste de la vision, il s'intéresse aussi à la représentation sémantique de l'environnement, niveau d'abstraction supplémentaire pour répondre à la question des modèles d'environnement, et de leur exploitation.
- Pascal Lepinay (IR UM) : couteau-suisse, Pascal est ingénieur de recherche et apporte un réalisme bien utile pour concrétiser les fulgurances éthérées de ses collègues.

Les collègues précités constituent mon environnement de travail immédiat. Je ne saurais omettre les autres collègues du LIRMM, dont Frédéric Comby (MdC UM) avec lequel nous co-encadrons la thèse Rihab Hamdi, sous la direction de René Zapata, en cotutelle avec l'université l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir¹², et Robin Passama (IR UM) dont les travaux sur les architectures de contrôle nourrissent incessamment nos réflexions.

2.5 Implications dans les projets

J'évoque brièvement ci-dessous les projets dans lesquels je me suis impliqué et les rencontres déterminantes qui ont aiguillé ma carrière professionnelle. La majeure partie de ces collaborations se poursuit encore.

11. *Brain-Computer Interface*

12. ENIM : www.enim.rnu.tn

UNION	Sujet : UNderwater Intelligent Operation and Navigation
	Type : 4me PCRD
	Partenaires : Ifremer, INRIA, LIRMM, UPC, LBM, HWU, OU ¹³
	Dates : 1996-2000
	Implication : thèse

J'ai eu la chance d'effectuer mes premiers travaux de recherche dans l'environnement international du projet européen UNION. J'ai pu ainsi résider 6 mois au *Lehrstuhl B for Mechanics* ¹⁴ (LBM), sous la direction du Professeur Pfeiffer, de l'Université Technique de Munich (Allemagne). J'ai rencontré Johannes Kienner, alors post-doctorant au LBM, grace auquel j'ai pu finaliser la réalisation du simulateur physique du robot manipulateur sous-marin, dont le contrôle fait l'objet de mes travaux de thèse. Les publications [9*, 30* et 31*] en sont issues.

FreeSub	Sujet : Autonomous Underwater Vehicle for Subsea Intervention
	Type : 5me PCRD
	Partenaires : CEA, DUT, IST, JRC, Ifremer, UoS ¹⁵ .
	Dates : 2000-2004
	Implications : chercheur Post-Doc

J'ai eu la chance de rejoindre le projet européen FreeSub dès ses débuts. Il avait pour objectif d'étudier la faisabilité d'une manipulation sous-marine autonome. Post-doc au laboratoire DSOR ¹⁶, de l'IST à Lisbonne, j'ai eu l'immense plaisir de rencontrer Antonio Pascoal et son équipe. Durant trois années nous avons travaillé à l'étude de la commande (en suivi de chemin) du manipulateur mobile sous-marin. L'interaction entre les membres du projet était une réalité quotidienne, de par une réelle incitation à la mobilité des thésards et post-docs. Les nombreuses publications croisées en témoignent [10*, 11*, 13* et 32* à 39*]. Des travaux de FreeSub est sorti le principe de l'IAUV (*Intervention Autonomous Underwater Vehicle*), un véhicule hybride capable de répondre à une téléopération acoustique (sans câble), pour une tâche de manipulation, objet de la publication [10*]. Le concept a été ensuite développé dans le cadre du projet européen ALIVE ¹⁷.

13. UPC : Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne. HWU : Heriot Watt University, Edinburgh, UK. OU : Oxford University, Oxford, UK.

14. <https://www.lnm.mw.tum.de>

15. DUT : *Democritus University of Thrace*, Komotini, Grèce. IST : *Instituto Superior Técnico*, Lisbonne, Portugal. JRC : *the Joint Research Centre of the European Commission*, Ispra, Italie, UoS : *University of Southampton*, UK.

16. Dynamical Systems for Ocean Robotics : www.dsor.isr.ist.utl.pt

17. ALIVE a permis de démontrer le concept de l'IAUV. Les dernières (et enthousiasmantes) validations expérimentales sont rapportées en : [http://envlit.ifremer.fr/infos/actualite/2003/essais en mer mediterranee du vehicule alive](http://envlit.ifremer.fr/infos/actualite/2003/essais_en_mer_mediterranee_du_vehicule_alive)

FreeSubNet	Sujet : A European research network on key technologies for intervention autonomous underwater vehicles.
	Type : 6me PCRD
	Partenaires : IST, CEA, Ifremer, Cybernetix, LIRMM, UoS, OSL, NTNU, UdG CNR, JRC, UCV, HCMR, DOP, UH ¹⁸
	Dates : 2007-2011
	Implications : Montage et responsabilité scientifique

Le bilan très positif de FreeSub a conduit les partenaires à proposer un projet de plus grande ampleur. Ainsi FreeSubNet a réuni 15 partenaires autour de la problématique de la robotique d'intervention sous-marine. J'ai participé au montage du projet pour le LIRMM et à la direction scientifique des travaux de recherche, au travers de la thèse de X. Xiang et des divers stagiaires qui ont rejoint notre équipe. La grande taille de FreeSubNet (15 partenaires) en a fait un projet pilote au travers duquel les échanges ont été riches et harmonieux. Les chercheurs et jeunes chercheurs ont su créer une réelle dynamique de groupe dont le réseau est encore actif. Cependant, les contraintes logistiques et organisationnelles, liées à la taille du projet, ont été conséquentes et une des conclusions a été qu'on atteignait ici une taille limite au delà de laquelle il devient nécessaire d'engager des moyens de gestion spécifiques. Nos travaux sur ce projet ont donné lieu aux publications suivantes [3*, 5* à 7*, 14*, 17*, 18*, 21*, 23* et 25*].

Meditate	Sujet : Etude de l'exploitabilité de sources d'eau douce marines, par un AUV
	Type : 5me PCRD
	Partenaires : LIRMM, BRGM, CU, Pridesa, UKAM, WERSC, ESIB CREEN, AECS ¹⁹ .
	Dates : 2000-2004
	Implications : co-responsabilité scientifique (avec B. Jouvencel)

L'objectif du projet Meditate était de réaliser une démonstration expérimentale de l'emploi d'un AUV pour l'identification et la caractérisation de sources d'eau douce en mer. Les pays méditerranéens partagent une histoire géologique commune qui font de la

18. www.cybernetix.fr/. OSL : *Ocean System Lab*, dirigé par D. Lane de *Heriot Watt University*, Edinburgh, UK. NTNU : Norwegian University of Science and Technology, laboratoire dirigé par T.I Fossen, Trondheim, Norvège. UdG : Université de Gironne, laboratoire de P. Ridao, Gironne, Italie. National Research Council, laboratoire ISSIA de M. Caccia, Gênes, Italie. UCV : University of Craiova, Craiova, Roumanie. HCMR : Hellenic Centre for Marine Research Athènes, Grèce. DOP : Departamento de Oceanografia e Pescas, IMAR, Université des Açores, Horta, Portugal. Universität Hannover ; Institut für Werkstoffkunde, Hanovre, Allemagne.

19. BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières, www.brgm.fr, CU : Cranfield University, Cranfield (UK), Pridesa : Entreprise espagnole de désalinisation, racheté par Acciona, www.acciona.com, UKAM : *International Cultural Research Center, Istanbul, Turquie*, WERSC : *Water and Environment Research and Study Center*, Université de Jordanie, Amman, Jordanie, ESIB CREEN : Université Saint-Joseph, Beyrouth, Liban, AECS : *Atomic Energy Commission of Syria*, Damas, Syrie

question de la gestion de la ressource en eau une problématique partagée. Je suis intervenu dans la dernière année du projet et ai conduit les validations expérimentales en Turquie (Baie de Gokova, Bodrum, Turquie). Ce projet a permis de poser les bases de la question de la robotique d'exploration karstique, objet du projet KARST, de REEA, présenté plus loin.

ROBEA	Sujet : Robot Anguille
	Type : ROBEA
	Dates : 2003-2006
	Partenaires : MNHM, LMF, IRCCYN, LIRMM, GIPSA-Lab ²⁰ .
	Implications : responsabilité scientifique et co-direction avec B. Jouvencel.

Ce projet m'a permis d'aborder la question de la locomotion anguilliforme d'un système polyarticulé sous-marin. La rencontre avec F. Boyer et son approche de l'exploitation du sens électrique des poissons a été déterminante. Ces travaux ont donné lieu aux publications suivantes, sur la commande en suivi de chemin pour le robot anguille [40* et 41*]. Ces travaux sont toujours en chantier et leur extension au cas de la navigation dans un conduit karstique est très prometteuse.

PICS	Sujet : Navigat., Guid. et Com. de flotilles hétérogènes, évitement d'obstacles et navigation maritime
	Type : Accord de Coopération Bilatérale France-Italie n°19186 et son renouvellement n°21502
	Dates : 2006-2010
	Partenaires : LIRMM, CNR ISSIA ²¹ .
	Implications : Montage et responsabilité scientifique

La collaboration avec l'équipe du CNR ISSIA de Gênes, M. Caccia, M. Bibuli et G. Bruzzone, a porté sur la commande coordonnée d'engins marins. Nous avons pu valider expérimentalement les algorithmes de suivi coordonné de chemin sur les véhicules autonomes de surface (ASC), Charlie et Alanis. Cette fructueuse collaboration se poursuit encore. Elle a permis les publications suivantes [1*, 2*, 16*, 22* et 50*].

PICS	Sujet : Archéologie et robotique sous-marine
	Type : Accord de Coopération tripartite France-Italie-Portugal
	Dates : 2013-2016
	Partenaires : LIRMM, CNR ISSIA, IST DSOR.
	Implications : Montage et responsabilité scientifique

20. MNHM : Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris, LMF : Laboratoire de mécanique des fluides, Nantes, IRCCYN : Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes, LIRMM, GIPSA-Lab : Département d'Automatique de l'Université de Grenoble.

L'objectif de ce projet est de réunir les compétences des trois laboratoires partenaires sur la question de la robotique pour l'archéologie sous-marine. L'opportunité de réaliser des missions expérimentales en Bolivie, lac Titicaca, par notre intégration au projet Huiñamarca²², porté par C. Delaere²³ de l'ULB²⁴ a orienté nos travaux vers une démarche expérimentale qui nous a permis de saisir les problématiques 'métier' de nos collègues archéologues plongeurs. Les travaux sur cet axe sont encore en cours.

REEA	Sujets : KARST : Robotique d'Exploration de l'Environnement Karstique, MDA (<i>Marine Diversity Assessment</i>) : un vecteur d'observation polyvalent pour l'étude de la diversité marine, ARCHEO : Robotique pour l'archéologie sous-marine
	Type : Défi 'instrumentation aux limites' (CNRS), Labex Numev, CIFRE (CISCREA).
	Dates : 2010-2016
	Partenaires : HSM, CENOTE, CISCREA, MARBEC, CUFR Mayotte, ULB
	Implications : Montage, responsabilité scientifique et co-direction avec D. Andreu, K. Godary (Biologie-Marine) et Jean Triboulet (ARCHEO).

Ce projet est détaillé au chapitre 5.

22. <http://casa-titicaca.com>

23. Christophe est actuellement *aspirant*-chercheur au Centre de recherches de la Faculté de Philosophie et Lettres de l'Université libre de Bruxelles.

24. Université Libre de Bruxelles

De l'Automatique...

Dans ce chapitre, je présente l'évolution de mes réflexions et les principaux résultats qui la jalonnent. Ils fournissent les éléments de base sur lesquels mon actuel projet de recherche s'appuie.

3.1 De l'unicycle...

Lorsque qu'un génial mésopotamien est arrivé avec l'idée de la roue, il était très certainement loin d'imaginer les noeuds que son invention non-holonyme allait générer, quelques 5500 ans plus tard, dans l'esprit du roboticien, puisqu'il est maintenant l'heure que les véhicules se meuvent seuls. On peut tirer, pousser, conduire une cariole, les enfants maîtrisent très vite le fonctionnement du tricycle. Mais lorsqu'il s'agit de concevoir un système autonome, qu'il régule son mouvement vers un objectif donné, les choses se compliquent. On aimerait pouvoir hériter des solutions de l'automatique linéaire, mais le système résiste. R. W. Brockett [2] en 1983, a clairement posé les limites que la non-holonomie génère. Il démontre son désormais célèbre résultat : il n'y a aucun retour d'état continûment dérivable, ou même continu, qui puisse stabiliser un système non-holonyme. Dont acte.

Mais présentons maintenant celui avec lequel beaucoup ont joué : l'Unicycle. Anglicisme, il est aussi appelé 'robot de type char'. Il est, pour la robotique mobile, l'étalon de la non-holonomie. Il possède un essieu (de longueur $2 \cdot L$), deux roues (de diamètre R) indépendantes et contrôlées en vitesse (w_l, w_r). Il est repéré dans le plan par le vecteur $P_R = [x, y]^T$ et se déplace aux vitesses u et r (cf. figure 3.1).

Sa non-holonomie se traduit par une dégénérescence de la relation entre sa vitesse propre $[u, r]$, exprimée dans le *body frame* $\{B\}$, et sa vitesse absolue $[\dot{x}, \dot{y}]$, exprimée dans

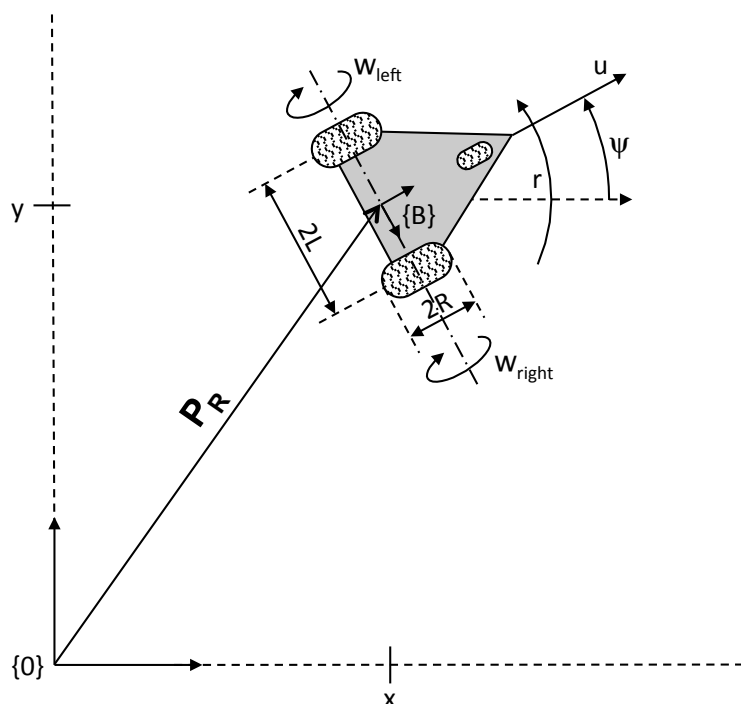


FIGURE 3.1 : l'Unicycle

le repère galiléen $\{0\}$. Pour la mécanique du point, exprimer une vitesse (absolue) d'un repère à l'autre requiert une matrice de passage carrée. La non-holonomie de l'unicycle, qui traduit son incapacité à se déplacer latéralement, prend la forme : $\dot{x} \cdot \cos \psi - \dot{y} \cdot \sin \psi = 0$, appelée condition de non-glissement. Ainsi, le modèle de l'Unicycle s'écrit :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cdot \cos \psi \\ \dot{y} &= u \cdot \sin \psi \\ \dot{\psi} &= r\end{aligned}\tag{3.1}$$

Les tracasseries que cela induit sont de diverses natures. Tout d'abord la linéarisation. Impossible, elle casserait toute la géométrie du système et serait non contrôlable autour de son seul point d'équilibre ($r = 0, u = 0$). Ensuite le cas de la stabilisation, pour lequel il s'agit de rejoindre un point désiré $[x_D, y_D]^T$. Premièrement, une faible erreur peut engendrer une large manœuvre, rendant la décroissance de la fonction d'erreur structurellement non-uniforme (c'est ici que le guidage intervient, nous y reviendrons). Ensuite, l'objectif même de la stabilisation est singulier. Une consigne en cap (régulation de ψ) n'est plus définie en $[x_D, y_D]$ où, notre système ayant pour objectif de s'y arrêter, il ne sera plus contrôlable. Brockett a bien raison.

Depuis, de nombreux auteurs se sont attaqué à ce problème. Ainsi, la littérature rapporte des solutions de contrôles commutés ([5], [6], [7]), ou continus, mais non-autonomes

(*time-varying*, [8], [9], [10], [11], [4]).

Une autre série de travaux ([12], [13], [14], [15], [16]) a été consacrée à l'étude du cycle limite d'un unicycle, dont la vitesse est constante (non nulle), et devant rejoindre un point donné. Si l'application peut paraître absurde pour l'unicycle, elle prend tout son sens dès qu'il s'agit d'un système sous-actionné et dont la commandabilité dépend de sa propre cinématique (cas des gouvernes actionnées d'un AUV, nous en reparlerons) ou de celle de son environnement (robot voilier, par exemple). Nous proposons dans [15*]¹ une nouvelle formulation de la question, sous la forme d'un suivi de chemin qui, nous le verrons plus tard, permet une formulation non singulière.

On définit aussi le modèle de l'étage d'actionnement de l'unicycle qui, par les consignes actionneurs, permet d'engendrer le mouvement. Restant au niveau cinématique :

$$\begin{aligned} u &= \frac{R}{2} \cdot (w_r + w_l) \\ r &= (w_r - w_l) \cdot \frac{R}{L} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2 ...à l'AUV

L'AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*, est un engin sous-marin destiné à naviguer au long cours. Par opposition au ROV, *Remotely Operated Vehicle*, qui de par sa téléopérabilité, requiert un lien physique avec l'opérateur et est, de fait, destiné à agir dans un périmètre restreint. L'AUV est souvent assimilable à une torpille, avec une direction d'évolution privilégiée. Des surfaces de contrôle (gouverne δ_r) permettent de modifier la trajectoire et un propulseur principal (w_{prop}) fournit l'avance longitudinale dans le plan horizontal (cf. figure 3.2), auquel nous nous limiterons dans un premier temps.

Ce système est sous-actionné, il ne peut directement agir latéralement, *i.e.* suivant la direction de la vitesse de glissement v , propriété qu'il partage avec l'Unicycle, mais pour lequel cette vitesse v est nulle (condition de non glissement). L'AUV est holonome, il peut se déplacer dans toutes les directions, sans contrainte structurelle. Cependant, ce défaut d'actionnement se traduit par une relation similaire à la non-holonomie (contrainte entre configuration et état), mais impacte l'étage d'actionnement qui, de par les types d'actionneurs d'un AUV, est intrinsèquement dynamique. Mais restons encore un peu sur l'aspect cinématique. Le modèle cinématique de l'AUV, équation 3.3, exprime une relation de vitesse entre deux repères, l'un attaché au mobile, l'autre galiléen.

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cdot \cos \psi - v \cdot \sin \psi \\ \dot{y} = u \cdot \sin \psi + v \cdot \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (3.3)$$

1. Les références bibliographiques suivies de * sont relatives à des publications personnelles. Leur détail est à retrouver au chapitre 8

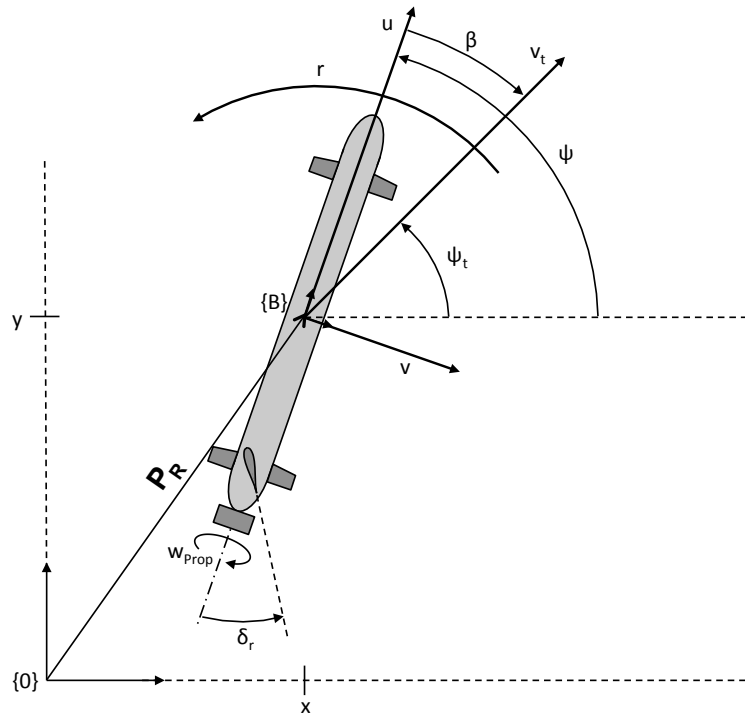


FIGURE 3.2 : l'AUV

Cette même relation peut être exprimée en considérant la vitesse totale du système (v_t), plutôt que ses composantes dans $\{B\}$. En découle alors l'expression 3.4, qui porte une similitude certaine avec l'Unicycle.

$$\begin{cases} \dot{x} = v_t \cdot \cos \psi_t \\ \dot{y} = v_t \cdot \sin \psi_t \\ \dot{\psi}_t = r + \dot{\beta} \end{cases} \quad (3.4)$$

Les modèles 3.1 et 3.4 diffèrent par la variable $\dot{\beta}$ qui apparaît dans la vitesse de l'orientation de la vitesse totale v_t , pour l'AUV. Sachant que $\beta = \arctan(u/v)$, cette particularité injecte des composantes dynamiques dans le modèle cinématique.

Étudions maintenant la dynamique de l'AUV, toujours dans le plan. Les couplages avec le plan vertical sont bien sûr absents de cette vision simplifiée, mais il en réside un qui permet un résultat intéressant. Un système iso-actionné, dont l'étage d'actionnement permet d'agir sur l'intégralité des degrés de liberté (DDL) du système, et dont la réponse hydrodynamique est isotrope - une sphère - aura un modèle dynamique, exprimé dans le repère du mobile $\{B\}$, découplé suivant chacun des DDL. Ce qui s'avère des plus pratiques pour contrôler le mouvement d'un tel système. Le ROV, dont l'objectif est plus souvent de main-

tenir une position désirée plutôt que de naviguer sur de longues distances (ce que de toute façon son câble lui interdit) est généralement iso-actionné et de forme symétrique. Le couplage dynamique de l'AUV, dans le plan horizontal, illustre le comportement qui veut que lorsque le système avance et tourne, alors il glisse, et prend la forme du paramètre m_{ur} , en première approximation, dans le modèle dynamique décrit par l'équation 3.5.

$$\begin{cases} F_u = m_u \cdot \dot{u} + d_u \\ 0 = m_v \cdot \dot{v} + m_{ur} \cdot u \cdot r + d_v \\ \Gamma = m_r \cdot \dot{r} + d_r \end{cases} \quad (3.5)$$

F_u et Γ sont les effort et couple produits par l'étage d'actionnement, générés par le propulseur (w_{prop}) et la gouverne arrière (δ_r). Les termes $m_{(.)}$ sont les paramètres dynamiques, issus de l'approximation au premier ordre de la résolution des équations des écoulements fluides de Navier-Stokes, permettant d'appréhender les efforts hydrodynamiques que subit la structure. On remarquera les termes m_u et m_v différents, qui modélisent le phénomène de 'masse ajoutée' : un engin en accélération dans l'eau doit fournir une énergie supplémentaire à celle que requiert sa masse propre, il doit aussi mettre en mouvement les particules d'eau environnantes. Lors de la décélération, elles lui restituent cette énergie, provoquant ainsi, au premier ordre, un effet de masse ajoutée. Ce type d'engin a donc une masse (apparente) différente suivant sa morphologie et son incidence par rapport au flux d'eau. d_u , d_v et d_r modélisent les phénomènes de frottements visqueux et enfin, m_{ur} représente le couplage que nous avons décrit plus haut. Nous sommes maintenant armés pour pousser l'analyse plus loin.

En explicitant le terme $\dot{\beta}$, dans 3.4, grace au modèle dynamique 3.5, la cinématique en rotation de l'AUV devient :

$$\dot{\psi}_t = r \cdot \left(1 - \frac{m_{ur}}{m_v} \cdot \cos^2 \beta\right) + \frac{u}{v_t^2} \cdot \frac{d_v}{m_v} - \frac{v}{v_t^2} \cdot (F_u - d_u) \quad (3.6)$$

Ce qui implique une intéressante condition, sinon il existe une valeur de β pour laquelle le système n'est plus contrôlable en $\dot{\psi}_t$ par r :

$$\frac{m_{ur}}{m_v} < 1 \quad (3.7)$$

Cette condition est connue dans le monde de l'architecture navale sous le terme *stern dominancy*, traduisible par 'dominance de poupe'. C'est le comportement de la girouette, stable en boucle ouverte, qui oriente sa flèche vers la direction d'où vient le vent. De façon similaire, un navire subissant une perturbation latérale réagira en s'orientant vers la perturbation, la contrecarrant localement. De plus, remontant jusqu'aux caractéristiques morphologiques de l'engin qui ont conduit à la valuation de ses paramètres hydrodynamiques, on peut conclure que ce comportement est favorisé si le véhicule est de forme allongée (et m_{ur}/m_v d'autant plus petit), avec une direction privilégiée de mouvement, et un contraste fort entre les sensibilités latérales et frontales aux phénomènes

hydrodynamiques. La torpille en est un parfait exemple. A l'inverse, on conclut qu'un système symétrique (sphère) doit être (au moins) iso-actionné, pour peu qu'on souhaite en contrôler l'orientation. Un résultat que nous avons présenté dans [13*].

A cette différence près, nos deux systèmes, Unicycle et AUV, sont *cinématiquement* similaires. Ainsi les solutions de l'un sont transposables à l'autre, à quelques conditions près, cf. [13*].

Maintenant que nous avons établi - une version simplifiée - des modèles pour nos deux systèmes, intéressons nous au contrôle de leur mouvement.

3.3 Le suivi de chemin

L'héritage de la robotique manufacturière et des *rocket sciences*, conduit à traiter de la question du mouvement en termes de trajectoire. Parfaitement justifiée pour les domaines cités, elle permet de rejoindre un point donné à un instant précis, l'outil rencontrant la pièce ou le missile sa cible. La cas des systèmes iso ou sur-actionnés est une affaire réglée dont les solutions sont établies et éprouvées. Le sous-actionnement (dont nonholonomie de l'unicycle) nécessitent des stratégies de contrôle particulières. Des approches linéarisées ou par retour d'état linéarisant ([19], [20]) ainsi que non-linéaires ([22], [5]) sont maintenant disponibles dans la littérature.

La trajectoire est l'expression conjointe de deux contraintes, spatiale et temporelle, un rendez-vous permanent. Le suivi de chemin retire la contrainte temporelle du problème, sans lui ôter sa capacité d'honorer des rendez-vous. Retirer la référence temporelle de la consigne permet une expression autonome du problème, pour peu que le système le soit aussi.

C. Samson, A. Micaelli et A. Abderahim ([18],[17]), en 1991, posent les bases théoriques d'une solution à la question du suivi de chemin par un unicycle. Le problème est illustré à la figure 3.3. Tout d'abord, la première intuition concerne le découplage entre les deux contrôles u et r : on se donne une vitesse d'avance $u = u_d > 0$, et le problème se résume en une régulation du cap ψ . Les auteurs introduisent ensuite une stratégie d'approche - de guidage - qui permet de rejoindre un point du chemin, qu'ils choisissent comme le plus proche. Ils se heurtent alors à une limitation de la solution dont la convergence impose une sévère contrainte sur les conditions initiales, telle que la distance initiale au chemin $d_0 < 1/c_c^{\max}$, où $c_c^{\max}$ désigne la courbure maximale du chemin. Analysant cette solution, on réalise que cette condition permet d'éviter que le système se retrouve au centre d'une portion circulaire du chemin, situation singulière pour laquelle le point le plus proche n'est plus unique.

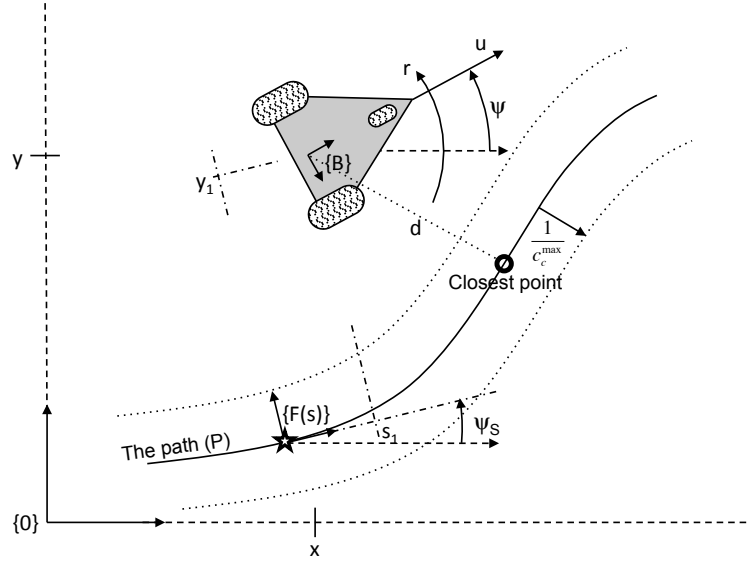


FIGURE 3.3 : Le suivi de chemin

Cependant, la solution de C. Samson *et al* est aussi, et surtout, une lumineuse méthodologie de conception de la loi de commande pour le suivi de chemin.

Avec une démarche similaire nous avons repris les développements en considérant maintenant que le point du chemin à rejoindre était une cible virtuelle, s , mue par sa propre loi de mouvement, à déterminer. Ainsi, les coordonnées du robot dans le repère de Frenet $\{F(s)\}$, associé à la cible s sont $[y_1, s_1]^T$, cf. figure 3.3. L'orientation absolue de la cible est ψ_s . Le guidage de C. Samson consiste en la régulation de l'angle $\theta = \psi_s - \psi$ vers l'angle d'approche $\delta = -\arctan(k_\delta \cdot y_1)$.

$$\begin{cases} \theta = \psi_s - \psi \\ \delta = -\arctan(k_\delta \cdot y_1) \end{cases} \quad (3.8)$$

Ainsi, lorsque y_1 est grand, l'angle d'incidence θ du système par rapport au chemin est guidée vers $\pi/2$. S'il diminue cette incidence décroît, pour s'annuler avec $y_1 = 0$. Exprimer la cinématique du problème dans le repère de Frenet, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\dot{s} \cdot (1 - c_c \cdot y_1) + u \cdot \cos \theta \\ \dot{y}_1 = -c_c \cdot \dot{s} \cdot s_1 + u \cdot \sin \theta \\ \dot{\theta} = r - c_c \cdot \dot{s} \end{cases} \quad (3.9)$$

Le détail de l'élaboration de ce modèle est à retrouver dans [11*]. La question du suivi de chemin devient donc : pour une vitesse d'avance $u = u_d$ arbitraire et positive, piloter l'orientation du système, par r , ainsi que la vitesse de la cible virtuelle $\dot{s}$, tels que s_1 , y_1 et θ convergent vers 0. Nous démontrons dans [11*] que la loi de commande de l'équation 3.10

assure la convergence exponentielle de θ et s_1 et la convergence asymptotique de y_1 , vers 0, sans contrainte de condition initiale.

$$\begin{cases} u = u_d \\ r = \dot{\delta} - \gamma \cdot y_1 \cdot u \cdot \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} - K_2 \cdot (\theta - \delta) + c_c \cdot \dot{s} \\ \dot{s} = u \cdot \cos \theta + K_1 \cdot s_1 \end{cases} \quad (3.10)$$

où K_1 , K_2 et γ sont des gains arbitraires positifs. La démonstration se base sur l'élaboration conjointe de r et $\dot{s}$ pour garantir la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov $V = \frac{1}{2} \cdot (s_1^2 + y_1^2) + \frac{1}{2\gamma} \cdot (\theta - \delta)^2$, ainsi que la finitude de sa double dérivée (uniformité de la convergence). Cette fonction de Lyapunov étant compacte et radicalement non-bornée, elle assure la globalité de la solution, relâchant la contrainte qui taquinait C. Samson ($y_1(0) < 1/c_c^{\max}$). Tous les ingrédients sont réunis pour une application du lemme de Barbalat, [21], et on obtient donc une convergence Globale, Uniforme et Asymptotique (GUAC) de l'Unicycle vers son chemin, grace au principe de la cible virtuelle, [11*].

L'idée d'exploiter un degré de liberté virtuel supplémentaire, en termes de cible sur un chemin, est déjà présente dans les travaux de M. Aicardi *et al* ([23],[24]) et Del Rio *et al* [25]. Mais le cadre qu'ils proposent ne permet pas d'aborder l'extension à la dynamique et la robustesse de manière aisée, ce que notre approche permet. De plus, à condition que notre système soit autonome, on peut invoquer le principe d'invariance de LaSalle et apporter une simplification à la loi de commande précédente :

$$\begin{cases} u = u_d \\ r = \dot{\delta} - K_2 \cdot (\theta - \delta) + c_c \cdot \dot{s} \\ \dot{s} = u \cdot \cos \theta + K_1 \cdot s_1 \end{cases} \quad (3.11)$$

où K_1 et K_2 sont des gains arbitraires positifs, [13*].

Ceci dit, définir les gains de la loi de commande comme arbitraires positifs est plutôt vague, alors que le comportement transitoire du système dépend de la valeur de ces gains, en particulier en situation proche des inévitables phénomènes de saturation des actionneurs. La considération de ces derniers est une nécessité sans laquelle la solution ne restera que théorique. A moins de verser dans le surdimensionnement qui, au final ne garantit rien, mais permet de minimiser l'impact de certains phénomènes que l'on souhaiterait négligeables ou lointains, résultant de fait en un système lourd et sous-employé.

3.3.1 Inclusion de la limitation des actionneurs

Nous avons abordé le cadre du suivi de chemin pour un Unicycle aux capacités limitées [47*]. L'idée simple est d'adapter la vitesse d'avance (u) aux capacités des actionneurs, compte tenu de la demande d'actionnement en rotation (r). La valeur des gains de la loi de

commande 3.11 est bien sûr aussi concernée. Ainsi, 3.11 est développée de façon à faire apparaître les éléments contraignant le respect de la limitation des actionneurs. Il en résulte l'expression 3.12.

$$\left\{ \begin{array}{l} r = f_r + g_r \cdot u \\ u = \frac{R \cdot w_{\max} - L \cdot (1/4 + f_r^2)}{1 + L \cdot (1/4 + g_r^2)} \\ f_r = -K_2 \cdot \tanh(\theta - \delta) + k_1(\cdot) \cdot s_1 \cdot c_c \cdot (1 - s_1 \cdot \delta') \\ g_r = c_c \cdot \cos \theta \cdot (1 - s_1 \cdot \delta') + \delta' \cdot \sin \theta \\ k_1(\cdot) = \frac{K_1}{1 + (s_1 \cdot c_c \cdot (1 - s_1 \cdot \delta'))^2} \\ \delta' = \frac{d\delta}{dy_1} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Il est montré, dans [47* et 4*], que le respect de la condition 3.13 pour les gains K_1 et K_2 , implique le respect de la condition 3.14, faisant que les moteurs ne saturent jamais.

$$\left\{ K_2 + \frac{K_1}{2} < \frac{R}{L} \cdot w_{\max} \right. \quad (3.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{\max}^2 - w_1^2 > 0 \\ w_{\max}^2 - w_r^2 > 0 \end{array} \right. \quad (3.14)$$

où $w_{\max}$ représente la vitesse maximale que peuvent atteindre les moteurs. La convergence GUAC de la solution cinématique est formellement prouvée, sous la contrainte 3.14. De plus, le fait que l'Unicycle ait les capacités de tourner sur place implique alors qu'il peut suivre n'importe quel chemin, continu et aux dérivées spatiales bornées.

3.3.2 Evitement d'obstacles

Suivre un chemin ne suffit pas, quand bien même ce dernier aurait été planifié de façon à éviter tout obstacle répertorié. Les dérives du système de navigation, la dynamique de l'environnement, ou toute autre forme d'imprévu peut conduire à une obstruction à la poursuite du suivi de chemin. L'éviter doit être un réflexe conduisant l'*obligation* à prévaloir sur l'*intention*. Le suivi de chemin doit naturellement devenir secondaire, au profit de l'évitement d'obstacle. Une fois l'obstruction disparue, contournée, franchie, le suivi de chemin doit à nouveau guider le système. Il est implicite que le système dispose de moyens de mesures de la 'distance à l'obstruction' qui, dans le cas explicite de l'évitement d'obstacle, sont généralement des proximètres lasers, ultra-sonores, visuels... une panoplie d'instruments en mesure d'échantillonner l'environnement immédiat du système. Définissons au passage cette 'couverture' que permet la portée des capteurs comme l'*espace sensoriel courant*, sur lequel nous reviendrons.

Les deux principales approches reportées dans la littérature ont trait à i) la (re-)planification ou ii) l'action réflexe.

- Planifier requiert une connaissance *a priori* de l'environnement dans laquelle projeter les mouvements possibles du robot. Ces approches portent le principal avantage de produire une solution (un chemin), dont le suivi garantit globalement l'atteinte de l'objectif, si un tel chemin existe et si les méthodes employées résultent en une optimisation convexe. Ce dernier point est d'ailleurs l'enjeu de nombreux travaux de recherches, dont ceux reportés dans [26], [27] et [29] où les auteurs proposent de modéliser un champ de potentiel répulsif basé sur les équations de l'électromagnétisme de Maxwell, cadre qui permet l'évitement de minimum local. D'autres approches suivent la même logique en extrayant le chemin à réaliser depuis l'analyse des écoulements d'un fluide dont les caractéristiques de viscosité permettent d'approcher la considération des contraintes cinématiques du système dans l'expression du chemin résultant (courbure minimale, [30]). Le coût en temps de calcul de ces approches reste élevé. La réduction de la charge calculatoire a conduit [28] à traiter de cette question par la décomposition de l'espace en grille non régulière et l'emploi d'une fenêtre dynamique de traitement, permettant de définir contextuellement un horizon de travail dans lequel la planification est effectuée.
- La traitement de la question de l'évitement d'obstacle par l'action réflexe ne nécessite pas de phase de planification et permet au système de réagir à la présence d'un obstacle dans l'espace courant de ses capteurs, ou de (du modèle de) son environnement immédiat. Ainsi, René Zapata propose le principe de la ZVD (Zone Virtuellement Déformable, [31]), que nous avons reformulé en principe de guidage. Nous traitons de sa combinaison avec le suivi de chemin, comme illustré à la figure 3.4.

Les capteurs proximétriques donnent une information de distance aux obstacles, une signature polaire de l'espace libre autour du robot, sous la forme d'un vecteur de mesures $c(\alpha)$. La ZVD nominale (Ξ_h) est définie comme une zone de sécurité entourant le système, dans laquelle la présence d'un obstacle engendre une réaction d'évitement. L'échantillonnage capteurs fournit la ZVD courante Ξ , qui est une déformation de Ξ_h par l'obstacle. Cette déformation est quantifiée en termes d'intrusion d'information ($i(\alpha) = d_h(\alpha) - d(\alpha)$, si > 0 , 0 sinon). L'objectif de l'évitement d'obstacle devient donc de calculer la réaction du robot pour repousser ces intrusions d'information, et tenter de reformer la ZVD nominale. On attribue ainsi des propriétés dynamiques (virtuelles) aux intrusions d'information (ressort-amortisseur) et établissons la relation jacobienne décrivant l'effet des commandes (u et r) sur l'évolution de l'intrusion d'information globale définie à l'équation 3.15.

$$\begin{aligned}\Upsilon &= \int_{\alpha=0}^{2\cdot\pi} \frac{i(\alpha)}{d(\alpha)} d\alpha \\ \dot{\Upsilon} &= J_{\Upsilon}^u \cdot \dot{u} + J_{\Upsilon}^r \cdot \dot{r} + F^{\text{Rob.Vel}} + F^{\text{Obst.Vel}}\end{aligned}\tag{3.15}$$

où $J_{\Upsilon}^u, J_{\Upsilon}^r, F^{\text{Rob.Vel}}$ et $F^{\text{Obst.Vel}}$ sont explicités dans [8*]. On notera que s'il existe un α tel que $d(\alpha) = 0$, alors $\Upsilon \rightarrow \infty$. Ainsi, une solution de commande garantissant la finitude de

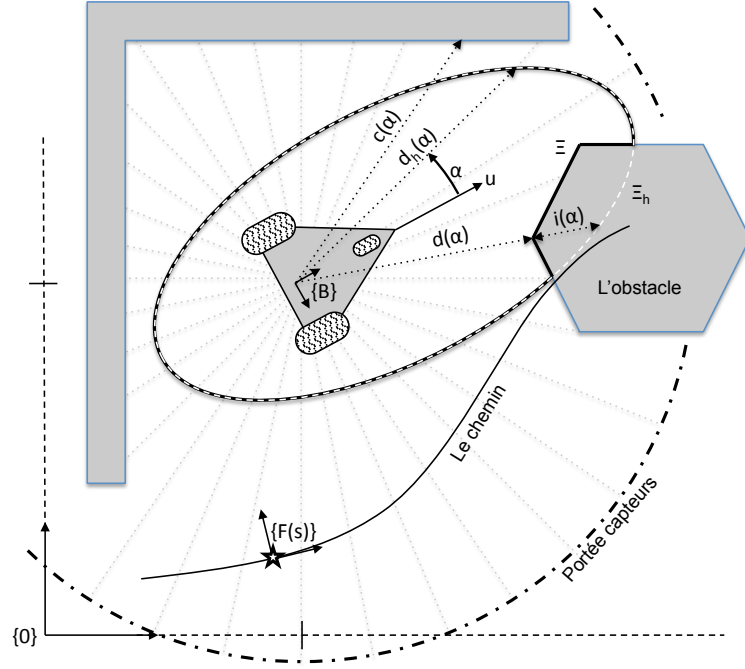


FIGURE 3.4 : La Zone Virtuellement Déformable, ZVD

Υ réalisera l'évitement d'obstacle. Nous avons ainsi reformulé le principe de la ZVD. Il est aussi à noter que les paramètres de la ZVD (choisie elliptique dans notre cas) dépendent de la cinématique du système, en particulier u . Plus le système va vite, plus la ZVD sera grande et déportée sur l'avant du véhicule. Si le système a une vitesse négative, elle sera déportée sur l'arrière, dans la direction de la vitesse. La prise en compte de cette dépendance conduit à un traitement dynamique de la question. Ce sont maintenant les variations de u (i.e. $\dot{u}$) et r qu'il faut piloter pour conjointement rejeter l'intrusion d'information et retailler la ZVD.

Reste la question de la combinaison avec le suivi de chemin qui est traitée sous la forme d'un objectif de guidage, pour lequel nous imposons une intrusion d'information désirée (Υ_d) qui permet au système de (virtuellement) rester en contact avec l'obstacle qu'il est en train d'éviter. Cette intrusion d'information désirée encapsule la stratégie de suivi de chemin comme explicité à l'équation 3.16.

$$\Upsilon_d = K_\Upsilon \cdot \tanh(\lambda_\Upsilon \cdot (\theta - \delta)) \quad (3.16)$$

où K_Υ et λ_Υ sont des gains arbitraires positifs. Il est ainsi démontré que la loi de commande 3.17 engendre une convergence asymptotique (BIBO) de $(\Upsilon - \Upsilon_d)$ vers un compact borné lorsque $\Upsilon \neq 0$, et dégénère en suivi de chemin lorsque l'intrusion globale est nulle.

De plus, la stratégie qui consiste à 'garder le contact' avec l'obstacle permet de naturellement sortir d'un labyrinthe 2D, si une solution existe, comme illustré dans [8* et 22*].

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= -K_r \cdot (\boldsymbol{\gamma} - \boldsymbol{\gamma}_d) \cdot (J_{\boldsymbol{\gamma}}^{\psi} - \boldsymbol{\gamma}'_d) + c_c \cdot \dot{s} + \dot{\delta} \\ \dot{\mathbf{u}} &= -K_u \cdot J_{\boldsymbol{\gamma}}^u \cdot (\boldsymbol{\gamma} - \boldsymbol{\gamma}_d) - \frac{\mathbf{F}_{\text{Rob.Vel}}^u}{J_{\boldsymbol{\gamma}}^u} \cdot \mathbf{u} \end{aligned} \quad (3.17)$$

avec $\boldsymbol{\gamma}'_d = \frac{2 \cdot K_{\boldsymbol{\gamma}} \cdot \lambda_{\boldsymbol{\gamma}}}{1 + \lambda_{\boldsymbol{\gamma}} \cdot (\theta - \delta)^2}$ et où K_u et K_r sont des gains arbitraires positifs. La considération du modèle dynamique du système requiert alors une étape de *backstepping*, sur laquelle nous reviendrons plus tard. Cependant, la complexité de la solution rend difficile l'appréhension de la valeur des gains de la commande. Elle est en majeure partie due à la dynamique (virtuelle) de la ZVD qui permet une approche certes intuitive, mais apporte son lot de paramètres dont les critères d'évaluation sont difficiles à établir. Le détail de ces résultats est à retrouver dans [8*]. En conséquence, nous proposons une autre approche de l'évitement d'obstacle, de façon à exploiter les propriétés du suivi de chemin.

Le principe de la SMZ (*Safe Maneuvering Zone*) se base sur une exploitation étendue du suivi de chemin. C'est une solution de 'déformation locale du chemin'. Ce n'est certes pas une idée nouvelle, [32], mais la considération des propriétés du suivi de chemin permet d'obtenir des garanties en termes de convergence GUAC vers le chemin et de distance minimale à l'obstacle.

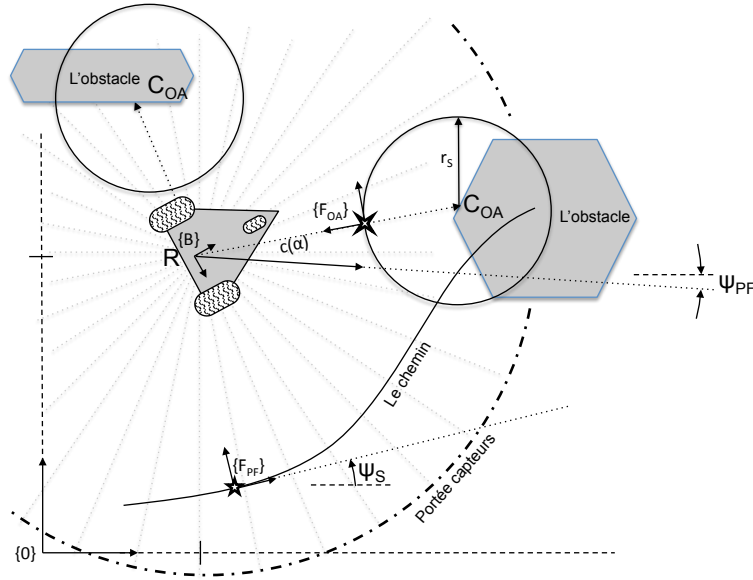


FIGURE 3.5 : La *Safe Maneuvering Zone*, SMZ

Se référant à la figure 3.5 et considérant les mesures des capteurs proximétriques, $c(\alpha)$, l'idée est de procéder à l'évitement de l'obstacle le plus proche du robot. Evitant ce dernier,

on peut garantir d'éviter les autres. On définit l'angle $\psi_{PF} = \psi_S + \delta$, correspondant au cap courant vers lequel le suivi de chemin guiderait le système, sans obstacle.

Ainsi, parmi les mesures capteurs, la plus faible est repérée. La SMZ, un cercle de rayon r_S , est centrée sur le point de l'obstacle correspondant (C_{OA}). Un test d'obstruction est réalisé pour savoir si la direction de guidage (ψ_{PF}) intersecte la SMZ. Dans l'affirmative, l'évitement sera réalisé en considérant cette dernière SMZ, sinon, le point le plus proche suivant sera recherché, et le test reconduit jusqu'à la première, et plus proche, obstruction détectée. Si aucune obstruction n'est détectée, l'évitement n'est pas engagé, i.e. il existe un espace (localement) dégagé pour conduire le système vers le chemin, plus précisément vers la cible virtuelle du chemin, appelée F_{PF} sur la figure 3.5.

A la première obstruction détectée, une nouvelle cible virtuelle est créée, F_{OA} , située sur la SMZ à l'intersection avec le rayon RC_{OA} . L'évitement d'obstacle est réalisé par la modification de la cible virtuelle (de F_{PF} vers F_{OA} , pour engager l'évitement), l'algorithme de suivi de chemin restant le même, les propriétés de convergence qu'il porte resteront assurées. Ainsi une analyse conservative du problème nous permet de conclure que la loi de commande 3.12, respectant la condition 3.13 permet de rejoindre et suivre le chemin, lorsqu'il n'y a pas d'obstruction, et d'éviter les obstacles lorsque nécessaire. De plus, on montre que la pénétration du système à l'intérieur de la SMZ est bornée et numériquement calculable pour des valeurs de gains données. On prendra ainsi r_S , rayon de la SMZ, supérieur à cette borne. Les détails de ces travaux sont à retrouver dans [4*], où une analyse de la solution montre que l'évitement est garanti, de par le respect d'une distance minimale à l'obstacle, ainsi que la convergence vers le chemin lorsque l'obstruction a disparu, considérant les capacités limitées des actionneurs du système.

Une troisième solution, hybride des deux précédentes, est actuellement en cours d'élaboration.

3.3.3 Généralisation à la flottille

Depuis la tenue de formation d'une flotte de satellites, de drones sous-marins ou aériens, jusqu'à la question de la navigation en 'train de véhicules' pour les voitures autonomes, le sujet de l'automatique de contrôle d'une flottille de robot mobile occupe actuellement les travaux de nombreuses équipes de recherche. Sans vouloir produire un état de l'art exhaustif sur le sujet, citons néanmoins ceux qui ont servi de base aux travaux que je présente dans la suite, [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41] et [33].

Nous exploitons à nouveau la structure de la solution pour le suivi de chemin, et montrons qu'il peut aisément évoluer en suivi de trajectoire. La combinaison de ces deux approches du contrôle du mouvement a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Citons [33] et [34] pour les premiers travaux consacrés à cette question dans le contexte de la robotique mobile. Dans [36*], nous étendons le principe du suivi de chemin à celui d'une trajectoire. Une adaptation de la loi de commande de la cible virtuelle permet de lui adjoindre un

critère temporel. Bien sûr, si ce critère est considéré comme quelconque, le système n'est plus autonome (il possède une entrée qui n'est pas uniquement fonction de l'état). Mais si ce critère est intégralement piloté par une sous-partie du système, le membre d'une flottille ou une référence commune à tous, par exemple, alors l'expression du système global redevient autonome. Nous avons ainsi étendu nos travaux au suivi de chemin coordonné, pour deux unicycles (cf. figure 3.6). L'idée de base est que chaque membre i de la flottille suive un chemin qui lui est propre, et adapte son avance, via la régulation de la vitesse de leur cible virtuelle $\dot{s}_i$, en fonction d'un critère relatif à la formation.

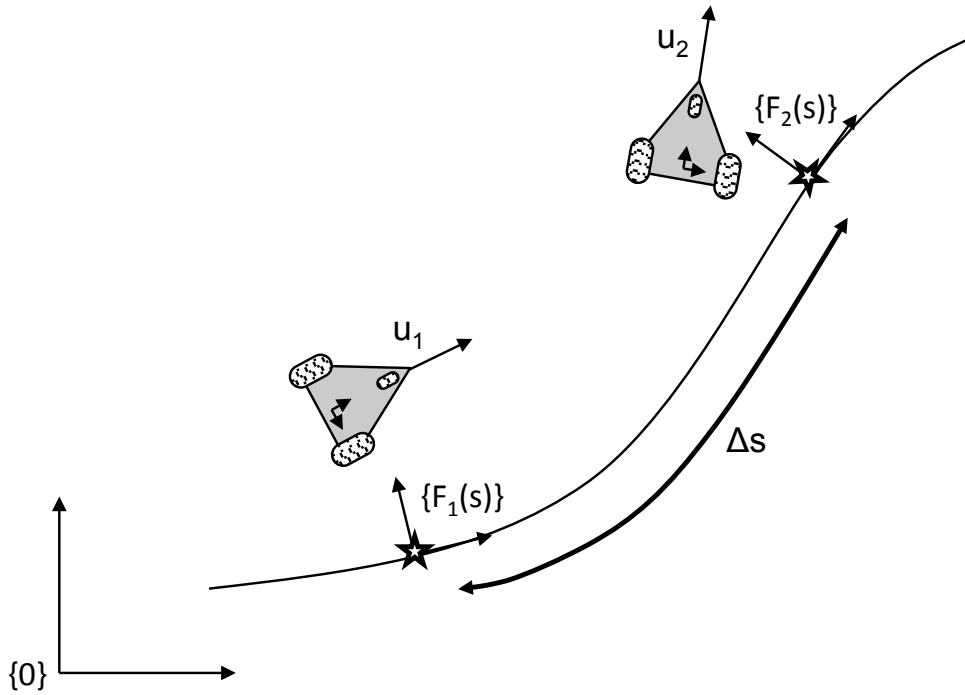


FIGURE 3.6 : Le suivi de chemin coordonné

Les véhicules 1 et 2 suivent la loi d'adaptation de leur vitesse d'avance reproduite à l'équation 3.18.

$$u_i = u_d + \frac{2 \cdot \arctan \Delta s_i}{\pi} \cdot \Delta u, \quad i = 1, 2. \quad (3.18)$$

avec $\Delta s_1 = s_2 - s_1 = -\Delta s_2$, u_d la vitesse d'avance désirée pour la formation, et Δu impose une déviation maximale autorisée par rapport à u_d . L'adjonction de ce simple principe à la formulation du suivi de chemin permet de réaliser le contrôle coordonné des deux engins, pour lesquels aucun principe de hiérarchie (*leader - follower*) n'est nécessaire. Le critère de convergence GUAC est à nouveau respecté.

La généralisation à n véhicules est réalisée dans [25*], incluant l'évitement d'obstacle, et

pour laquelle on adjoint à la variable Δs_i un critère relatif à la performance de la qualité du lien de communication ainsi qu'une adaptation de la topologie du lien (*Minimum Spanning Tree*), ouvrant au concept de 'l'ombilical virtuel', comme illustré à la figure 3.7.

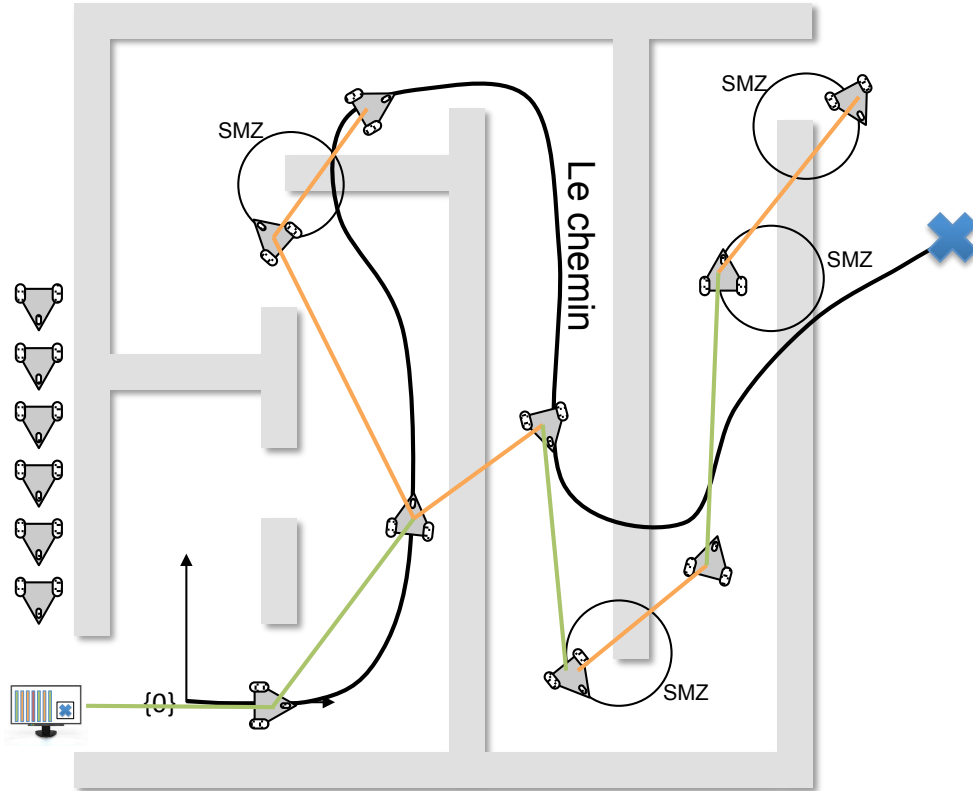


FIGURE 3.7 : L'ombilical virtuel

Ce principe, illustré pour l'instant uniquement en simulation, permet de garantir un niveau minimal à la qualité de communication et ainsi proposer un *service* relatif à la transmission d'un signal vidéo, par exemple, sans recourir à un étage décisionnel. La garantie de ce service dépend de bien d'autres facteurs que l'algorithme de gestion des mouvements individuels, bien sûr, mais les propriétés automatiques qu'il confère au système sont fortes, et leur préservation doit être considérée lors des différentes phases d'implémentation.

La généralisation de notre approche à n véhicules a été abordée dans [17*], pour un suivi de chemin coordonné, incluant évitement d'obstacles et de collision. Elle a permis l'introduction du principe de *Coordinated Path Tracking* (CPT) qui fusionne les objectifs de suivi coordonné de chemin et de suivi de trajectoire, vu comme une contrainte temporelle, et temporaire, exogène. De plus, la considération du conditionnement de la matrice de connectivité (le Laplacien en théorie des graphes), et de sa jacobienne, permet de définir un critère de connectivité et de l'associer au système de guidage. La figure 3.8. illustre

ce principe. Un chemin spécifique est attribué à chaque Unicycle. La formation, 'en ligne' dans l'exemple de la figure 3.7, est tenue par la régulation de l'avance de chaque cible virtuelle. Les évitements d'obstacles et de collision s'effectuent sur le principe de la SMZ. On notera les situations 'pièges' desquelles se sort le système dans les simulations reportées dans [8*], où l'on démontre, par la globalité du critère de converge, que si une solution existe, le système est en mesure de la trouver. Rien ne garantit son optimalité, mais la faisabilité est assurée.

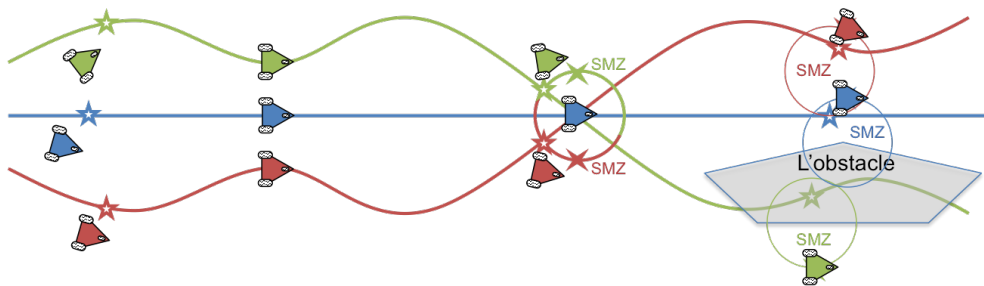


FIGURE 3.8 : Le *Coordinated Path Tracking*

3.3.4 Retour sur la stabilisation

D'une discussion avec Luc Jaulin, est venu l'idée d'une extension intéressante. Il travaille sur des robots voiliers dont l'emploi est imaginé en appui de véhicules sous-marins pour lesquels ils assurent le lien de supervision et aident à la localisation. Concrètement, le robot de surface (ASC, pour *Autonomous Surface Craft*) doit se situer à l'aplomb du sous-marin pour servir de relais de communication et de balise de localisation. Imaginant ce robot sous-marin intervenir sur une zone réduite, l'engin de surface doit être en mesure de rester sur place, objectif de stabilisation, autrement appelé *station keeping*. Il n'est pas nécessaire d'avoir longuement pratiqué la voile pour comprendre que 'rester sur place' n'est pas un problème trivial. L. Jaulin, par son approche intervaliste, démontre l'existence d'un invariant compact autour de l'objectif pour un unicycle devant rejoindre un point, avec une vitesse d'avance constante [15*]. Demander à un unicycle de rejoindre un point sans qu'il puisse réguler la vitesse d'avance u est une ineptie dans le cadre de la robotique terrestre, mais prend tout son sens pour une première approche de la question de la stabilisation d'un voilier. Nous avons adopté une démarche similaire. Nous avons, de même, démontré l'existence de cet invariant compact, de façon à invoquer le théorème de Poincaré-Bendixon qui permet de déduire l'existence d'un cycle limite, contenu dans cet invariant, et fonction de la limite d'actionnement du système, de la forme $|r| < r^{\max}$. Les simulations montrent clairement l'allure du cycle limite, des cercles de rayon $u/r^{\max}$, décentrés de l'objectif. L'idée est donc, simplement, de reformuler la question de la stabilisation, en celle d'un suivi de chemin, formé d'un cercle de rayon $u/r^{\max}$, centré sur

l'objectif, cf figure 3.9. Dans [15*] nous développons une telle loi de commande et étudions la qualité de la convergence. La recherche de son uniformité, lorsqu'elle est possible, nous conduit à proposer un jeu de gains, dont la simplicité de l'expression a retenu notre attention, et précise ainsi la vague définition de l'arbitrairement positif. Le problème est posé à la figure 3.9.

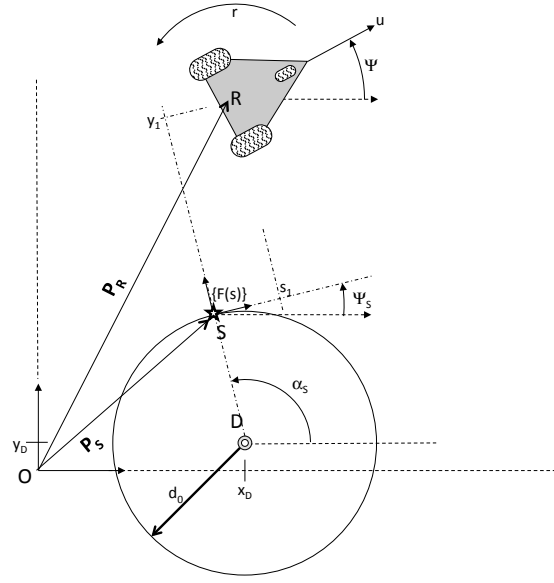


FIGURE 3.9 : Le suivi de chemin limite

Notre cible virtuelle parcourt maintenant un cercle de rayon $d_0 = u/r^{\max}$, courbure maximale réalisable par l'Unicycle. Elle est repérée par sa coordonnée angulaire α_s . Alors, la loi de commande 3.19 permet au système de converger (GUAC) vers ce chemin limite.

$$\begin{cases} r = \dot{\alpha}_s + \dot{\delta} - K \cdot (\theta - \delta) \\ \dot{\alpha}_s = \frac{-u}{d_0} \cdot \cos \theta + K_s \cdot s_1 \cdot d_0, \text{ si } y_1 < 0 \\ \dot{\alpha}_s = \frac{-u}{d_0 + y_1} \cdot \cos \theta, \text{ sinon.} \\ \delta = -\arctan(K_\delta \cdot y_1) \end{cases} \quad (3.19)$$

pour des gains K , K_δ et K_s (encore) arbitrairement positifs. Cependant, les simulations indiquent clairement la convergence attendue, mais le transitoire peut présenter des dépassements indésirables, provoquant des surrégimes parasites des moteurs. Nous posons donc comme contrainte supplémentaire une convergence exponentielle de y_1 , lorsque le système est en mesure de le faire. En effet, il peut démarrer dans, ou très proche du cercle,

de façon à nécessairement croiser le chemin avec une incidence non nulle, perdant la qualité uniforme, et à *a fortiori* exponentielle de la convergence. Nous posons donc comme condition que le système puisse pénétrer le cercle, mais une unique fois, pour ensuite exponentiellement converger. La réalisation de cette condition nous a conduit à proposer les valeurs reproduites en 3.20, pour les gains de la loi de commande 3.19.

$$\begin{cases} K = \frac{2}{\pi} \cdot r^{\max} \\ K_{\delta} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{r^{\max}}{u} \end{cases} \quad (3.20)$$

On notera que K_s est absent de ces relations, il sera pris suffisamment grand. En effet, il n'intervient que lorsque le système est à l'intérieur du chemin circulaire, situation que l'on cherche à éviter, autant que possible, puisqu'ici l'objectif est structurellement inatteignable : depuis l'intérieur du cercle, le système n'a pas la capacité d'actionnement nécessaire pour rejoindre exponentiellement le chemin. Ainsi les gains pertinents pour assurer le critère de convergence mentionné plus haut sont K et K_{δ} . Au cours de ces travaux, nous sommes passés par un résultat assez contre intuitif, à savoir que le respect de la contrainte de saturation des actionneurs est favorisée par le choix d'un gain K grand, $\frac{2}{\pi} \cdot r^{\max}$ en étant la valeur minimale admissible. Une fois correctement formulée, la contre-intuition devient évidente : le gain K pilote la convergence du système vers son objectif de guidage (ici, δ), taillé (via le gain K_{δ} , qui lui doit respecter une borne supérieure) pour générer des manœuvres réalisables par le système. En d'autres termes, l'erreur de trainage du guidage doit disparaître avant la convergence de celui-ci. Une analyse conservative de l'expression des convergences permet de les borner par des décroissances exponentielles, et en organiser la priorité, par des conditions sur les gains dont les valeurs limites sont exprimées à l'équation 3.20. Ces résultats font l'objet de la publication [15*].

3.3.5 Dynamique et Robustesse

La généralisation des résultats précédents au système sous-actionné qu'est l'AUV passe nécessairement par une prise en compte de la dynamique, la contrainte de sous-actionnement de l'AUV s'exprimant à ce niveau. Cette question se pose aussi pour affiner le contrôle de l'unicycle et prendre en compte son comportement dynamique. Pour l'unicycle, la question ne présente pas de difficulté particulière. La technique de *backstepping*, telle qu'introduite par Krstic, en [3], y répond. Elle permet d'augmenter l'état du système de ses états dynamiques, à savoir :

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{1}{R \cdot m} \cdot (\tau_r + \tau_l) \\ \dot{r} = (\tau_r - \tau_l) \cdot \frac{L}{I \cdot R} \end{cases} \quad (3.21)$$

où m désigne la masse du système, I son moment d'inertie et (τ_l, τ_r) sont les couples moteurs exercés par les roues. Faisant de la solution cinématique précédente une référence pour l'étage dynamique, on conçoit une solution (aux propriétés de convergence

identiques) pour piloter le système en accélération et, via l'étage d'actionnement, en couples moteurs, entrée de contrôle plus adéquate à la réalité physique du robot. On notera que l'équation 3.21 fusionne l'étage d'actionnement et le modèle dynamique, pour lequel les phénomènes de frottements visqueux (de l'air) ont été négligés, et le contact roue-sol considéré comme parfait. L'application du principe de *Backstepping* permet par la considération de la précédente solution cinématique comme une référence, de piloter l'étage dynamique du système vers l'objectif, i.e. le chemin.

Une nouvelle invocation du principe de *Backstepping* permet de considérer les erreurs d'estimation des paramètres des deux modèles, cinématique et dynamique, et garantir la robustesse de la loi de commande, comme démontré dans [6* et 7*].

La généralisation à l'AUV résiste pour 2 raisons :

- La première est relative au schéma d'adaptation des paramètres du système qui doivent apparaître de manière affine dans les équations, condition d'application de la technique de *backstepping* à la question de la robustesse.
- La deuxième concerne l'évolution des paramètres qui n'est pas garantie bornée, ni physiquement réaliste. Ce dernier point soulève des interrogations qui méritent le détour. En effet, le schéma adaptatif résultant garantit que les termes relatifs aux paramètres du modèle et qui apparaissent dans la fonction de Lyapunov évoluent de façon à ce que sa dérivée reste négative et présente les propriétés requises, mais ne procède nullement à une forme d'estimation (situation différente pour les systèmes linéaires). L'évolution de ces termes répond au seul critère mathématique, sans égard pour la réalité physique du système, qui a pourtant prévalu dans l'élaboration du modèle. Ainsi, un terme (affine) de l'équation, combinaison de paramètres mécaniques et électriques par exemple, peut évoluer vers une valeur physiquement aberrante. Les simulations ne sont guère gênées par cette question, elles exhibent une convergence parfaite, mais la perte des repères physiques est inconvenante. D'autres approches permettent d'éviter cet écueil.

La particularité du système sous-actionné qu'est l'AUV est qu'il peut glisser sur un axe dépourvu de capacité d'actionnement, phénomène intrinsèquement dynamique. Contrairement au cas de l'unicycle, les paramètres du modèle dynamique de l'AUV n'apparaissent pas de manière affine. En effet, l'établissement de la loi de commande va nécessiter de résoudre l'équation 3.6 pour r , laissant apparaître le paramètre $\frac{m_{ur}}{m_v}$ sous une forme non-affine $(1 - \frac{m_{ur}}{m_v} \cdot \cos^2 \beta)^{-1}$ (ce qui engendrerait pour système symétrique - sphérique - une demande d'actionnement infinie).

Ainsi, pour résoudre la question de la robustesse, nous avons eu recours aux méthodes de conception de lois de commandes commutées proposées par J. Hespanha et D. Liberzon dans [4]. La commutation du système, ou de sa loi de commande, engendre des discontinuités qui rendent caduques les outils d'analyse et de conception de l'automatique

continue. Aussi, ils proposent, par une élégante analyse géométrique, l'établissement de conditions relatives aux instants de commutation et à leur impact sur l'expression de la convergence. Ces conditions respectées, la convergence peut être bornée par une fonction de Lyapunov, à laquelle on attribuera la convergence désirée (GEC, GUAC, GAC, BIBO). L'analyse finale de la convergence se fera sur la fonction bornante, de manière classique. Nous appliquons ces principes et proposons une version robuste de la loi de commande en suivi de chemin pour l'AUV dans le plan horizontal [7*], puis dans l'espace 3D [6*]. L'application de l'approche de la robustesse par commutation se fait par la considération de valeurs englobantes des termes statiques apparaissant dans l'expression de la fonction de Lyapunov. Ainsi, si le concepteur du système est en mesure de fournir deux ensembles de valeurs des paramètres - l'un sur-évaluant, l'autre sous-évaluant - alors un schéma de commutation entre ces valeurs permet de garantir la robustesse de l'ensemble, résultat à retrouver dans [6*]. La similitude de cette approche avec les approches ensemblistes ou par intervalles, mériteraient d'être étudiées.

3.3.6 Etage d'actionnement

Il est à noter la différence que présentent les deux plans d'évolution du système (horizontal et vertical) du point de vue de l'étage d'actionnement de l'AUV. En effet, disposant de gouvernes de plongée à l'avant et à l'arrière, le système est iso-actionné dans le plan vertical, dans la limite de la capacité de ses actionneurs. Les gouvernes ayant un débattement et une surface réduites (il ne faut pas qu'elles soient trop réactives à haute vitesse), cette propriété d'iso-actionnement ne se rencontrera que dans des situations limitées. Il se pose alors la question de la commande d'un système à l'actionnement variable et aux propriétés cinématique et dynamique évolutives. Question proche de celle d'une gestion de redondance dans la stratégie d'actionnement (on ne peut pas dire que notre système soit redondant). Les travaux présentés dans [49*] proposent une loi de commande qui permet la transition iso/sous-actionnement en fonction de la situation des actionneurs par rapport à leur limitation.

Cette question générale de la gestion de la redondance d'actionnement est cruciale pour la robotique sous-marine. On envisage maintenant des systèmes robotiques hybrides, qui sont capables d'intervenir en un point donné, *station keeping*, tout en restant taillés pour le long cours. Evidemment sans câble ombilical, ces systèmes disposent d'actionneurs spécifiques à chacune des situations. Un(des) propulseur(s) principal(aux) et des gouvernes assurent la navigation au long cours, sur de longues distances, des actionneurs moins puissants, mais plus réactifs, assurent les phases de *station keeping*. On a donc un étage d'actionnement redondant qui permet le suivi de chemin et la stabilisation. La gestion de la transition entre ces deux modes est traitée dans [14*], sur les mêmes principes que ceux évoqués plus haut. Les avantages d'un étage d'actionnement redondant sont nombreux. Les degrés de redondance peuvent être mis à profit, suivant leur axe propre, pour optimiser des critères complémentaires, comme l'approche par fonction de tâche

que propose C. Samson, B. Espiau et M. Le Borgne [42], inspirée des travaux pionniers de A. Liégeois [43], suivis par [44], [45] et [46]. Nous proposons dans [49*] une solution qui exploite la redondance de l'étage d'actionnement d'un AUV pour optimiser sa réactivité.

En résumé, l'expression de la question du contrôle du mouvement d'un unicycle, ou d'un AUV, gagne à être exprimée sous la forme autonome d'un suivi de chemin. Ce dernier peut s'adapter pour une synchronisation ponctuelle avec, par exemple, d'autres éléments d'une flottille. De plus, le principe de guidage, permet de fusionner différents critères, compatibles, en leur garantissant une convergence GUAC. Il permet de se saisir d'une stratégie cinématique du problème. Les techniques de *Backstepping* permettent de passer à l'échelle de la dynamique, principe qui est employé pour l'extension de ces résultats au système sous-actionné qu'est notre AUV.

Ainsi, par analogie avec l'Unicycle, nous avons proposé, pour l'AUV, les résultats suivants :

- Le suivi de chemin horizontal pour un AUV est traité dans [13*].
- Sa version robuste est développée dans [7*].
- Le contrôle horizontal est à retrouver dans [6*].
- Le suivi de chemin coordonné est traité dans [17*].
- Le contrôle de flottille, dans [21*].
- La commande hybride suivi de chemin - stabilisation est à retrouver dans [14*].

3.4 La commande NGC

La commande NGC est un héritage de la Marine et vient du rôle de chacun dans la bonne marche du navire.

- Le Capitaine donne des ordres de haut niveau, relatifs à la mission. Mais laissons le de côté, pour l'instant, et intéressons nous à ceux qui font marcher le bateau.
- Le Navigateur. Son rôle est de répondre à deux questions : où suis-je ? et où vais-je ? Il dispose de cartes et de mesures sur l'état du système.
- Le Barreur reçoit des consignes du capitaine qui lui donne des objectifs, relatifs à l'avancement de la mission. Se référant au navigateur, il peut ainsi corriger l'allure du bateau. Mais le barreur a une autre fonction, il a la science du terrain : il sait réagir à une mauvaise vague, lire le vent, éviter un écueil ou la route d'un cargo. Il est réactif et ordonne à la salle des machines.
- Le Chef mécanicien interprète les consignes du barreur et conduit la salle des machines en conséquence.

Cette vision, réduite, de la répartition des rôles dans un équipage se retrouve dans la commande NGC.

- La Navigation : d'après les données capteurs, elle est en charge de positionner le système et d'estimer sa vitesse, par rapport à l'objectif de la commande. S'il s'agit de suivre une route géo-référencée, la navigation sera dite globale. S'il s'agit de se référer au terrain, plus précisément à l'échantillonnage qu'en font les capteurs, elle sera qualifiée de locale. En d'autres termes, l'objectif du système de navigation est l'estimation de l'état du système, positions et vitesses, absolues et locales à l'éventuelle référence terrain.
- Le Guidage : le guidage porte la stratégie réactive d'approche de l'objectif. Il reçoit les objectifs courants de la mission, les adapte au terrain, et fabrique la fonction d'erreur. Un guidage minimaliste est un comparateur, qui soustrait une consigne mesurée à une référence. Plus élaborée, le principe de la cible virtuelle évoqué auparavant, est aussi une stratégie de guidage. De plus, sa formulation est extensible à la prise en compte de critères complémentaires, comme l'évitement d'obstacles, rôle du barreur.
- Le Contrôle : il reçoit la fonction d'erreur et doit agir sur les moteurs pour la réduire. Il a connaissance des capacités dynamiques du système et sait comment réaliser les acrobaties que le barreur lui commande.

Une représentation schématique de cette commande est donnée à la figure 3.10. Nous l'avons vu, l'étage d'actionnement mérite sa réification, de par les questions qu'il permet de traiter. Au même titre, on définit un étage sensoriel qui, par l'échantillonnage que lui fournissent les capteurs, fabrique une vision pertinente de l'environnement. Nous y revenons.

Le précédent propos a pour objectif de mettre en lumière le principe de guidage, car il permet une structuration ouverte du problème de régulation. L'optimisation multicritères dispose d'outils puissants, et l'automaticien ingénieux parviendra à écrire une fonction de coût globale qu'un algorithme élégant minimisera, sans avoir à inventer des concepts anthropomorphiques de guidage ou d'étage sensoriel. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, le robot est un assemblage de connaissances diverses. Il faut donc que chacun, en fonction de son champ disciplinaire propre, trouve dans le système le sens qui lui convient de façon à proposer une contribution pertinente, qui s'inscrive dans le tout. Sont concernées l'automatique, l'informatique, l'électronique, le traitement du signal et les connaissances métiers de l'utilisateur.

Mais revenons à la garantie de performances et à la déclinaison que la structure NGC nous permet d'en faire. A cette étape de l'élaboration de la commande du robot, il s'agit de garantir la stabilité, la performance associée en étant la qualité de la convergence (globalité, uniformité, borne d'erreur asymptotique, *i.e.* GEC, GUAC, GAC, BIBO). Considérons

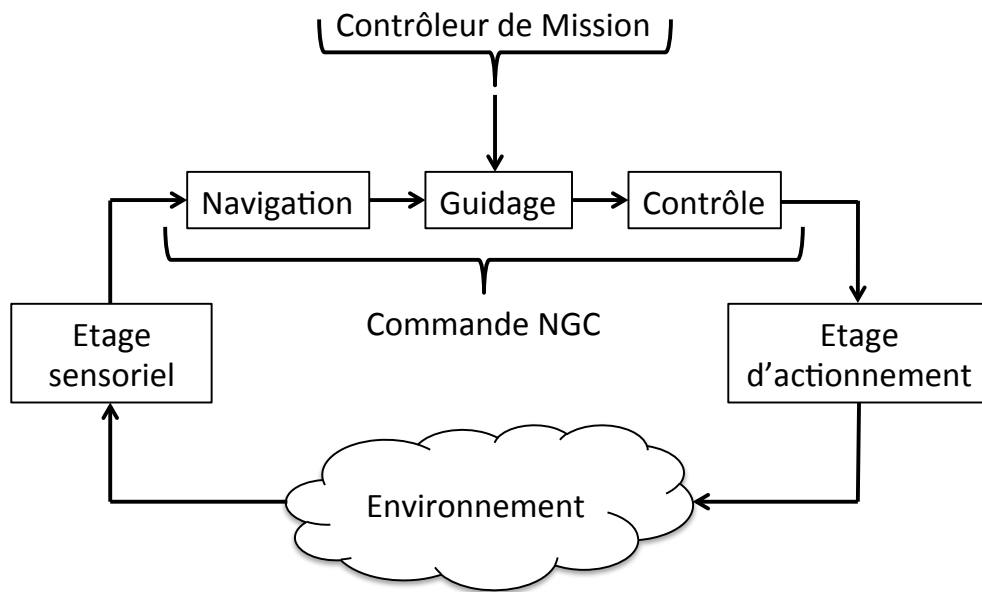


FIGURE 3.10 : La Commande NGC

tout d'abord le système de navigation. Il est un filtre (complémentaire, [48]) de fusion de données et les garanties qu'il exhibe sont de type BIBO, i.e. pour une erreur bornée des mesures capteurs, il doit délivrer une estimation de l'état du système, avec une erreur bornée. Exploiter cette garantie implique de valuer cette borne, lorsqu'elle existe. En effet, une navigation à l'estime est odométrique pour l'unicycle et intègre les accéléromètres pour l'AUV. Elle présente nécessairement un effet de dérive par l'accumulation des erreurs de mesures, et n'est, de fait, pas bornable. L'unicycle se sort mieux de cette question. Disposant d'une connaissance préalable du terrain, il peut prévoir l'évolution des données produites par son étage sensoriel. Les techniques statistiques type filtre particulaire aident, sans toutefois présenter de garantie. L'approche intervaliste que poursuit L. Jaulin permet d'obtenir une telle garantie [49]. Si notre Unicycle découvre un terrain vierge, alors, borner son erreur de navigation requiert une référence. Le GPS en est une très pratique, en extérieur et à sec. L'AUV n'a pas accès aux données du GPS. Il pourrait ne s'en tenir qu'à une navigation locale, s'il est près de son objectif et dispose des moyens de l'effectuer. Mais le géo-référencement est une nécessité pratique, et problématique, en sous-marin. Ainsi, la stratégie adoptée pour garantir (ne serait-ce que l'existence) d'une borne à l'erreur de navigation est de recourir à un système de surface, autonome, en mesure de localiser l'engin sous-marin, et de lui fournir, régulièrement ou non, sa position, un exemple de navigation collaborative que nous avons traité dans [36*]. Les communications sous-marines étant ce qu'elles sont (faible débit, intermittentes), la disponibilité du recalage apporté à l'AUV par l'ASC (en surface) peut être sporadique. Le contexte de la flottille ne fait qu'accentuer

ce problème. Son caractère distribué soulève de plus la question de la synchronisation et des dérives d'horloge, vitale pour que les systèmes acoustiques ne se parasitent pas [50]. Ainsi la borne supérieure à l'erreur de navigation de l'engin sous-marin va dépendre de nombreux paramètres, dont certains extrinsèques, par lesquels on perd ici le caractère autonome du système. La robotique sous-marine recèle encore bien des défis...

Les garanties qu'on peut attendre de la commande NGC sont résumées à la figure 3.11.

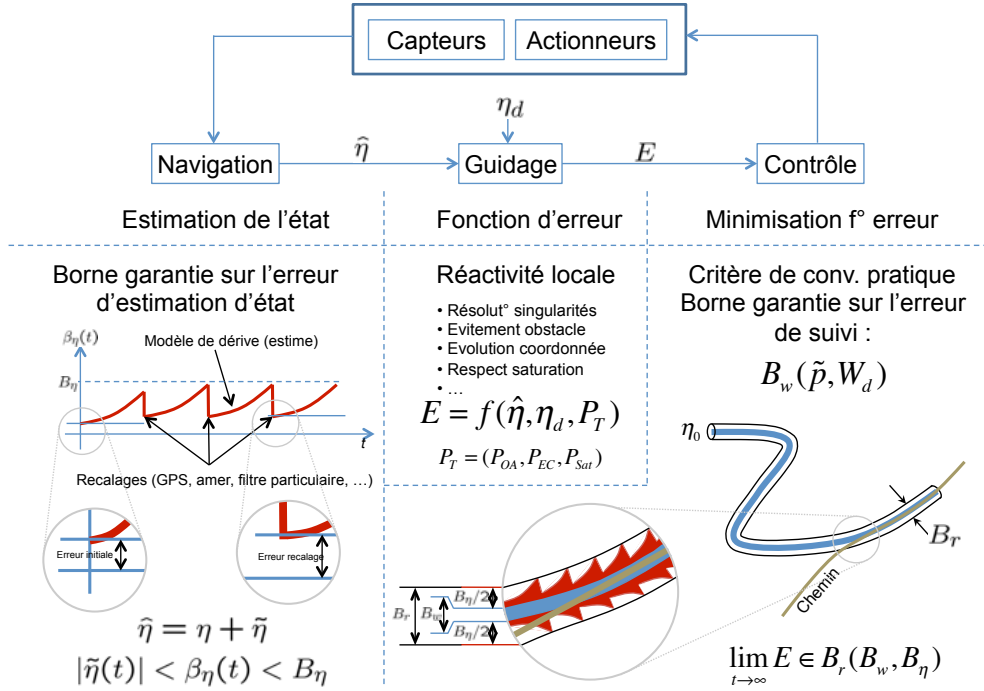


FIGURE 3.11 : La garantie de performance de la commande NGC

Se donnant un modèle bornant de la dérive temporelle (et/ou spatiale), $\beta_{\eta}(\eta, t, T_{Rclg})$, pour l'estimation proprioceptive de la position, et des instants de recalage (localisation) T_{Rclg} , la navigation globale consiste à fournir une estimation $\hat{\eta}$, d'erreur bornée $|\tilde{\eta}| < B_{\eta}$, de l'état η du système. Les phases de navigation locale recrutent les capteurs extéroceptifs, fusionnent leurs mesures, les éventuels modèles, tous d'erreurs bornées, et augmentent $\hat{\eta}$ des états relatifs aux objectifs locaux, généralement référencés au terrain.

En d'autres termes, la navigation est un filtre de fusion de données qui exhibe une convergence BIBO. Les filtres complémentaires, tels que proposés dans [47] et [48], permettent d'obtenir cette propriété. Ils permettent la manipulation des modèles non-linéaires composant le système, contrairement aux approches statistiques qui requièrent la linéarité des opérateurs pour propager les densités de probabilité. Ainsi cette approche non-linéaire permet l'obtention de garanties GUAC en l'absence de bruit de mesure, et

BIBO pour des erreurs de mesures bornées.

De cette estimation $\hat{\eta}$, le guidage se saisit. Son rôle est de fabriquer la fonction d'erreur E que minimisera l'application du contrôle. Une convergence GUAC permet de garantir l'absence de singularité (globalité du bassin d'attraction). Un critère de choix qui doit prévaloir dans l'élaboration de la stratégie d'approche de l'objectif η_d . Par exemple, le principe de la cible virtuelle évoqué avant, pour lequel η_d est un chemin, permet de supprimer la singularité $y_1 = c_c$, par une augmentation de l'état et globalise ainsi la portée de la solution. Mais les obstructions à la réalisation de l'objectif η_d peuvent encore être nombreuses : des obstacles, les capacités de l'étage d'actionnement, des communications contraignant à la tenue de la formation d'une flottille, ou à défaut une contrainte d'atteignabilité de communication... Le guidage est intrinsèquement réactif et peut se saisir de ces questions. On notera qu'il n'interdit en rien que ces dernières soient aussi traitées à un niveau plus délibératif qui, pouvant compter sur les performances (garanties) du guidage, pourra se consacrer à des questions de plus haut niveau et qui ne requièrent pas de réponse à la stricte période du calcul de la commande. Ainsi, le guidage concilie, en ligne, les intentions de mission, η_d , et les obligations du terrain, P_T .

Enfin, le contrôle, incluant l'étage d'actionnement et la dynamique, doit réaliser les mouvements qui minimisent la fonction d'erreur du guidage. Sa robustesse, aux erreurs d'estimation des paramètres $\tilde{p}$, peut être assurée par les solutions mentionnées plus haut, faisant ainsi décroître la dépendance au modèle. Il est cependant intéressant de noter la question de l'imprécision du modèle. Il ne s'agit pas de l'erreur d'estimation des paramètres du modèle, mais bien de la dynamique non modélisée, issue des ordres supérieurs négligés dans la modélisation des phénomènes physiques. En effet, cette part de dynamique négligée ne peut être considérée comme d'effet limité au même titre que les perturbations extérieures W_d . Il est incorrect de la présupposer bornée puisque dépendante de l'état. Or, cette condition (réaliste pour le cas des perturbations extérieures) est nécessaire pour conclure sur la stabilité du système, et donc la convergence de l'état. Il nous faut donc de bons modèles, qui capturent la physique du système. La valuation des paramètres devient secondaire, grace par exemple, aux différentes stratégies adaptatives présentées plus haut.

Le contrôle est aussi en charge de piloter l'étage d'actionnement. Si ce dernier est redondant, il peut alors se voir attribuer d'autres objectifs : optimiser la réactivité et supprimer l'effet des zones mortes, nous le montrons dans [49*], éviter des singularités d'actionnement, compenser un actionneur défectueux. Ainsi, en l'absence de bruit de mesure, de perturbations extérieures et disposant de modèles physiquement pertinents, sans pour autant exiger une connaissance fine de la valeur des paramètres, on peut garantir une convergence GUAC, BIBO si l'on considère des perturbations extérieures et bruits de mesures bornés, négligeant les effets de la dynamique non modélisée.

En vertu de quoi, on peut finalement garantir que le système est, du point de vue de l'automatique, asymptotiquement guidé vers une région bornée B_r autour de η_d , quelle que soit sa position initiale. On peut de plus établir des conditions sur les gains pour assurer une propriété d'uniformité de la convergence. Une solution 'automaticienne' dont les garanties sont fortes, mais qui ne considère pas les contraintes d'implémentation et d'exécution. Car, pour le roboticien, il s'agit bien de faire exécuter ces algorithmes, au sein d'une architecture informatique, portée par une électronique de commande, elle-même pilotant les systèmes électromécaniques que sont les actionneurs et capteurs.

La figure 3.12 représente une vue schématique de la commande NGC dans son environnement d'implémentation.

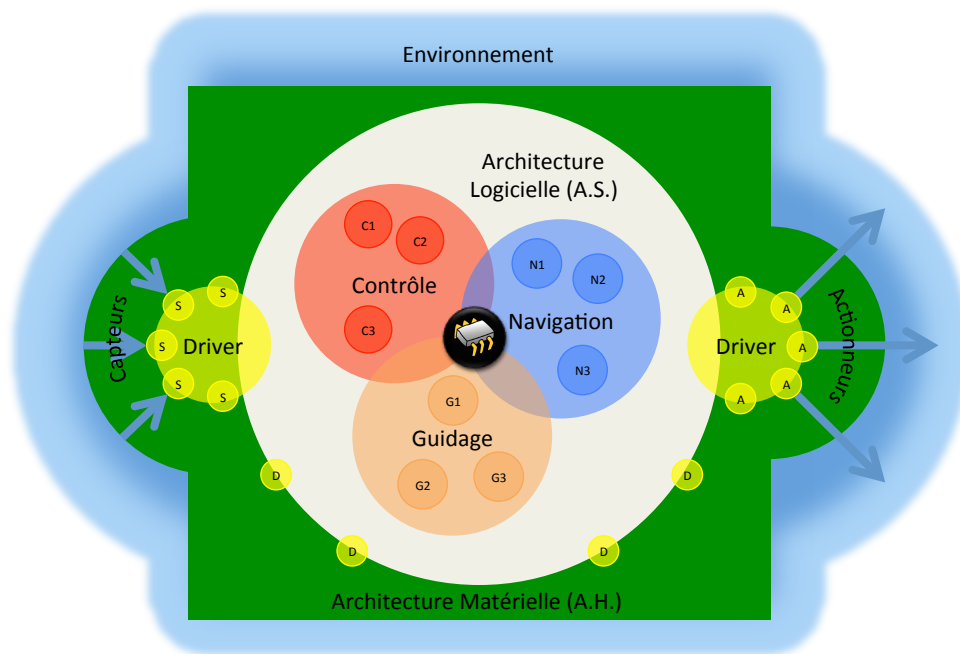


FIGURE 3.12 : La commande NGC dans son environnement d'implémentation

Nous l'avons vu, la commande NGC décompose la question du contrôle du mouvement en trois fonctions robotiques élémentaires. L'enchaînement séquentiel des trois fonctions (Navigation-Guidage-Contrôle) permet, depuis les données issues des mesures, de calculer la consigne à envoyer aux actionneurs. Le contexte de la mission, et sa variabilité, va nécessiter de recourir à différentes versions de ces fonctions, adaptée à la disponibilité des capteurs (Navigation), à l'enchaînement de sous-objectifs (Guidage) et à la réactivité dynamique du système (Contrôle), par exemple. La figure 3.12 représente les différentes versions de ces jeux d'équations sous la forme de cercles colorés, rouge pour le contrôle, bleu pour la navigation, marron pour le guidage. Leur évaluation se fera par l'intermédiaire d'un algorithme venant occuper une unité de calcul (unique dans notre cas).

Ainsi, du point de vue du calculateur, la commande NGC résulte en une exécution séquentielle et ordonnée (contraintes de précédence) d'algorithmes, suivant l'arbitrage qu'en fait l'Architecture Logicielle (Arch. Soft : AS). Cette dernière suit une partition pertinente, conduite par le *middleware*, nous y reviendrons. Elle pilote l'ensemble de l'Architecture Matérielle (Arch. Hard : AH) au travers de l'exécution des différents *drivers* (D), certains relatifs au pilotage de l'électronique, d'autres à celui des capteurs (Sensors : S) et produisant un échantillonnage de l'environnement conforme aux hypothèses de l'automaticien. Enfin les *drivers* qui pilotent les actionneurs (A) et qui doivent, eux aussi répondre aux attentes de l'automaticien et produire les effets escomptés.

La recherche de garanties de performances affecte l'intégralité des étages du système. Elle requiert maintenant d'explorer chacun de ces niveaux et de leur affecter des performances désirées. La conception globale du système devra répondre à ces critères.

J'aborde maintenant un domaine vers lequel mes travaux m'ont conduit : le génie logiciel. Mes confrères experts me pardonneront l'emploi abusif de certains termes, ou d'autres mal choisis. Mais un détour par leur science s'avère nécessaire, je ne suis bien sûr pas le premier à m'y aventurer.

4.1 Le contexte d'exécution

L'exécution des algorithmes de la commande est portée par l'Architecture Logicielle (également appelée *Software Architecture* - AS dans ce qui suit), qui gère l'utilisation des moyens de calcul et enchaîne l'exécution des fonctions robotiques de base, en respectant entre autres, des contraintes de précédence et temporelles. Ainsi, dans notre cas simplifié, un enchaînement du calcul Navigation-Guidage-Contrôle permet de calculer la commande. A ceci se rajoute bien sûr l'exécution des algorithmes de pilotage du matériel (drivers), capteurs et actionneurs. Cette exécution séquentielle, de chaque fonction ou de chaque ligne de code, impose une réalisation discrète du calcul de la commande. D'autant que les capteurs échantillonnent l'environnement avec leur fréquence propre (potentiellement variable, surtout en acoustique sous-marine), le tout produisant des consignes (discrètes) pour les actionneurs qui présentent eux aussi une bande passante spécifique. Dans ces conditions, que deviennent les performances que garantit l'automaticien ? Les approches linéaires de l'automatique discrète montrent la complexité du problème, car on sait maintenant que la stabilité d'une solution continue appliquée à un système discret dépend fortement de la période d'échantillonnage, ou plutôt des périodes d'échantillonnages, contextuellement variables pour le cas sous-marin. Il n'est pas d'argument pour dire que les choses devraient être plus simples dans un contexte non-linéaire. Ici, les travaux relatifs à l'*Autonomic Computing* devraient apporter des éléments de réponses déterminants. Ils traitent de questions similaires pour des systèmes informatiques (en réseau ou non). Comment allouer les ressources (calculs et/ou transmission de données) à des processus, parfois distribués, en fonction d'un critère temporel (respect d'une date d'exécution) ou énergétique. L'extension de ces résultats à la stabilité d'un système dynamique physique n'a été abordée que récemment. Citons les travaux sur ORCAD de Daniel.

Simon *et al* [51] qui illustrent clairement la pertinence de ces questions.

Outre les précédentes considérations, le réflexe habituel du roboticien est de surdimensionner le système. On le dote d'actionneurs efficaces, réactifs et réversibles, de capteurs rapides et précis et d'un calculateur puissant... pour, dans le cas de l'AUV, piloter un système lourd et plongé dans un milieu visqueux, dont la bande passante naturelle rejette de fait les conséquences des différents échantillonnages aux fréquences bien plus élevées. On connaît les limites de cette approche. Elle explose les coûts, réduit l'autonomie énergétique et engendre des systèmes lourds. Trop lourds pour les applications qu'on attend de la robotique, notamment sous-marine.

Sans encore aborder la question de la commande en flottille, il faut souligner les contraintes que portent un engin seul. L'absorption des ondes électromagnétiques par le milieu (l'eau) fait que de nombreux capteurs (sonars, modem, caméras acoustiques) sondent l'environnement par l'analyse des réflexions acoustiques avec de basses fréquences. Ainsi, le signal porte peu d'information, résultant en des communications de très faible débit et des capteurs lents et de période contextuellement variable, le tout potentiellement interfèrent. Cette question requiert une orchestration précise de l'étage sensoriel, qui devra jouer un échancier (potentiellement dynamique) qui, par une allocation de créneaux temporels disjoints, préviendra tout recrutement simultané de capteurs interférents. La variabilité des différentes fréquences d'échantillonnages est actuellement prise en compte par un élargissement conservatif des plages temporelles allouées. On arrive rapidement aux limites du système. Une approche permettant de mieux exploiter le calculateur consiste à exploiter le temps laissé généralement inusité entre la phase d'émission et de réception d'un même capteur. Une architecture de contrôle le permettant est proposée dans [50]. Bien sûr, tout ceci n'est possible que si cette architecture exhibe des garanties d'exécution Temps Réel. Rappelons que le Temps Réel n'est pas la capacité d'un système à faire beaucoup de calcul en peu de temps. Il s'agit de garantir une exécution déterministe et une durée de calcul bornée. Et de là, exploiter cette propriété pour bâtir des schémas (enchaînement séquentiel de processus) garantis, eux aussi. La figure 4.1 illustre la question.

Elle représente un AUV doté de capteurs acoustiques tels que : *Side Scan Sonar* (SSS), *Front Looking Sonar* (FLS), *Doppler Velocity Log* (DVL), modem acoustique (COM). D'autres capteurs classiques sont représentés : *conductivity Temperature Depth* (CTD) et caméra. A ceux-ci se rajoutent les centrales inertielles, compas, inclinomètres, etc. La charge acoustique embarquée doit être gérée avec soin. La considération des interférences potentielles entre capteurs acoustiques, dues à des fréquences de fonctionnement proches ou à leurs harmoniques, est une question difficile. Patrick Arzelies déploie des solutions pour les engins de l'Ifremer [53]. Basées sur un partage temporel conservatif, elles préviennent tout recrutement simultané de capteurs interférents. Comme nous l'avons évoqué plus haut, les limites du système sont très vite atteintes, conduisant à une

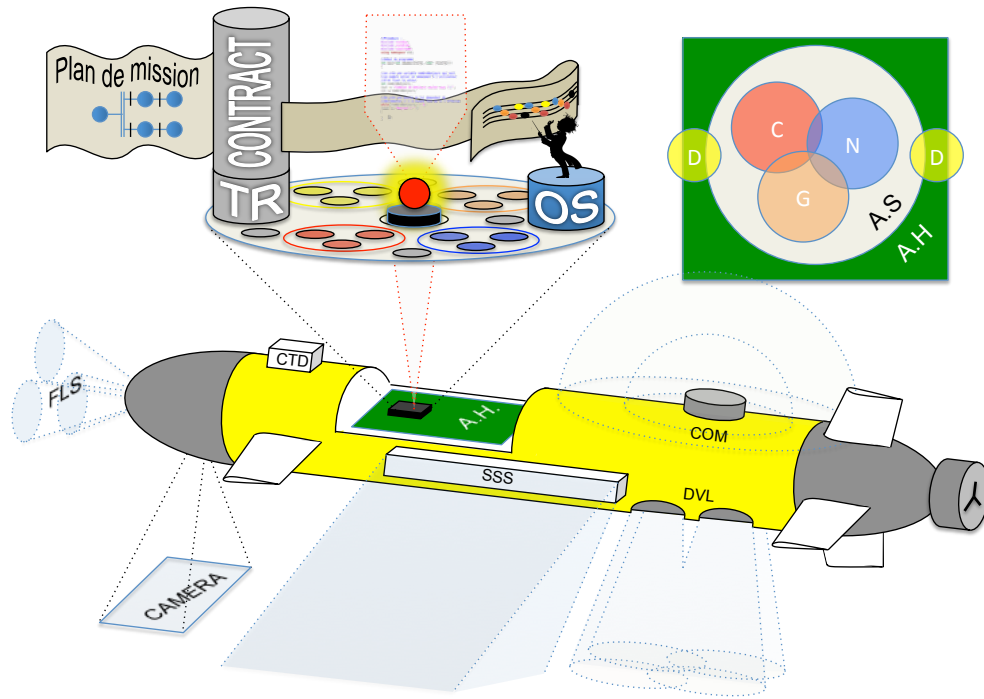


FIGURE 4.1 : AUV et implémentation

approche séquentielle conservatrice du recrutement des capteurs et de la communication. Il nous faut disposer d'outils permettant une approche plus fine de la question. Une forme d'*opportunisme asynchrone* doit être rendu possible par les mécanismes de l'architecture de contrôle. Revenons à la figure 4.1. L'architecture matérielle (AH) porte une unité de calcul, représentée par un parallélogramme noir. Ce calculateur (unique dans notre cas) effectue des opérations algorithmiques relatives à l'exécution du processus qui l'occupe. Illustrée par un cercle rouge, ce processus est un élément de la suite algorithmique qui pilote l'engin. La grossière décomposition NGC conduirait à lui attribuer, pour l'exemple, une fonction de contrôle. Devraient suivre les processus relatifs aux *drivers* des actionneurs (cercles jaunes), puis enchaîner sur un nouveau cycle de calcul de la commande : *drivers* capteurs (cercles jaunes), puis Navigation (cercles bleus) et Guidage (cercles oranges). L'orchestration de cet enchaînement est effectuée par le système d'exploitation (OS) qui requiert lui aussi des processus spécifiques (cercles gris). La partition jouée doit répondre à l'ensemble des contraintes d'exécution évoquées avant. Elle est jouée par le *middleware*, ConTract qui, s'appuyant sur le noyau Temps Réel (TR) de l'OS, permet la traduction du plan de mission en enchaînement séquentiel, et cohérent, de processus exécutables par le calculateur, aux instants requis. La panoplie des mécanismes offerts par le *middleware* est essentielle. C'est pour offrir de telles possibilités que ConTract a été développé par D. Andreu et dont l'évolution est aujourd'hui assurée par Robin Passama [54]. Porté sur

Linux/RTAI et Xenomaï il est devenu le principal support de nos implémentations et la référence empirique de nos travaux sur les architectures de contrôle, exposés plus loin.

Si des solutions existent pour piloter un AUV, la question de la flottille reste entière. Outre la complexité accrue, de par le nombre, des points précédents, il se pose de nouveaux problèmes. Le caractère distribué de la flottille souligne la question des dérives d'horloges qui limitent la validité de l'hypothèse synchrone à un horizon temporel restreint. D'autant que les nécessaires communications entre les membres exploitent le même médium (l'eau), et son occupation doit, elle aussi, être gérée. De plus, les opérations sous-marines clefs de notre époque (localisation et récupération de boîtes noires en moins 30 jours¹, par exemple) réclament d'étendre la zone que le système est en mesure d'analyser. La réponse est la multiplication des robots, porteurs d'une instrumentation identique, essentiellement acoustique, et donc interférente. À l'instar de la question du contrôle coordonné, celle de l'échéancier du recrutement des capteurs se pose aussi à l'échelle de la flottille, devant maintenant considérer le problème des dérives des horloges individuelles. La précision de l'échéancier augmente, sa granularité temporelle diminue et le système doit être en mesure d'y répondre, par des garanties temporelles d'exécution. Dans ce contexte, l'hypothèse synchrone est très limitative. Le système doit être structurellement taillé pour l'asynchrone, cela favorise l'opportunisme, reste à savoir comment le mettre en oeuvre...

Revenons pour l'instant sur le cas de l'AUV unique et, laissant de côté la question des effets de la discrétisation du calcul et de l'échantillonnage des mesures, voyons comment mettre en musique les différents algorithmes qui contrôlent le système. On entre ici dans le domaine du Génie Logiciel, pour la Robotique. On vient de voir à quel point les solutions qu'apporte ce domaine sont essentielles. L'approche des Systèmes Temps Réel fournit non seulement des outils d'implémentation, mais aussi une vision particulière du système. L'informaticien a su, il y a 40 ans, transposer le génie du *Légo* à la structuration de ses solutions. La Modularité et la Réutilisabilité sont deux des propriétés recherchées. Elles ont permis le développement de cet infiniment complexe environnement numérique qui peuple nos vies. Cependant cette approche ne suffit pas, sinon l'emploi conjoint des techniques actuelles qu'ont apportées l'Automatique et le Génie Logiciel aurait déjà dû produire des solutions pour maîtriser la complexité exponentielle des systèmes qu'on attend de la robotique, comme l'informatique l'a fait. Cette question occupe de nombreux travaux, à l'interface des deux disciplines.

1. Durée légale d'émission de la balise sub-aquatique. La norme militaire, bientôt généralisée à l'aviation civile, impose une durée d'émission de 90 jours.

4.2 Le processus d'implémentation

Imaginons que l'automaticien arrive avec une élégante solution pour réguler un système physique, d'essence continue, et voyons par quels processus va passer sa collection d'équations convergentes. Les approches homologues, qui ont vu le développement de solutions électroniques de régulation continue, ont mené à d'ingénieux développements de calculateurs continus, mais qui ont depuis cédé le pas à leur version numérique, d'une puissance de calcul bien supérieure. Dès lors, le régulateur perçoit et agit sur le monde de manière discrète.

La première opération est l'algorithmique, vaste sujet dans lequel je n'entrerai pas, si ce n'est pour souligner la discrétisation de l'action du régulateur qu'elle induit. Ensuite vient la structuration de la suite algorithmique, dont l'exécution a été évoquée précédemment. Enfin, dernière étape de la concrétisation de la régulation, l'architecture matérielle qui comprend l'ensemble des calculateurs, capteurs et actionneurs. Le schéma de la figure 4.2 illustre ce processus.

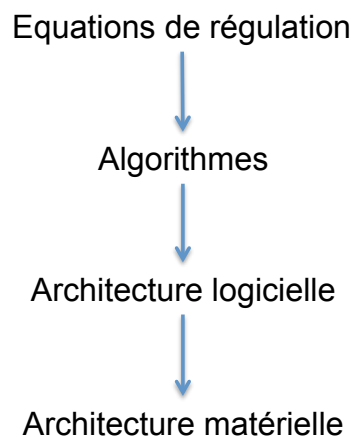


FIGURE 4.2 : Le processus d'implémentation

Quatre étapes et trois transitions au travers desquelles sera moulinée la solution d'origine, aux propriétés mathématiques assurées. L'expression du devenir de ces propriétés est une question essentielle pour deux raisons : son exploitation permettrait un juste dimensionnement du système et, de par la caractérisation qu'elle en fait, de composer les systèmes et ainsi passer l'échelle de la flottille. Le cas sous-marin est le parfait exemple d'applications pour lesquelles les approches classiques de surdimensionnement ont atteint leur limite. Un engin dont la navigation dépend de communications sporadiques avec ses partenaires, s'appuyant sur des capteurs interférents dont la disponibilité dépend de l'usage que les autres font de capteurs similaires, se référant à un terrain complexe et avec de très faibles capacités de supervision doit pouvoir, quand bien même, assurer sa

mission. L'établissement de garanties est ici une nécessité. C'est cette orientation que je souhaite donner à mes travaux. Je ne suis bien sûr pas seul dans cette aventure, le bagage automatique ne suffit pas, mais ses exigences doivent persister. Je présente dans ce qui suit les actions de recherches auxquelles je participe et qui oeuvrent dans ce sens.

4.2.1 Algorithmique et Automatique

L'automaticien, dans son désir de concevoir des régulateurs aux performances garanties, est enclin à considérer au mieux le système et son environnement, de par les modèles qu'il s'en donne. Ainsi, il développe des commandes orientées capteurs, voire référencées modèles environnementaux, robustes et prédictives. Les garanties de convergence qu'il obtient mêlent allègrement des conditions sur la dynamique du terrain, celle du système, les imprécisions de leur modèle, les périodes d'échantillonnages capteurs, celle de la commande, et leur gigue, éventuellement non bornée (en cas de rupture des communications, par exemple). Imaginons un instant qu'un tel résultat soit établi, la structure que lui donne le seul prisme de l'automatique ne permet pas de distinguer, d'identifier, l'origine des connaissances impliquées dans la solution, en vue de leur (ré)exploitation pour la diversité des applications qui attendent le système. La traduction des équations de l'automaticien en une collection d'algorithmes nécessite une phase de décomposition délicate, pour deux raisons : i) elle doit préserver les garanties convergence absolue précédemment établie. Pour se faire, ces algorithmes doivent s'exécuter au sein d'une architecture logicielle qui offre des garanties, certifiables et mesurables - d'où l'importance du *middleware*, de ses mécanismes et surtout des indicateurs qu'il propose de façon à contrôler le respect des contraintes d'exécution. Les travaux que je présente dans la suite participent à l'évolution de ConTract en ce sens - et ii) cette décomposition est aussi l'occasion de structurer l'architecture logicielle pour répondre à la diversité des applications et de leurs acteurs. Pour ce faire, nous avons choisi, dans le cadre de la thèse de Adrien Lasbouygues dont j'assure le co-encadrement sous la direction de David Andreu, de suivre une décomposition basée sur les 'connaissances' et leur origine. Les échanges avec Hervé Jourde (PR UM, HSM), hydrogéologue spécialiste du karst, guident nos travaux pour réaliser cette décomposition, dans le cadre du projet KARST, évoqué plus loin.

La décomposition atomique

Adrien Lasbouygues est actuellement en troisième année de thèse. Il s'intéresse à la décomposition modulaire d'une solution de régulation pour un contexte particulier : l'exploration karstique. Le choix de ce contexte, qui nous conduit à réaliser des robots sous-marins spéléologues devant évoluer dans des conduits karstiques (cf section 5.2), est pertinent en ce sens qu'il présente un environnement très présent qui a un impact certain sur la navigation, les lois de commandes, la gestion de mission... De plus, cet environne-

ment chaotique impose des stratégies de régulation spécifiques à chaque situation : grand vide karstique, méandre étroit, conduite régulière, fermée ou ouverte, courants variables... La connaissance de l'hydrogéologue, en tant que spécialiste du terrain, est ici primordiale et doit trouver sa place dans l'architecture de contrôle, au même titre que les autres composantes du système.

Adrien travaille dans ce sens. Il développe tout d'abord une solution de régulation, GUAC [48*], de centrage réactif du robot sous-marin Jack, muni d'un sonar profilométrique, évoluant dans un modèle de conduit karstique. Il décompose ensuite les équations résultantes en une suite d'*atomes* qu'il définit en fonction de l'origine des connaissances qu'il a fallu exploiter pour leur écriture : le modèle du robot, ses étages d'actionnement et sensoriel, le modèle d'interaction avec l'environnement, les modèles d'environnement, les objectifs de l'utilisateur, ceux de la stabilité... Autant de familles d'atomes ré-utilisables qui permettent d'aborder la diversité des applications par une 'composition de connaissances'. Ainsi Adrien propose une structure atomique, composable, sur laquelle il réifie un critère temporel préservant la stabilité de la composition ; critère relatif à la période d'activation des atomes en regard d'une plage acceptable de valeurs d'échantillonnage, de façon à garantir la stabilité. Changer d'utilisateur, de robot ou de stratégie de navigation devient alors aisé, pour peu que certaines propriétés soient respectées. Ces travaux, encore en cours, ont donné lieu aux publications [48* et 51*].

4.2.2 Architectures logicielles

La question de l'architecture logicielle pour la robotique est un domaine de recherche à part entière, vers lequel mes travaux se tournent. J'apporte ma vision de roboticien, qui porte des exigences propres qui, si elles sont respectées, assurent la stabilité du système, et au delà l'établissement de garanties de performances. Le *middleware* ConTract offre des outils de structuration du code dont l'exécution s'appuie sur les garanties offertes par le système d'exploitation. Nous concevons maintenant les architectures logicielles de nos systèmes avec cet environnement de développement et participons à son évolution par nos préconisations roboticiennes.

Tolérance aux fautes et Architectures observables

Ces travaux s'effectuent en collaboration avec Didier Crestani et Karen Godary, la démarche que nous suivons est présentée dans [12*]. Il s'agit de proposer des évolutions de ConTract de manière à y inclure des processus d'observation et d'évaluation des performances des modules composant l'architecture. En effet, on peut considérer que tout module, ou enchaînement séquentiel de modules, doit fournir un résultat qui puisse être comparé aux garanties qu'un fonctionnement nominal lui confère. Ce type d'approche est déjà utilisé dans le cadre de la Tolérance aux Fautes, qui permet au système d'effectuer un

diagnostic de son état global, par comparaison de ses mesures à une banque de modèles (MMKF - [55]). Ou encore dans des stratégies de navigation qui fusionnent opportunément les niveaux odométrique, local et global, pour peu qu'on puisse évaluer une borne supérieure à son erreur courante [48] et [47]. Les travaux que Bastien Durand, encadré par D. Crestani et K. Godary, a mené sur le sujet traitent de ce mécanisme. Sans s'attacher particulièrement à de nouvelles techniques d'évaluation, il a proposé un mécanisme générique d'inclusion de modules d'observation au sein de l'architecture. Ainsi, il peut composer les performances de chacun pour évaluer la réussite de la mission. J'ai collaboré à ces travaux. Ils ont conduit aux publications suivantes [26* à 29*].

Garantie de performances et Autonomie Adaptative

Lotfi Jaiem est actuellement en deuxième année de thèse. Je co-encadre ses travaux sous la direction de D. Crestani. Ils ont pour objectif de traiter de la garantie de performance à l'échelle de la mission. En d'autres termes, de répondre à la question : le système peut-il garantir l'accomplissement de sa mission, et sous quelles conditions évaluables ? Pour cela, nous définissons cinq axes de performances : énergétique, sécuritaire, localisation, temporel et stabilité. Pour chacun, nous définissons des *indicateurs* de la performance et identifions les *leviers* qui permettent leur régulation.

- Axe énergétique : il permet de réaliser une prédiction de l'évolution de la charge énergétique du robot (terrestre dans ce cas) suivant des modèles de consommation de ses composants dissipatifs (capteurs, actionneurs, et calculateurs) et le niveau de connaissance de l'environnement dont dispose le système. Il peut ainsi estimer la charge énergétique nécessaire à la finalisation de la mission. Le niveau des ressources énergétiques disponibles est évalué par la mesure de l'état des batteries. Considérant une marge conservative, le système produit les indicateurs nécessaires à la prise de décision de poursuivre la mission, ou l'interrompre pour rallier un point de recharge. Les leviers exploités sont les paramètres cinématiques de la mission (vitesses nominales), le choix des capteurs (parmi ceux qui sont redondants) et celui du schéma de commande (Navigation, guidage et contrôle). Un module de planification de chemin sera prochainement avantageusement intégré. L'identification d'une solution faisable, du point de vue de la préservation de la marge conservative évoquée plus haut, est directe considérant le gradient des leviers et les modèles simples que nous manipulons. Si aucune solution n'existe, le système informe l'opérateur qui agit en conséquence.
- Axe sécuritaire : il assure l'innocuité du système. Ceci concerne les capacités du système à éviter les obstacles et, en cas d'échec, à ne participer à l'impact résultant qu'à hauteur d'une énergie inférieure à 2 Joules (Décret n°95-589 du 6 mai 1995). La capacité du robot à éviter des obstacles fixes peut être garantie, comme nous l'avons vu au chapitre précédent. Ainsi un échec serait provoqué par un obstacle mobile, d'intention et de cinématique potentiellement ni prédictible ni bornée. En

d'autres termes, un humain qui, législativement, ne tolère que des impacts inférieurs à 2 joules. Cela limite l'énergie cinétique véhiculée par notre système en présence d'humains. Considérant la masse de notre expérimentateur (Pioneer P3DX, 20Kg env.), nous obtenons une vitesse maximale d'évolution (0.5m/s). Le respect de la contrainte sécuritaire implique aussi de pouvoir détecter les obstacles mobiles, ce qu'une simple corrélation des données sensorielles permet. Une analyse de la carte et un agenda de fréquentation, si disponibles, permettent, de plus, de prédire l'évolution du critère sécuritaire pour le reste de la mission, impactant de fait l'axe énergétique.

- Axe localisation : un robot doit se localiser, dans sa propre carte, éventuellement située dans un schéma global *a priori*. L'évaluation courante de l'erreur de navigation est essentielle. Elle conditionne la réalisation de la mission, qui requiert une précision donnée. Différentes stratégies de localisation sont disponibles, en fonction des capteurs et des algorithmes de navigation disponibles. Notre système dispose de codeurs de roue, d'une ceinture de 16 proximités ultra-sonores, de deux proximités laser et d'une caméra. Les différentes stratégies de localisation associées sont l'odométrie, filtrage particulière (US et/ou laser), chromolocalisation* (laser), reconnaissance QR-code (caméra). Ainsi, le système dispose d'une panoplie de stratégies de localisation, chacune de performance, cout énergétique et période d'échantillonnage différents. Un modèle de dérive de chaque scénario est identifié et permet la réification des indicateurs et leviers relatifs à cet axe.
- Axe temporel : il s'agit du respect d'une durée maximale à la mission. Ce critère peut se décomposer aisément suivant des sous-objectifs séquentiels vérifiables. Il impacte évidemment l'axe énergétique et est traité de façon similaire.
- Axe stabilité : le système doit en permanence assurer sa stabilité. La vérification de ce critère est essentiel, non seulement sur chaque schéma de commande, mais aussi durant les commutations qui s'effectuent entre eux. Un sujet difficile mais incontournable que nous abordons au travers des travaux de Silvain Louis, présentés plus loin.

Lotfi Jaiem a défini les caractéristiques de chacun des axes et propose une architecture de contrôle permettant leur manipulation. Il a mis en oeuvre les trois premiers et est actuellement en phase de validation expérimentale. Les publications sont en cours d'écriture.

Il faut tout de même convenir que la garantie formelle globale de notre démarche sera délicate à obtenir. Mais nous disposons d'un atout encore inexploité : l'opérateur. Considérons une tâche facilement réalisable par un humain (livraison de courrier, par exemple), et incluons ce dernier, en tant qu'opérateur, au système considéré. L'environnement est considéré comme structuré, connu et peuplé d'humains potentiellement imprédictibles (i.e. le laboratoire). En cas de défaillance totale du robot, l'opérateur pourra physiquement

intervenir et prendre le relais de la machine. L'accomplissement de la mission est donc toujours garanti, avec certaines performances. Plus le robot sera en mesure de garantir l'exécution de tâches complexes, plus le travail de l'humain sera allégé, se résumant à une tâche de supervision dans le cas optimal. Ce postulat peut paraître simpliste, mais il place l'humain, et son expertise, au coeur du système et met en lumière la question de l'autonomie contextuellement variable. En effet, l'exploitation de l'expertise de l'homme dépend du lien de communication, et de sa capacité. Une téléopération requiert un lien en mesure de supporter un flux vidéo. Aisément réalisable dans un contexte terrestre, mais qui implique une connexion physique entre l'opérateur et le robot pour le cas sous-marin, lien ombilical qui doit disparaître. La capacité du lien devient maintenant explicitement variable, celles de la téléopérabilité et de la supervision aussi, ainsi que les niveaux d'autonomie du robot [12*].

Architectures polyvalentes

Benoît Ropars est actuellement en troisième année de thèse CIFRE, en partenariat avec la société CISCREA, fabricante du ROV Jack. La mission de Benoît est de décliner le principe de polyvalence à tous les étages du robot (mécanique, électronique, sensoriel, d'actionnement et logiciel) et de produire des recommandations sur leur conception. Il met en oeuvre le résultat de ses réflexions sur notre expérimentateur en fonction des différentes applications que nos projets requièrent et peut ainsi préconiser une évolution du Jack de base de façon à compléter la gamme des produits de CISCREA.

La polyvalence du robot impose que l'on puisse l'adapter selon la charge utile (capteurs à embarquer), la puissance d'actionnement nécessaire (notamment selon le milieu dans lequel il évolue) et l'intelligence embarquée requise (capacité décisionnelle). Ces considérations conduisent Benoît à concevoir de manière cohérente les différentes architectures du robot, à savoir : l'architecture mécanique, l'architecture matérielle (au sens des cartes électroniques) et l'architecture logicielle (informatique et automatique).

Architecture mécanique

L'évolution du robot suppose dans un premier temps une évolution « mécanique », au sens de la possibilité d'adapter le vecteur au besoin : porter des capteurs encombrants, augmenter la puissance d'actionnement, accroître l'intelligence embarquée. Dans sa version de base (Figure 4.3-a) le Jack embarque un étage d'actionnement composé de 6 moteurs, des moyens d'éclairage pilotables, un ensemble de capteurs tels que mesure de température interne, mesure de température du milieu, détection d'entrée d'eau, centrale inertielle, mesure de pression, caméra, et enfin une carte de contrôle bas-niveau permettant de supporter les processus d'acquisition des données capteurs, de contrôle des actionneurs ainsi qu'un lien de téléopération.

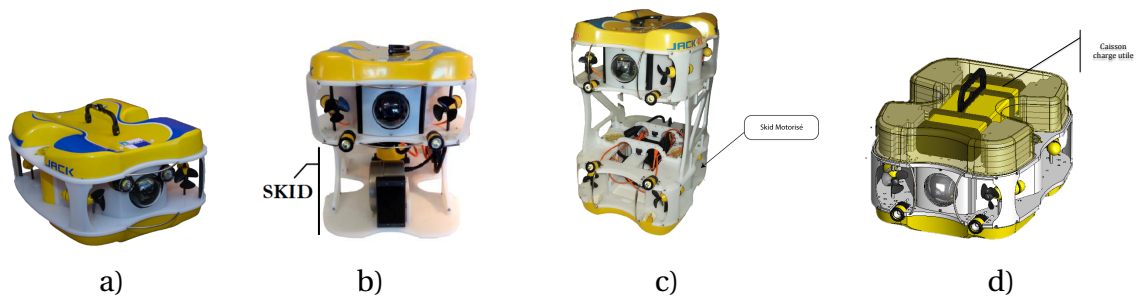


FIGURE 4.3 : Les différentes évolutions courantes du robot Jack

La version de base peut être modifiée par l'ajout d'un châssis, appelé 'skid', permettant d'embarquer des capteurs encombrants (Figure 4.3-b). L'inconvénient de ce skid est son impact sur la dynamique du système. Le(s) capteur(s) porté(s) par le skid sont connectés au caisson « contrôle bas-niveau » par le biais d'un lien ethernet. Un des inconvénients de ce skid est, comme nous l'avons mentionné, son impact sur la dynamique du vecteur car il induit un couplage en tangage et roulis. Un positionnement fin de l'engin en action requiert d'accroître les capacités d'actionnement du système (Figure 4.3-c). De fait le système devient sur-actionné, et la gestion dynamique de cette redondance permet un gain conséquent en précision, réactivité et robustesse [49*].

Dès lors que le vecteur doit accomplir des missions de façon autonome, ou partiellement autonome, il est nécessaire de le doter de ressources de calculs supplémentaires. Un caisson 'contrôle haut-niveau' est ajouté au vecteur (Figure 4.3-d). La connectique devient un point important pour préserver l'évolutivité du vecteur. Il va de soi que cette évolution mécanique doit être accompagnée d'une évolution cohérente des architectures.

Architecture matérielle

L'architecture matérielle est entendue au sens de l'architecture issue de la composition des cartes électroniques embarquées. Ces cartes sont distinguées au regard des fonctions qu'elles supportent. Rappelons que la préoccupation est relative à l'évolutivité, et donc à la possibilité d'ajouter des cartes selon la version du robot, à savoir une version plus ou moins évoluée en termes d'autonomies opérationnelle et décisionnelle. Il s'agit de la capacité à faire ou à conduire seul des actions évoluées comme, par exemple, assurer le contrôle en profondeur (faire) et enchaîner un ensemble d'actions selon la mission définie (conduire).

La proposition de Benoit est basée sur une carte contrôle bas-niveau au sein de laquelle peuvent être déployées des fonctions multiples permettant à l'opérateur de piloter le vec-

teur en donnant simplement des consignes (par ex. la profondeur à laquelle le vecteur doit être stabilisé). Cette carte permet également un contrôle direct des actionneurs, dans un mode que l'on pourrait qualifier de 'transparent', que l'on évoquera plus tard. Cette carte bas-niveau doit également être connectable au caisson d'extension de l'actionnement, c'est à dire un caisson apportant un ensemble de moteurs supplémentaires, nécessaire notamment lorsque le robot comprend un skid.

La réalisation d'un vecteur robotique plus évolué, au sens d'un vecteur doté de capacités décisionnelle et opérationnelle plus importantes, passe par l'ajout d'une carte haut-niveau en charge des fonctions correspondantes comme la gestion de mission, la gestion des modes de fonctionnement, des fonctions de contrôle plus évoluées (dont les algorithmes requièrent une puissance de calcul supérieure à celle offerte par la carte de contrôle bas-niveau), voire même des traitements d'images vidéos ou sonar. Le lien entre les deux cartes, haut-niveau et bas-niveau est important ; d'une part il ne doit pas introduire de latence conséquente, inhibant sinon la possibilité d'un contrôle du robot par la carte de haut-niveau, et d'autre part il doit permettre différentes connexions selon la version. En effet, cette architecture matérielle est connectée ou non, à l'opérateur selon le type de vecteur que l'on considère.

- Soit un vecteur de type ROV, dans ce cas il y a un cordon ombilical entre le poste opérateur et le robot. Deux types de configuration sont dès lors possibles selon la version du vecteur : un lien de télé-opération connecté au contrôleur bas-niveau, permettant un pilotage direct de l'étage d'actionnement, ou un lien de télé-opération connecté au contrôleur haut-niveau, offrant ainsi à l'opérateur des services évolués et une supervision fine.
- Soit un vecteur de type AUV et dans ce cas il n'y a pas de cordon de télé-opération. Le système est autonome et seule une supervision réduite est possible, via une communication acoustique au mieux intermittente. Un des enjeux est dans l'analyse en ligne des données sensorielles pour fournir des modèles d'environnement exploitables par l'étage décisionnel du robot. Ce point souligne l'importance de l'architecture du système qui doit être en mesure de recueillir la connaissance métier de l'utilisateur et l'exploiter à des fins de navigation éclairée.

Architecture de contrôle

Benoît propose que l'architecture de contrôle s'organise autour de modes de fonctionnement, définis ci-après.

- La télé-opération bas-niveau directe à travers laquelle l'opérateur contrôle directement les moteurs en transmettant les consignes. Cela requiert beaucoup de dextérité et il est difficile de contrôler le robot. Il est préférable et plus réaliste, au sens de la

maniabilité, que l'opérateur régule le système dans un référentiel qui lui convient, en adéquation avec les informations qu'il reçoit et ses capacités d'action sur le système. Considérant le retour vidéo de la caméra frontale, le référentiel attaché aux degrés de liberté (DDL) du système est plus adéquat. Dès lors cela suppose que la projection entre degrés de liberté et d'actionnement (moteurs impliqués) soit clairement déterminée. Benoit introduit ici le concept de *répartiteur*. Le répartiteur est d'autant plus important qu'il doit assurer cette projection soit sur 6 soit sur 12 moteurs, selon que le robot est doté d'un second caisson d'actionnement ou non (caisson d'actionnement ajouté lors de l'utilisation d'un skid par exemple). Un tel contexte prohibe une téléopération directe des 12 moteurs. Le répartiteur permet d'exploiter la redondance structurelle et ainsi piloter le système par plusieurs consignes selon les DDL du système impliqués dans le pilotage en cours. De plus, d'autres contraintes peuvent être réalisées par l'étage d'actionnement, autant que de degrés de redondance. Benoit propose une application de ce principe à la compensation des zones mortes des moteurs [49*].

- La télé-opération bas-niveau indirecte (ou co-contrôle) à travers laquelle l'opérateur contrôle le robot via des fonctions embarquées telles que, par exemple, le suivi d'un cap. Dans ce cas l'opérateur ne fait que donner les consignes et le contrôleur embarqué en assure le suivi. A ce niveau de télé-opération il est également possible pour l'opérateur de confier au contrôleur embarqué la régulation d'autres DDL, cette fois-ci exprimés dans le repère absolu, comme l'asservissement en profondeur par exemple. Dans ce cas l'opérateur donne la consigne de profondeur et le contrôleur embarqué en assure le suivi tout au long de l'exploration. Il apparaît donc que différents degrés de liberté du robot peuvent être simultanément sous des contrôles différents. Dans un souci de cohérence et de sécurité, nous introduirons donc le concept de ressource DDL ; il est en effet nécessaire de réifier ce concept pour assurer qu'à tout instant un DDL n'est soumis qu'à un seul et unique contrôle. Ici, le robot embarque 6 boucles d'asservissement, qui peuvent être engagées ou pas, suivant les choix de l'opérateur. Un suivi de fond, ou toute autre tâche se référant à l'environnement, induit un couplage entre les DDL, rendant les ressources DDL d'autant plus nécessaires.
- La télé-opération haut-niveau à travers laquelle l'opérateur pilote le robot à un niveau d'abstraction plus élevé. Dans ce mode les fonctions de contrôle sont plus avancées, comme par exemple le suivi d'un chemin référencé à l'environnement. Ces fonctions avancées relèvent du contrôleur haut-niveau. D'autant plus que ces fonctions avancées requièrent généralement l'utilisation de capteurs évolués et lourds en traitement. Le haut niveau comporte donc des capacités de calcul et de stockage spécifiques. Par ailleurs, il est nécessaire de permettre au contrôleur haut-

niveau de prendre le contrôle sur les DDL, et ce à travers le contrôleur bas-niveau, en relation effective avec les moteurs. De fait, nous définirons, au niveau du contrôleur bas-niveau, un mode transparent permettant cet accès direct.

- Le mode autonome dans le cadre duquel l'opérateur définit une mission que le robot doit accomplir de façon autonome. Cela suppose de définir un langage de spécification de mission, notamment en termes d'objectifs et de séquence d'objectifs à accomplir. D'une part, les objectifs désirés, i.e. ceux demandés par l'opérateur, sont de deux types : les objectifs que l'on peut qualifier de classiques et spécifiés dans l'univers du robot, comme par exemple atteindre un point dans l'espace (sous-marin), et les objectifs métier qui doivent pouvoir être spécifiés dans l'univers opérateur, i.e. en référence à des phénomènes perçus ou observés dans l'environnement (au sens par exemple de remonter un gradient de température selon un modèle). D'autre part, les objectifs qui proviennent de l'obligation pour le robot de répondre à une contrainte propre non spécifiée dans la mission comme par exemple, remonter en surface pour faire un recalage GPS de sa position (i.e. corriger sa position estimée, estimation qui dérive dans le temps). Ce mode autonome se rencontre aussi dans la situation de missions pour lesquelles la qualité du lien entre l'opérateur et le système est contextuellement variable (acoustique, rupture – volontaire ou pas – de l'ombilical).

Benoit propose d'assimiler les modes de fonctionnement que nous venons de décrire à des *services*. Ces services correspondent à l'activation de fonctions sur des ressources identifiées : ces fonctions correspondent à des relations entrées/sorties régissant le fonctionnement des ressources DDL qu'elles impliquent. Par analogie à l'univers des réseaux, chaque niveau offre des services au niveau supérieur. Ainsi l'opérateur peut solliciter des services offerts par le contrôleur bas-niveau, ou des services offerts par le contrôleur haut-niveau, qui lui même fait potentiellement appel à des services du contrôleur bas-niveau. Selon cette conception, il devient possible de faire correspondre les évolutions du contrôle, et ses interactions, aux évolutions du robot.

Architecture orientée services

L'architecture est développée sur le modèle d'une architecture orientée service (SOA). SOA est une architecture logicielle organisée qui s'appuie sur un ensemble de services simples, et qui est fortement guidée par les aspects métier². La SOA fait partie des architectures dites 'logiques'. Néanmoins, l'architecture logique n'est pas une cartographie fonctionnelle du système, ni un modèle abstrait de l'architecture. Il s'agit d'une description des éléments constituant le système et leurs relations. Cette architecture apporte de la structuration facilitant son évolution.

2. http://en.wikipedia.org/wiki/Service_oriented_architecture

L'évolutivité est apportée par la vision organisationnelle de cette architecture, qui permet de décomposer le système complet en sous-ensembles d'éléments simples. Ces éléments simples permettent de construire et d'organiser le système en confrontant celui-ci aux réalités métiers. Ainsi, dans notre contexte, Benoit définit un service comme une composition de modules (ConTract) auquel il attribue un domaine d'activation, des configurations, des ressources et un vecteur d'état, objets que Benoit explicite dans les publications qu'il a initiées. Nous sommes actuellement en train de fusionner les approches de Benoit et d'Adrien. Ainsi la décomposition modulaire des algorithmes s'attachera à préserver 'l'origine des connaissances' et à respecter les contraintes 'atomiques', incluant la préservation de la stabilité par composition d'atomes. Cette approche tend opportunément vers les principes de qualité de service de nos collègues du génie du logiciel. Mais le pas reste encore à faire...

4.2.3 Contrôle de mission et Commutations de modes

Silvain Louis est en première année de thèse. Il est co-encadré par K. Godary, moi-même ainsi que D. Mouillot (PR UM) et S. Villeguer (CR CNRS)³, sous la direction de R. Zapata. Son sujet traite de la question de la commutation entre les différents modes, tels que définis par Benoit précédemment. L'objectif de Silvain est de définir, dans une démarche trans-disciplinaire, les différents modes métiers dont nos partenaires biologistes marins pourraient profiter pour robotiser leurs missions d'acquisition de données. Ce projet est explicité dans la prochaine partie de ce document. Ainsi, il explicite trois modes de fonctionnement requis pour trois types d'observation.

- Le transect : le protocole admis par la communauté des biologistes marins pour les missions de comptage de poissons est rigoureusement établi. L'analyse qu'en a fait Silvain conduit à une solution de co-contrôle conduisant le système le long d'un transect donné, mais laissant disponibles à l'opérateur les DDL (tâche cette fois-ci) que sont les trois orientations et la vitesse d'avance. Une nécessaire approche par les quaternions nous a conduit à reprendre la conception de nos lois de commande à l'aune de ce nouveau système de représentation.
- L'observation localisée : Il s'agit maintenant d'asservir le système pour observer un point localisé, éventuellement défini dans l'image de la caméra. Le robot doit maintenant évoluer sur une géodésique, à distance constante du point d'intérêt. Si ce point est défini dans l'image d'une caméra, il faut de plus garantir une orientation de l'engin compatible avec les limites du capteur. Une observation ponctuelle laisse 4 DDL disponibles pour l'opérateur : distance, élévation, azimuth et roulis image. A nouveau les quaternions permettent de clairement poser le problème.

3. David et Sébastien sont membres du laboratoire EcoSym de l'UM2, intégré à l'UMR Marbec depuis janvier 2015

- Le suivi d'espèces emblématiques : il nous faut maintenant pouvoir suivre une trajectoire définie par une cible en mouvement. L'approche par quaternion permet, encore, l'expression d'un guidage clair. Ce mode est une généralisation des deux précédents.

Les lois de commande dynamiques proposées par Silvain Louis tournent actuellement sur notre simulateur HIL (Hardware In the Loop). Les expérimentations suivent. Silvain s'intéresse aussi à la problématique de la commutation de mode. En effet, engager le système dans un mode nouveau implique d'avoir vérifié de nombreuses conditions relatives à la disponibilité des capteurs, des actionneurs, de l'architecture logicielle et à la stabilité. Ce dernier point est peut être le plus délicat, mais il est essentiel, en ce sens qu'il représente un trait d'union entre automatique et génie du logiciel. Nous l'approchons, de par les compétences de K. Godary, sous l'angle des réseaux de Petri temporisés, construits pour qu'une garantie formelle d'exécution puisse être établie, sinon approchée.

Le projet REEA

Le projet REEA (Robotique d'exploration de l'Environnement Aquatique) est le fruit d'une réflexion entamée il y a quatre ans avec David Andreu. Il a pour objectif de créer un contexte favorable à nos travaux de recherche communs, dans un environnement professionnel dont l'évolution impose de considérer simultanément les aspects scientifiques, technologiques, sociétaux et financiers. Nous avons abordé ces questions dans l'introduction.

5.1 Génèse

Après mes pérégrinations post-doctorales, je me retrouve au LIRMM à poursuivre mes travaux en robotique sous-marine avec comme expérimentateurs les AUV développés au laboratoire : les torpilles Taipan 1, 2 et 300. La robotique sous-marine est un domaine qui a rapidement évolué ces dernières années. Si on pouvait bricoler sur un coin de table dans les années 90, la maîtrise des technologies modernes et de la logistique associée aux expérimentations nécessite maintenant une puissante capacité de développement technologique et logistique qu'un laboratoire public seul a du mal à mettre en oeuvre. Ainsi, les projets en robotique sous-marine ne s'entendent qu'en association avec des partenaires (industriel, associatifs...) qui participent aux développements et qui amènent un appui logistique. Le choix de ces partenaires est crucial pour assurer la pérennité du projet et que les bonnes volontés de tous soient mobilisées pour faire avancer le projet dans la direction voulue.

REEA est né lors de la restructuration de l'équipe-projet EXPLORE qui consacre ses travaux à la Robotique d'Exploration de l'Environnement, REEA en est son volet subaqua-

tique. Il est une tentative de mise en musique des principes évoquées en introduction de ce document :

- Ouvrir de nouveaux axes de recherche : nous sommes convaincus que la démarche trans-disciplinaire que nous portons avec nos partenaires permet de mettre à jour de nouvelles problématiques scientifiques pertinentes. La richesse est aux interfaces.
- Impacter les territoires : le choix des partenaires est fondamental. Les problématiques qu'ils portent permettent d'axer nos programmes applicatifs vers leurs objectifs, ouvrant ainsi le projet aux enjeux sociétaux qu'ils abordent.
- Réunir les bonnes volontés : cela peut paraître évident, mais il est parfois difficile de cerner les attentes des partenaires académiques, industriels, ou même financiers, qu'ils soient 'utilisateurs' ou 'donneurs d'ordres'.

5.1.1 Partenaire industriel : CISCREA

CISCREA¹ développe et met sur le marché des robots sous-marins de taille réduite, de type ROV, munis d'un câble de téléopération mais autonomes en énergie. Il fournit sa technologie et le support technique nécessaire aux développements induits par les besoins démonstratifs de nos travaux de recherche et reçoit l'expertise du laboratoire pour compléter sa gamme de produits, lui ouvrant des marchés de niches technologiques où la concurrence est nécessairement réduite. Benoit Ropars porte cette collaboration et assure le transfert du savoir et savoir-faire du laboratoire vers l'entreprise.

5.1.2 Partenaires académiques : HSM et Marbec

Hydro Sciences Montpellier² (HSM) est une UMR (5569) Université de Montpellier - CNRS. Elle s'articule autour de quatre axes dont celui consacré au Karst, Milieux Hétérogènes et Evénements Extrêmes (KMH2E). Son porteur est Hervé Jourde (PR UM). Parmi les travaux que Hervé réalise, il s'intéresse à la modélisation et la surveillance en ligne du bassin d'alimentation de Montpellier (entre Hérault et Vidourle). Principalement karstique, ce réseau de drainage complexe alimente les agglomérations du secteur. Il peut être le siège de violents transferts de charges, provoquant de soudaines montées des eaux et pouvant induire de rapides et massives contaminations du réseau d'adduction. Le LIRMM et HSM, au travers du programme applicatif KARST (de REEA), développent des systèmes robotisés dont l'objectif est l'étude et la modélisation de la dynamique de ces réseaux, objet de la thèse d'Adrien Lasbouygues, financée et labélisée par le LABEX NUMEV. Intrinsèquement transdisciplinaires, ces travaux font émerger des problématiques (robotiques) dont la résolution implique l'assimilation et la synthèse des connaissances, modèles, outils et objectifs des hydrogéologues. La voie transdisciplinaire, pour peu qu'elle soit effective,

1. CISCREA : <http://ciscrea.net>

2. HSM : <http://www.hydrosciences.org>

situe les questions scientifiques des deux parties avec des perspectives nouvelles, et permet la conception de solutions innovantes, certes spécialisées aux attentes du partenaire, mais pour lesquelles aucune formulation générique n'est encore possible. C'est par la multiplication des partenaires et des disciplines associées que la robotique parviendra à architecturer ses systèmes pour répondre aux attentes des acteurs du marché et des enjeux sociétaux actuels.

Marbec³ est une UMR Université de Montpellier - Ifremer - CNRS (9190) - IRD (248). Nouvellement créée en Janvier 2015, elle rassemble des activités de recherche sur le thème de la Biodiversité Marine, Exploitation et Conservation. Le laboratoire EcoSym⁴ en fait maintenant partie et porte la thématique de l'étude des effets des changements locaux et globaux liés à l'anthropisation sur les écosystèmes lagunaires et marins côtiers. David Mouillot (PR UM), Sébastien Villeguer (CR) et Thomas Claverie (MdC UM), membres d'EcoSym, consacrent leurs recherches à l'étude des facteurs gouvernant l'évolution de la diversité des systèmes marins côtiers. Thomas est en poste au CUFR⁵ de Mayotte et bénéficie d'un terrain expérimental exceptionnel. Nous avons identifié des protocoles expérimentaux compatibles avec une acquisition de données par un robot sous-marin. Silvain Louis fait sa thèse dans le cadre de cette collaboration, Ainsi, nous avons défini trois modes opérationnels pour le robot, correspondant à trois types d'observations : transect, observation localisée, suivi d'espèce.

5.1.3 Client : CENOTE

Le réseau de partenaires privés de HSM permet de cibler plus précisément la question du transfert de technologie et de connaissance. CENOTE⁶ est une entreprise d'ingénierie souterraine. Ses compétences viennent, en partie, de ses capacités d'intervention dans des réseaux karstiques, pour les instrumenter, les modéliser, les analyser. Les services qu'ils proposent ont une portée limitée par les capacités d'intervention humaine et la précision des outils mis en œuvre. Deux contraintes qui sont au centre des problématiques de la robotique, et pour laquelle les réseaux karstiques sont un terrain applicatif particulièrement riche et difficile.

3. Marbec : <http://www.umar-marbec.fr/>

4. EcoSym : <http://www.ecosym.univ-montp2.fr>

5. CUFR : www.univ-mayotte.fr/

6. CENOTE : www.cenote.fr/

5.1.4 Donneur d'ordre : Montpellier Métropole

L'agglomération de Montpellier⁷, dans sa charge de la gestion du réseau d'adduction d'eau, entretient et développe la station de pompage 'Avias' puisant dans les Sources du Lez. La demande en consommation d'eau augmentant, une quatrième pompe sera installée fin 2015. L'acquisition de données terrain pour aider à la prise de décision, pour engager des travaux de développement en maîtrisant l'impact écologique sur des zones sensibles, est essentielle pour les collectivités territoriales, entre autres.

L'association de ces cinq partenaires (incluant le LIRMM) permet de mettre en évidence des intérêts communs à différents niveaux du consortium. La figure 5.1 résume ces interactions et schématise le cercle vertueux qui permettra la création de nouveaux services pour CENOTE et de nouveaux produits pour CISCREA, grâce au transfert de technologies et de connaissances depuis le LIRMM et HSM. La pertinence scientifique du projet et son adéquation avec les problématiques socio-économiques locales sont portées à l'échelle du consortium, tant par les académiques, que les industriels ou les institutionnels.

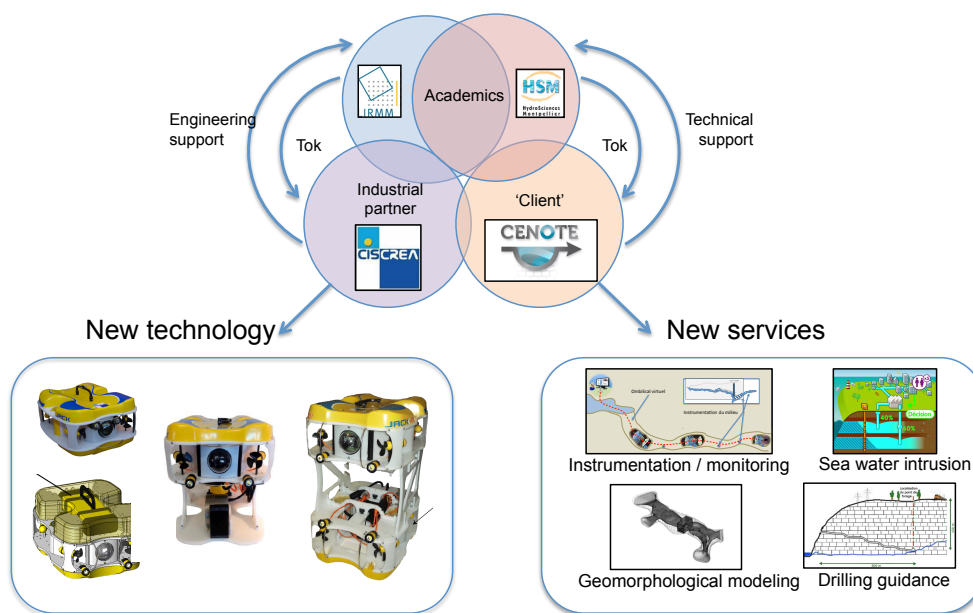


FIGURE 5.1 : Le cercle vertueux de l'innovation

7. <http://www.montpellieragglo.com>

5.2 Le projet Karst

5.2.1 Principes

Dans le cadre du projet KARST, le robot agit en tant que vecteur d'exploration, porteur de capteurs environnementaux permettant une analyse de l'eau, une caractérisation de la roche environnante et un relevé topographique du conduit karstique visité. De plus, il offre une information enrichie par sa capacité à se localiser par ses propres capteurs de navigation. Il est aussi un outil autonome ou pilotable à distance. La question de la téléopération de l'engin est fortement liée aux capacités du lien de communication entre le système immergé et la station de contrôle, en surface.

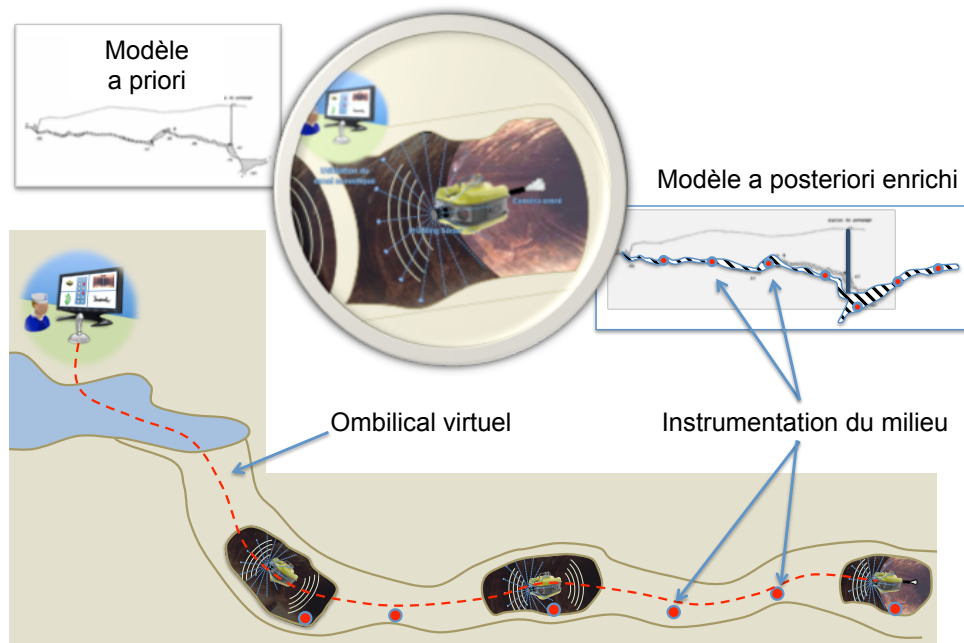


FIGURE 5.2 : La robotique d'exploration karstique

De ce point de vue, 2 phases principales de la mission sont distinguées :

- La phase aller, durant laquelle le système progresse dans le réseau karstique en déroulant le câble ombilical qui le relie à la station de pilotage, fournissant ainsi à l'opérateur un ensemble riche d'informations (vidéo, mesures environnementales). Cependant, la téléopération complète de l'engin dans ces conditions d'environnement confiné est délicate. En effet, le pilotage des 6 DDL de l'engin requiert de l'opérateur une dextérité et des capacités de représentation qui réclament une expertise pointue. Les projets portés par REEA proposent d'ouvrir le système à des non-spécialistes. Ainsi, le robot devra assurer de manière autonome certaines tâches relevant de l'ex-

pertise mentionnée précédemment de façon à permettre à l'opérateur de focaliser sur les éléments de la mission qui sont pertinents pour lui. On parle alors de co-contrôle qui permet d'architecturer le système de façon à garantir que le système 'se gère' et reste ouvert aux ordres de haut niveau de l'opérateur.

- La phase retour est plus délicate. En effet les (rares) tentatives d'envoyer un robot téléopéré dans un réseau karstique se sont souvent soldées par un échec, menant à la perte du robot (ou à l'envoi d'un plongeur pour dégager le système, ce qui est aussi une situation d'échec). La cause principale en est la présence du cordon ombilical qui, dans un tel milieu confiné et non structuré, vient se prendre dans le relief de l'environnement et bloquer la progression du robot. Les rapports de missions issus des tentatives d'exploration de la Fontaine de Vaucluse soulignent clairement ces problèmes⁸. L'objectif est donc, pour la phase retour ou en situation critique, de sectionner le câble ombilical et que le robot rentre de manière autonome. Pour ce faire, il exploite les données acquises à l'aller, et peut ainsi naviguer et se localiser dans le modèle du conduit qu'il a acquis à l'aller.

Du point de vue architectural, cette question est complexe et aucune solution générique n'existe à l'heure actuelle. L'une des spécificités du projet KARST est d'axer les recherches sur cette problématique en spécialisant le système sur la connaissance, les outils, les modèles et les objectifs de l'utilisateur. La considération des connaissances *a priori* que peut avoir l'utilisateur (levés topographiques existants, par exemple), spécialiste du milieu dans lequel le système évolue, est fondamentale. Autre aspect, les objectifs de l'utilisateur et la stratégie à suivre pour les atteindre doivent pouvoir être embarqués sur le système. De plus, dans le cas des hydrogéologues, une vision commune du problème peut se décliner en termes de modèles terrains, à établir et/ou valider. Modèles qui vont être au centre des objectifs de la mission du robot et, lorsqu'ils existent au préalable, qui lui sont d'une utilité majeure pour des questions de navigation (positionnement) et planification de la mission. La considération de ces aspects métiers, portés par l'utilisateur, est une étape clef qui guide la structuration du système. Plus le système s'ouvrira au paradigme de l'utilisateur (hydrogéologue dans le contexte de KARST), mieux le système répondra à ses attentes.

5.2.2 Avancement du projet

Les premiers résultats scientifiques produits par l'équipe sont très positifs et confirment la pertinence du projet. Il sont aussi le fruit de l'implication sans limite des différents stagiaires ingénieurs et master qui nous ont rejoint. Silvain Louis (stage ingénieur 2014) a conçu l'architecture électronique de la carte bas-niveau, il a maintenant intégré l'équipe en tant que doctorant et 'porte' la collaboration avec nos partenaires biologistes marins de MARBEC (ex EcoSym). Cette même année, Nicolas Prost (stage ingénieur 2014)

8. <http://www.ssfv.fr/spelenaute>

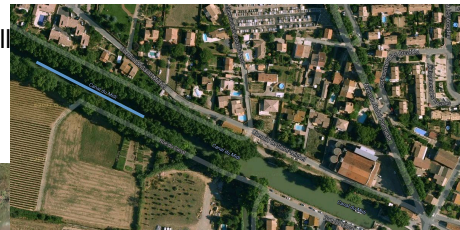
a caractérisé l'étage d'actionnement du Jack et défriché la question du répartiteur. Anthony Poncet (stage ingénieur 2014) a posé les bases d'un simulateur compatible avec une architecture temps réel. Maxime Rendu (stage ingénieur 2015) travaille actuellement avec nous et participe au développement de l'architecture de contrôle, sur les préceptes établis par Benoit Ropars. Ce dernier compose une architecture de contrôle orientée service sur la base de la solution atomique d'Adrien Lasbouygues, (centrage autonome dans le conduit et co-contrôle). Ainsi, nous disposons actuellement d'un système en mesure de naviguer dans un conduit karstique, de procéder à la reconstruction en ligne du modèle 3D du conduit et d'acquérir des mesures physico-chimiques sur son trajet. La validation expérimentale se fait bien sûr en plusieurs étapes.

Expérimentation dans le Canal du Midi : Villeneuve-lès-béziers, janvier 2015

Cette première mission de terrain a permis de valider l'ensemble de l'architecture électronique, le mode téléopération directe ainsi que le répartiteur. Elle a été aussi l'occasion de prendre en main le capteur profilométrique et de valider la reconstruction en ligne des modèles de terrain.

Objectifs :

- Validation architecture matérielle / logiciel
- Mise en œuvre Sonar profilométrique
- Traitement des données
- Evaluation coût logistique



(3 doctorants + 1 ingénieur)

FIGURE 5.3 : La mission de janvier 2015, Villeneuve-lès-béziers

Les données recueillies sont exposées à la figure 5.4. La figure 5.4-a représente le modèle acquis en ligne d'une partie du canal. La figure 5.4-b illustre une problématique courante pour l'entretien du canal. En effet, depuis l'apparition de l'hélice les berges s'érodent prématurément (le halage n'avait pas ce défaut), nécessitant un entretien régulier et fort

couteux. Nous montrons ici l'exemple d'application d'un système permettant de repérer les zones détériorées sans nécessiter la mise en oeuvre des moyens lourds des Voies Navigables de France (VNF⁹), en charge de la gestion du canal.

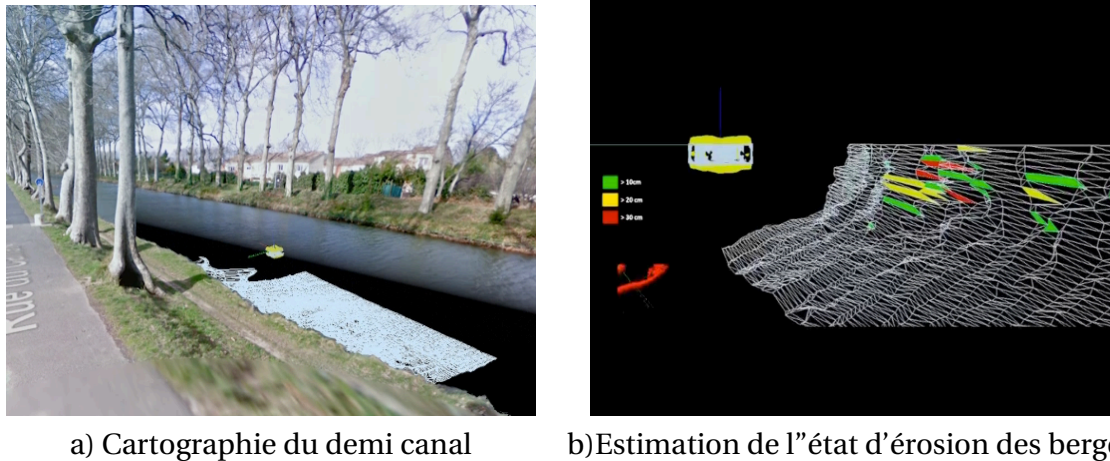


FIGURE 5.4 : La mission de janvier 2015, Villeneuve-lès-béziers

Il est à noter que la construction de ces modèles se fait en ligne, permettant ainsi à l'homme du métier d'intégrer la boucle de commande. Cette modeste expérimentation a permis de valider l'ensemble de notre architecture, ainsi que nos propres capacités logistiques.

Cartographie du gouffre de Gourneyras : prévu en septembre 2015

Le Gouffre de Gourneyras, internationalement connu des spéléo-plongeurs, présente une grande cavité à l'entrée d'un réseau, visité sur 2210m¹⁰, en 2004. Cette salle est connue et on dispose d'une cartographie préalable qui nous fournit une référence de validation. De plus, la morphologie particulière du site permet de mettre en oeuvre la situation du 'grand vide karstique', imposant au capteur profilométrique une portée conséquente, ce qui impacte nécessairement la boucle de contrôle. Ainsi, Adrien validera ses algorithmes atomiques de centrage, dans un contexte de variabilité de la fréquence d'échantillonnage de l'environnement¹¹, et impliquant de fait la mise en oeuvre d'atomes adaptatifs. De plus, cette mission sera appuyée par une équipe de spéléo-plongeurs de l'association Plongée-Sout¹², collaborateur régulier de HSM et de CENOTE. La logistique s'alourdit, la garder

9. www.vnf.fr

10. <http://www.plongeesout.com/sites/roussillon/pyrenees/herault/Gourneyras.htm>

11. Le capteur profilométrique que nous employons a une fréquence d'acquisition variable en fonction de la portée (paramétrable) du signal. Cette particularité se retrouve pour la plupart des capteurs acoustiques mis en oeuvre sur des engins sous-marins

12. <http://www.plongeesout.com>

maîtrisée est vital. Cette mission est une étape vers des expérimentations plus ambitieuses telles que l'exploration des Sources du Lez.

Cartographie des Sources du Lez : prévu en octobre 2015

Le réseau du Lez a ceci de particulier qu'il est en lien avec des réseaux profonds, potentiellement importants. L'ère géologique du pliocène a débuté avec un événement géologique majeur qui a vu l'ouverture du détroit de Gibraltar¹³. Durant la période précédente (messinienne) la mer Méditerranée a subi des assèchements successifs qui ont conduit à une baisse de son niveau entre 1500 et 2000 mètres¹⁴. Ce fut une période de 'karstification' profonde pour tout le pourtour méditerranéen, dont les villes côtières partagent actuellement la même problématique.

Concernant le Lez, les dernières visites humaines en amont de la station de pompage laissent entrevoir un débouché vertical sur une salle prometteuse.

L'objectif de cette première exploration est de réaliser la cartographie de la partie du réseau qui mène à cette chambre, sans y pénétrer. Ceci fera l'objet d'une prochaine mission, dont les objectifs dépendront de la réussite de celle-ci. Là encore les enjeux logistiques et sociétaux sont importants. Nous remercions Arnaud Vestier, en charge du service des eaux pour l'Agglo, de nous accorder sa confiance et de nous ouvrir les accès.

L'année 2016 devrait nous voir couper le câble de notre robot, perspective toujours enthousiasmante. Du chemin reste encore à faire. Laissons à la recherche le temps qu'elle nécessite.

5.3 Le projet MDA : *Marine Diversity Assessment*

Je partage la direction de ce projet avec Karen Godary. Il se concrétise par la thèse de Silvain Louis, sous la direction de René Zapata, et que nous co-encadrons en association avec David Mouillot et Sébastien Villeguer du laboratoire MARBEC (ex EcoSym) et du Centre Universitaire de Mayotte, co-financeur de l'allocation. David et Sébastien s'intéressent, entre autre, à l'impact de la présence humaine sur les populations d'espèces marines emblématiques. Leurs travaux ont une forte composante expérimentale, nécessitant des missions sous-marines d'observation pour acquérir les données terrain. Ces missions sont, pour l'instant, effectuées par des plongeurs, réduisant leur durée aux limites physiologiques et impliquant une logistique lourde et coûteuse. L'emploi d'un robot sous-marin semble ici tout indiqué.

13. http://fr.wikipedia.org/wiki/Transgression_pliocène

14. http://fr.wikipedia.org/wiki/Crise_de_salinité_messinienne

5.3.1 Principes

Il s'agit de reproduire les informations visuelles qu'un plongeur a lors de l'exécution d'un protocole expérimental défini, de les fournir à l'expert et de lui permettre d'agir sur le système dans le cadre du même protocole. Nous en avons identifié trois, en tant que 'modes', comme décrit précédemment. Le cas du transect est relatif aux missions de comptage de poissons, durant lesquelles le plongeur compte et identifie les espèces qu'il rencontre, de part et d'autre d'une ligne, définie comme une origine et un cap, la crête d'un récif ou un tombant. Un système robotisé pourrait proposer d'alimenter une paire de lunettes 3D (dotée d'une centrale inertielle) avec un signal stéréoscopique issu du système, dont l'attitude est asservie à la direction du regard, et la direction asservie au suivi du transect, défini en cap ou relatif à l'environnement. L'expression du problème en considérant le système de représentation par quaternions résulte en un fort intéressant problème de guidage que Silvain résoud pour les trois modes. Par delà l'aspect robotique de sa thèse, Silvain a su s'ouvrir aux problématique de nos partenaires. Ensemble ils ont initié une réflexion sur des protocoles expérimentaux qui traitent de la question de l'impact de la présence du robot sur les poissons. L'éternel dilemme de l'observation...

5.3.2 Avancement du projet

La réalisation des cartes électroniques de l'étage d'actionnement additionnel est en phase de finalisation. Les algorithmes sont prêts (validés HIL). Une démonstration expérimentale devant les partenaires, sur un site en cours d'identification, est à programmer dans les mois qui viennent. La prochaine étape sera de - trouver les fonds pour - cloner notre système et le mettre à disposition des partenaires, qui lui promettent une utilisation intensive, dans le lagon de Mayotte. Le début d'une longue et fructueuse aventure...

5.4 Le projet Archéo

En association avec Jean Triboulet, nous menons ce projet, fruit de la rencontre entre Jean et Christophe Delaere. Ce dernier conduit des campagne de fouilles archéologiques sous-marine dans le lac Titicaca, sur les vestiges pré-colombiens¹⁵. L'altitude du lieu (4000m) rendent les plongées harassantes et peu profondes. Benoit Ropars et Jean Triboumet ont, lors de deux missions de trois semaines, rejoint les équipes de Christophe Delaere. Ils ont pu ainsi procéder à la reconnaissance de plusieurs sites et seconder les plongeurs dans leurs travaux. Jean et Benoit ont pu ainsi valider les premiers asservissements du robot (cap, immersion) et mettre en oeuvre un système visuel de reconstruction 3D, en cours de perfectionnement. Nous espérons acquérir rapidement un sonar pénétrateur de sédiment qui permettrait de dresser une carte de densité précieuse pour repérer

15. <http://casa-titicaca.com>

les structures enfouies.

Conclusion et Perspectives

La robotique mobile est une discipline qui mûrit chaque jour, portée par des demandes applicatives sans cesse plus nombreuses et audacieuses, et conduisant le robot à opérer dans des environnements dynamiques, fragiles, vivants, et souvent d'accessibilité humaine difficile voire impossible.

Pour cela, le roboticien doit répondre à la question des garanties que son système offre. Cette vaste question, circonscrite au périmètre de compétences du roboticien, peut se formuler en termes de *performances* que le système, dans son *environnement* d'évolution, doit à tout instant *garantir*. Cette recherche de garantie de performances implique de reconsidérer l'intégralité de la conception du système, depuis l'établissement *des modèles* jusqu'à leur *exécution*, du concept à sa mise en œuvre, du spéculatif à l'opératif.

L'approche que nous proposons repose sur une décomposition du système en fonction des différentes expertises qu'il faut mobiliser pour sa conception. Depuis l'automatique, le génie logiciel, l'électronique, la mécanique, jusqu'à l'expertise de l'utilisateur final, chacun a son rôle à jouer et sa propre vision de la question de la garantie. Notre démarche consiste à suivre le devenir de la solution (formellement garantie) de l'automaticien au travers du processus d'implémentation et d'exécution, conduit par les *architectures de commande, logicielle et matérielle*.

L'architecture de commande structurée suivant la formulation (S-NGC-A) que je propose (espace Sensoriel - Navigation Guidage Contrôle - étage d'Actionnement) se prête volontiers à cette démarche. Elle permet l'expression de la garantie de performances (en termes de stabilité, de taux de convergence, de robustesse et d'erreur asymptotique) sur tout le cycle de régulation, depuis l'échantillonnage qui est fait de l'environnement jusqu'à

l'action produite.

De plus cette structuration met en avant le principe de Guidage, élément pivot de l'articulation entre les intentions de l'utilisateur (ou du gestionnaire de mission pour le cas autonome) et les obligations terrain et/ou système. L'application de ce principe mériterait d'être généralisée à d'autres domaines que la robotique mobile.

La réification de l'espace d'Actionnement apporte une structuration qui permet d'exploiter ses propriétés avantageuses (ex : redondance) dans la conception la commande NGC, celle-ci répondant formellement aux contraintes de l'actionnement (ex : saturation, zone morte, incertitudes paramétriques). La manipulation de cet espace d'Actionnement ouvre des pistes intéressantes pour ce qui est des systèmes à actionnement reconfigurable. De plus, le cadre formel de la méthode permet d'envisager des solutions adaptatives, pour des systèmes à actionnement incertain...

L'espace Sensoriel définit la 'vision' du monde qu'a le robot. Réduit à l'espace de ses données capteurs courantes, il est l'espace sensoriel courant, dans lequel la réactivité prime et où l'on élabore des modèles locaux de l'environnement. D'autres niveaux mériteraient d'être investigués, le 'Territoire' qui, par l'historisation des données courantes et l'exploitation de modèles récurrents, permet au système de se situer dans la 'Carte', niveau de généralisation plus élevé. Il est à noter que ces deux niveaux d'abstraction supérieurs ne sont plus soumis aux contraintes d'exécution, comme l'est l'espace sensoriel courant qui doit fournir ses solutions à la cadence que lui impose la commande NGC. L'espace Sensoriel porte dans sa structure des temporalités différentes, mais doit rester en accord avec des contraintes temporelles dures, ce qui en fait un curieux objet d'étude pour l'automaticien.

Enfin, il faut souligner un point dur relatif à une architecture de commande compatible avec la garantie de performance : la considération des effets de la commutation sur la stabilité du système, et sur les performances associées. Les outils théoriques permettant d'appréhender la question manquent encore. Ils devront mêler les mondes événementiel, périodique et continu, et satisfaire les attentes de l'automaticien dans sa recherche de preuve formelle de stabilité.

Mais la quête de garantie de performances ne s'arrête pas là. Il faut pouvoir préserver cette garantie sur la cible technologique, i.e. le robot, ce qui impose de considérer la mise en œuvre de la solution de l'automaticien.

La traduction algorithmique des équations de l'automaticien en une suite de processus, destinés à être exécutés sur un calculateur numérique, soulève la question de la discrétisation du processus de régulation. Ici les outils de l'automatique non-linéaire discrète manquent encore, mais ils indiquent que la discrétisation a pour effet d'augmenter la question de la robustesse de celle de la variabilité temporelle de l'échantillonnage de la commande. L'effort de recherche qui doit être fait pour résoudre ce problème requiert la vision commune de l'automatique et du génie logiciel. La communauté de l'*autonomic*

computing rassemble des acteurs à la double culture. L'assimilation de leurs résultats et posture scientifique par la robotique sera déterminante.

Il faut cependant encore trouver une méthode formelle pour explicitement considérer les contraintes du système physique (le robot et son interaction avec l'environnement) dans l'expression des performances de son intelligence embarquée. La question est délicate, elle mêle à nouveau des univers d'abstractions et de caractéristiques temporelles différentes, mais elle est fondamentale. La résolution du problème inverse est tout aussi intéressante, elle permettrait de formellement exprimer un critère relatif au dimensionnement du système, en fonction de performances que l'on désire garantir.

L'architecture logicielle, dans l'optique de la garantie de performance, orchestre l'exécution de l'ensemble des algorithmes dont elle dispose, suivant une partition cohérente, qui garantit le respect de contraintes temporelles, en accord avec les périodes d'échantillonnages que l'automatique discrète aura (idéalement) préalablement spécifiées. Les approches intégrant les notions de 'qualité de service' (QoS), de 'qualité de contrôle' (QoC) sont autant de démarches se préoccupant, plus ou moins explicitement, de la garantie de performances, en termes d'exécution cette fois. Ainsi, on peut imaginer une voie possible pour étendre le champ d'application de la garantie de performances à l'échelle de l'exécution d'un 'service robotique' (comme nous l'avons illustré avec le principe de l'ombilical virtuel). De la composition de ces services 'garantis' dépendra la complexité et la réussite de la mission. Mais pour cela, il faut porter les exigences de l'automaticien au cœur de ces architectures. L'aventure sera palpitante.

Pour être complet, il faut souligner l'implication que la recherche de garantie de performances a sur les architectures matérielles (électronique et mécanique), bien qu'on sorte ici du cadre de mes travaux. Il faut pouvoir assurer que le pilotage des organes physiques du système réponde aux performances requises, spécifiées durant la conception des niveaux logiciel, algorithmique et automatique.

Cette recherche de garantie de performances, du modèle à son exécution *in situ*, impose donc au roboticien de travailler aux interfaces des disciplines. Depuis l'automatique, le génie logiciel, l'électronique et la mécanique, mais aussi celle de l'utilisateur (scientifique ou industriel) qui est le mieux à même de définir les services et certaines des performances attendues du robot. L'utilisateur porte des objectifs, des modèles, des protocoles expérimentaux, etc. qui, au même titre que les disciplines précédemment citées, représentent un ensemble de connaissances que le robot, dans la mesure du possible, doit clairement exprimer et exploiter au mieux; ces connaissances doivent être structurées et réifiées sur les modèles de commande et d'exécution.

De même, la présence de l'utilisateur dans la boucle de commande (téléopération, co-contrôle, téléprogrammation, supervision) et permettant de disposer en ligne de son expertise, doit s'accompagner d'une considération explicite des capacités du lien com-

munication dans les modèles de commande et d'exécution, conférant au système une intéressante forme d'autonomie adaptative.

De nombreux verrous scientifiques restent encore à ouvrir. Ils concernent l'ensemble des disciplines en relation avec la robotique, et nécessitent une démarche transdisciplinaire riche et passionnante.

Isaac Asimov parlait des trois 'lois' de la robotique. Si imaginer de telles lois est possible, les respecter est tout autre les respecter suppose les garantir, notamment en termes de performances.

7.1 Encadrements

7.1.1 Encadrements de thèse

2009-2011	Xianbo Xiang , sous la direction de B. Jouvencel (50%)	
	Titre : Coordinated motion control of underactuated autonomous underwater vehicles	
	Soutenue le 22 Février 2011, à Montpellier	
	Devant le Jury composé de :	Massimo Caccia, rapporteur Luc Jaulin, Rapporteur René Zapata, Président Bruno Jouvencel, Directeur Lionel Lapierre, Encadrant
	Type de financement : bourse Marie Curie européenne (projet Free-SubNet)	
	Publications communes : 4 revues [3*, 5*, 14* et 15*] et 5 conférences. [17*, 18*, 21*, 23* et 25*]	

Cette thèse traite de la question du contrôle du mouvement d'engins non-holonomes et sous-actionnés évoluant de manière coordonnée et autonome. Les différentes approches considérées sont le suivi de trajectoire (Trajectory Tracking - TT) et le suivi de chemin (path following - PF). Une nouvelle méthode de contrôle est proposée. Dénommée Path-Tracking (PT), elle permet de cumuler les avantages de chacune des deux précédentes méthodes, permettant de cumuler la souplesse de la convergence induite par le suivi de chemin avec le respect des contraintes temporelles du suivi de trajectoire.

L'étude et la réalisation de la commande démarre avec l'étude du cas du robot nonholonome de type 'Unicycle' et se base sur les principes de 'Lyapunov' et de 'Backstepping'. Ces premiers résultats sont ensuite étendus au cas d'un véhicule sous-marin sous-actionné de type AUV ('Autonomous Underwater Vehicle'), en analysant les similarités cinématiques entre ces deux types de véhicules. De plus, il est montré la nécessité de prendre en compte les propriétés dynamiques du système de type AUV, et la condition de 'Stern dominancy' est établie de façon à garantir que le problème est bien posé et ainsi que la commande soit aisément calculable. Dans la cas d'un système marin sur-actionné, qui peut ainsi effectuer des tâches de navigation au long cours et de positionnement désiré ('Station keeping'), une commande hybride est proposée. Enfin, la question du contrôle coordonné d'une formation d'engins marin est abordée. Les solutions de commande pour les tâches de suivi de chemin coordonné ('coordinated path following') et de 'coordinated path tracking' sont proposées. Les principes du 'leader-follower' et la méthode des structures virtuelles sont ainsi traitées dans un cadre de contrôle centralisé, et le cas décentralisé est traité en utilisant certains principes de théorie des graphes.

Xianbo est maintenant *associate professor* à l'Université *Huazong* à Wuhan, en chine.

2012-2015	Adrien Lasbouygues , en co-encadrement avec D. Andreu (50%)
	Titre : Exploration de l'environnement aquatique : les modèles au cœur du contrôle
	Prévu pour soutenir fin 2015
	Type de financement : 50% école doctorale, 50% Labex Numev
	Publications communes : 2 conférences [48* et 49*], une en attente d'acceptation [51*]

Les travaux d'Adrien se situent dans le cadre du projet pluridisciplinaire Robotique d'Exploration de l'Environnement Aquatique (REEA), soutenu par le Labex NUMEV, ayant pour but de mettre les modèles de l'environnement au cœur du vecteur d'exploration que constitue le robot sous-marin. Co-encadré par des roboticiens et des hydrogéologues,

Adrien s'attache à comprendre les modèles de l'environnement aquifère utilisés et proposer une approche de commande, de guidage et de navigation centrée sur ces modèles, en se préoccupant des garanties de performance et de l'origine des connaissances nécessaires à la conception de la commande. En s'appuyant sur les capteurs embarqués pour la caractérisation géométrique de l'aquifère, et la fusion de leurs données, il développe et implémente sur le robot du LIRMM, les solutions algorithmiques nécessaires à l'exploration et la modélisation spatiale du réseau de drainage de l'aquifère karstique. Adrien, actuellement en troisième année propose une structuration de l'architecture de contrôle basée sur la notion d'atomes modulaires et composables.

2012-2015	Benoit Ropars , en co-encadrement avec D. Andreu (50%)
	Titre : Un vecteur robotique polyvalent pour l'exploration sous-marine faible fond
	Prévu pour soutenir fin 2015
	Type de financement : CIFRE à l'entreprise CISCREA
	Publications communes : 2 conférence [48* et 49*], une revue en préparation.

Benoit est un ingénieur formé par alternance par l'entreprise CISCREA. Il fait partie des concepteurs du robot Jack, produit phare de CISCREA. Il s'interroge sur la question de la polyvalence. Il décline le concept à tous les étages du système, et en particulier son architecture de contrôle : polyvalence imposée par les différentes charges utilisées (capteurs) et le traitement de leurs données, l'évolution de l'actionnement et la gestion de sa redondance, les différentes missions et objectifs... autant de questions fondamentales pour la robotique que Benoit décline sur la cible technologique Jack du partenaire industriel CISCREA.

2013-2016	Lotfi Jaïem , en co-encadrement avec D. Crestani (50%)
	Titre : Tolérance aux fautes à garantie de performances en robotique mobile
	Prévu pour soutenir fin 2016
	Type de financement : école doctorale
	Publications communes : [54*], ICRA 2015 en préparation.

Lotfi se penche précisément sur la question de la garantie de performance, appliquée à un robot mobile terrestre. Il met en évidence les différents axes pertinents de la performance, en fonction de la mission attribuée au robot, ainsi que les relations qui existent entre ces axes. Ainsi, il fait émerger, dans l'architecture de contrôle, des critères relatifs aux performances attendues vs. garanties. Il peut ainsi élaborer un critère objectif, évalué en ligne, sur la faisabilité de la mission.

2014-2017	Silvain Louis , sous la direction de R. Zapata (-) et en co-encadrement avec K. Godary (50%)
	Titre : Système robotisé autonome pour l'observation des espèces marines.
	Prévu pour soutenir fin 2017
	Type de financement : 50 %école doctorale, 50 %CUFR
	Publications communes : [55*]

Le sujet de Silvain s'inscrit dans la collaboration qui s'instaure entre le LIRMM, le

laboratoire de biologie marine EcoSym (UM2) et le CUFR de Mayotte. Il a pour objectif de se saisir des objectifs (comptage de poissons, cartographie de récif, *habitat mapping*) des partenaires et élaborer des stratégies de commande qui les remplissent. Il s'intéresse plus particulièrement au système de contrôle de mission qui doit, de manière opportuniste, répondre aux évolutions contextuelles de la mission. Les phases de transitions entre différents sous-objectifs, et la garantie de stabilité qui doit perdurer durant les commutations, sont un point délicat qui est au coeur des travaux de Silvain.

2013-2016	Rihab Hamdi , sous la direction de R. Zapata, et en co-encadrement avec F. Comby (50%)
	Titre : Stéréoscopie Omnidirectionnelle Appliquée à l'Exploration Karstique, avec traitement embarqué sur FPGA.
	Prévu pour soutenir fin 2016
	Type de financement : bourse tunisienne
	Publications communes : à venir

Rihab travaille sur le développement d'un capteur de reconstruction 3D de l'environnement karstique, basé vision. Elle met en oeuvre un système de deux caméras omnidirectionnelles et de références lasers qui permettent une reconstruction non ambiguë de l'environnement que le robot visite. De plus, elle se penche sur la question de l'implémentation sur cible FPGA de l'algorithme d'acquisition et de traitement. L'objectif est de réaliser un tel capteur qui puisse fournir des informations de haut niveau relatif à la cartographie de l'aquifère, en déchargeant le calculateur du robot de la charge relative au traitement des images.

7.1.2 Encadrements d'élèves ingénieurs et master 2

2004 - 6 mois	Pédro Paim , en co-encadrement avec B. Jouvencel
	Titre : contrôle réactif d'un AUV pour l'inspection de pipe.
	Stage de fin d'étude, ingénieur mécatronique de l'université de Brasília, Brésil
	Actuellement ingénieur aéronautique chez Helibras, Brésil

Pédro a consacré ses travaux à élaborer le contrôle réactif de l'AUV Taipan, inspectant une conduite au moyen d'un sonar bathymétrique. Il reprend le principe de la ZVD, en retirant une zone d'attractivité correspondant au profil de la conduite à inspecter, et située dans la zone d'observation optimale du capteur bathymétrique. Il propose ensuite d'étendre cette 'coupe' désirée au volume (cylindre) extrait de l'historique des mesures capteurs, sur un certain horizon spatial. Ceci permet d'asservir le système suivant une liaison cylindrique, plutôt que rotoïde. Ses travaux ont donné lieu à la publication [42*].

A l'issue de son stage, Pédro a intégré Airbus, puis Eurocopter et enfin Hélibras, filiale brésilienne d'Eurocopter.

2010 - 6 mois	Pédro Jimenez , en co-encadrement avec S. Druon
	Titre : suivi de chemin coopératif, sous contraintes de communications.
	Stage de fin d'étude, ingénieur Télécom de l'université <i>Politecnico de Torino</i> , Italie
	Actuellement ingénieur système chez ISDEFE, Madrid, Espagne

Pédro a travaillé sur le contrôle d'une flotte d'unicyles, devant dynamiquement adapter leur formation, de façon à garantir une 'qualité' de communication minimale entre chaque membre, en d'autre terme, les prémices du principe de l'ombilical virtuel, évoqué plus haut, cf. fig. 3.7. Il propose une solution qui permet d'adapter les vitesses de chacun des véhicules, en fonction d'un modèle de communication simple. De plus, il optimise la topologie des communications grâce à un algorithme de *Minimum Spanning Tree* qu'il inclut à la solution globale. Après son stage, Pédro a poursuivi sa carrière d'ingénieur télécom dans Hi-Iberia, Iberdrola et a intégré en 2011 Isdefe, entreprise de défense espagnole. Il y travaille depuis.

2010 - 13 mois	Joshué Lopez Hermoso
	Titre : évitement d'obstacle et suivi de mur d'un robot sous-marin.
	Ingénieur de recherche contractuel FreeSubNet
	Actuellement professeur associé à l'Université <i>Politécnica de Catalunya</i> , Espagne

Joshué a intégré le réseau de FreeSubNet et a rejoint notre équipe à Montpellier. Nous lui avons confié un sujet traitant de l'évitement d'obstacle et du suivi de mur pour un engin sous-marin muni d'un sonar frontal. Les compétences initiales de Joshué avaient trait à la mécanique et la mécatronique. Nous avons ensemble reformulé le cadre de la ZVD, en lui incluant explicitement des caractéristiques mécaniques de déformation (visco- et rhéo- élasticité), de façon à réguler la dynamique engendrée par l'évitement d'obstacle et le suivi de mur. Ainsi, nous avons pu établir une série de paramètres pour la ZVD qui garantissent certaines propriétés à la dynamique de l'erreur, comme la stabilité, l'absence de dépassement et d'erreur statique. La pertinence des résultats qu'il obtenu lui a permis d'intégrer l'équipe de l'université de Southampton qui a participé en 2010 au concours international de robot sous-marin SAUC-E, et pour lequel il a implanté avec succès son algorithme de suivi de mur. Depuis, Joshué a intégré l'agence de services Idnéo, et a obtenu un poste de professeur associé à l'université *Politécnica de Catalunya*, Espagne.

2005 - 6 mois	Olivier Parodi , en collaboration avec B. Jouvencel
	Titre : génération de trajectoires optimisées pour un système anguilliforme.
	DEA Syam
	Actuellement responsable de projet en R&D, spécialiste du guidage, DCNS Toulon

Olivier a consacré ses travaux de DEA au projet Robéa 'robot anguille'. Il a travaillé sur l'optimisation du profil propulsif d'un robot anguilliforme. Ses travaux ont donné lieu à la publication [41*]. Il a ensuite fait sa thèse au LIRMM sous la direction de B. Jouvencel, durant laquelle il s'est intéressé au développement d'un simulateur HIL réaliste (incluant un modèle de propagation des communications sous-marines) de l'AUV Taipan 300. D. Andreu et moi-même avons participé à ses travaux doctoraux. Ils ont donné lieu aux publications [20*, 21*, 24* et 50*]. Olivier a ensuite intégré la DCNS à Toulon, pour laquelle il est responsable R&D pour la partie 'guidage sous-marin'.

2014 - 6 mois	Sylvain Louis , en collaboration avec D. Andreu
	Titre : Conception et prototypage de l'architecture électronique embarquée du véhicule sous-marin Jack.
	Stage de fin d'étude, ingénieur Polytech Montpellier
	Actuellement en thèse au LIRMM

Sylvain a effectué son stage de fin d'étude sur le robot sous-marin Jack, en partenariat avec la société CISCREA. Il s'agissait de concevoir et réaliser une nouvelle électronique 'bas-niveau' embarquée pour la commande du Jack suivant les principes de polyvalence que nous avons abordés plus haut. Ces travaux ont donné lieu à la réalisation de la nouvelle électronique que nous employons actuellement au laboratoire, et est en cours de transfert auprès de la société CISCREA. Sylvain est maintenant un première année de thèse, au LIRMM.

2015 - 6 mois	Maxime Rendu , en collaboration avec D. Andreu
	Titre : développement d'une architecture modulaire et polyvalente pour le robot Jack.
	Stage de fin d'étude, ingénieur Polytech Montpellier
	Stage en cours.

Maxime a rejoint l'équipe et vient apporter ses compétences sur le développement de l'architecture de contrôle des différentes versions du Jack, cf. 4.3. Il aide au développement des différents modules de l'architecture, d'après les préconisations de A. Lasbouygues et B. Ropars. Il a aussi pour mission de gérer le planning des expérimentations prévues d'ici la fin de l'année. Maxime est intéressé pour poursuivre ses travaux en thèse. Nous recherchons actuellement une solution de financement.

Les encadrements que je viens de présenter sont ceux qui ont permis des avancées notables dans le projet que je porte. Les autres encadrements auxquels j'ai participé sont listés à la suite.

- A. Lasbouygues et N. Gobillot, PIFE 2010 Polytech Montpellier : développement des architectures électronique et logicielle embarquées sur un robot mobile (réalisation d'une maquette pédagogique).
- S. Louis et R. Vanhove, PIFE 2011 Polytech Montpellier : suite et finalisation du précédent sujet.
- N. Prost et A. Poncet, PIFE 2013 Polytech Montpellier : caractérisation de l'étage d'actionnement et réalisation de l'architecture d'un simulateur HIL pour le robot Jack.
- P.L. Jelinek, M2 2007 : réalisation du système de navigation d'un AUV pour le concours SAUC-E.
- M. Abakouy, stage de fin d'étude 2010 Polytech Montpellier : étude et réalisation de la commande d'une bouée de surface autonome et holonome, basé sur un système de propulsion Voith-Schneider.
- C. Chauve, stage de fin d'étude 2011 Polytech Montpellier : les bateaux électriques : réalité et projet innovant. Avec la société e3h.
- M. Berkaine, M2 2011 : développement de méthodes de localisation pour un robot mobile.

7.2 Enseignement

Mon expérience de l'enseignement a débuté, en 1994, avec l'enseignement de la physique en secondaire, en tant que Maître auxiliaire au Lycée Dhuoda et au GRETA de Nîmes. Durant la thèse, j'ai donné 90 heures de TP d'électronique à l'IUT de Béziers. A l'issue de mon post doc, de retour à l'UM2, j'ai pu faire des vacances d'enseignement dont le détail est donné dans le tableau 7.2.

2003-2008	Automatique des Systèmes linéaires Multi-variables. Elèves ingénieurs 4 ^e année Polytech'Montpellier (MEA 4) – 40h TP.
	Identification et commande de systèmes linéaires. Master 1 ^{er} année, EEA, Université Montpellier II, 40h. TP.
	Automatique, systèmes linéaires asservis. Licence 3 ^e année, STPI-GEEA, Université Montpellier II, 45h. TD.
	CAO d'Automatique / Calcul numérique. Licence 3 ^e année, STPI-GEEA, Université Montpellier II, 13h. TP.
1998-1999	Electromagnétique, Mécanique des fluides, Thermique. DEUG STPI 1 ^{re} année - Université de St Denis (974) - 20 heures TD.
1997-1998	Electronique. IUT GTR, 1 ^{re} année - Béziers (34) - 90 heures TP.

TABLE 7.1 : bilan des enseignements de 1998 à 2008

7.2.1 Polytech Montpellier

J'ai intégré l'équipe pédagogique du département MEA de l'école d'ingénieur Universitaire Polytech Montpellier en 2008. Depuis j'enseigne l'automatique linéaire mono et multi-variables aux élèves ingénieurs de 3^{me} et 4^{me} années. J'encadre aussi annuellement des projets intégrés de fin d'études (PIFE) et des stages de fin d'études (SFE), de Polytech ou d'établissements étrangers. Le bilan de ces encadrements est détaillé au chapitre 7.

2008-2009

Nouvellement accueilli par l'équipe pédagogique du département MEA¹ de Polytech'Montpellier, je me suis vu confier un service principalement consacré aux travaux pratiques d'automatique et d'informatique pour les élèves ingénieurs de 3^{me} et 4^{me} année.

1. Electronique, Robotique et Informatique Industrielle

- Projet Informatique, MEA 3, 80h TP : il s'agit de traiter des outils de base que les élèves rencontreront par la suite dans les développements qu'ils auront à effectuer.
- Travaux Pratiques 'Signaux, Circuits, systèmes', MEA3, 52h TP : ces 13 séances de travaux pratiques sont conduites sur table et traitent de la régulation de systèmes électroniques, électromécaniques (banc moteur) et hydrauliques (cuves). Les approches de la régulation sont, à ce stade, essentiellement linéaires.
- Travaux Pratiques d'Automatique, MEA 4, 40h TP : ces travaux pratiques permettent de mettre en oeuvre les notions relatives à l'automatique linéaire multi-variables vues en cours : modèles canoniques, observateurs, commande par retour d'état, approches discrètes. Les étudiants disposent des maquettes pédagogiques 'classiques' : pendule inversé, bille sur rail, cuves couplées, suspension magnétiques...
- Mini-Projet P6, MEA 4, 42h TP : lors de ces séances, les étudiants doivent organiser leur temps pour mener à bien un cahier de charges défini sur un sujet, soit proposé par l'équipe enseignante, soit par l'élève. Le travail en groupe est ici encouragé. J'ai proposé un nouveau projet autour de la robotique mobile et du développement d'algorithmes de commande, sur un robot de type Wifi-Bot.

J'ai été, de 2008 à 2011, responsable pédagogique pour les étudiants chinois issus du programme dénommé $\pi+$ (Erasmus Mundus), permettant d'ouvrir le recrutement de l'école à des étudiants chinois sélectionnés par des instances partenaires en Chine.

2009-2010

Lors de ce nouvel exercice, j'ai pu concentrer mes enseignements sur l'automatique.

- Automatique des Systèmes Linéaires Monovariables, MEA 3, 18h TD : en collaboration avec Serge Dusaury (PRAG Polytech), nous avons réécrit les sujets de TD consacrés à l'automatique linéaire mono-variable, avec une vision croisée électronique / robotique.
- Automatique Numérique des Systèmes Linéaires, MEA 3, 12h TD : les cours magistraux étaient assurés par René Zapata. J'ai proposé et conduit une série de TD consacrés à l'approche numérique de la régulation des systèmes linéaires.
- Automatique des Systèmes Linéaires Multi-variables, MEA 4, 24h TD et 40 h TP : j'ai donné cette série de TD et TP avec R. Zapata, chargé des cours magistraux de cette matière.
- Travaux Pratiques 'Signaux, Circuits, systèmes', MEA3, 40h TP.
- Mini-Projet P6, MEA 4, 56h TP.
- PIFE, MEA 5, 14h eqTD : j'ai encadré le Projet Intégré de Fin d'Etude de Mr Abbakouy qui a consacré ses travaux au développement d'une loi de commande d'une bouée autonome développée par la société CISCREA.

2010-2011

Cette année a été consacrée à la réécriture des sujets de TD et TP pour assurer une progression plus cohérente des enseignements.

- Automatique des Systèmes Linéaires Monovariables, MEA 3, 18h TD.
- Automatique Numérique des Systèmes Linéaires, MEA 3, 12h TD.
- Automatique des Systèmes Linéaires Multi-variables, MEA 4, 36h TD et 40 h TP.
- Travaux Pratiques 'Signaux, Circuits, systèmes', MEA3, 52h TP.
- Mini-Projet P6, MEA 4, 56h TP.
- PIFE, MEA 5, 14h eqTD : j'ai encadré le Projet Intégré de Fin d'Etudes de Mr Abbakouy qui a consacré ses travaux au développement d'une loi de commande d'une bouée autonome développée par la société CISCREA.
- Encadrement de projet PEIP, MEA 2, 4h eqTD : PEIP : Parcours des écoles d'ingénieurs POLYTECH. Les deux années de PEIP sont une formation préparatoire en vue de l'intégration des candidats au réseau des écoles d'ingénieurs Polytech. En deuxième année les étudiants doivent effectuer un projet intégré à l'école. J'ai encadré deux étudiants (T. Crossman et S. Tarbouriech) qui ont effectué leur projet sur une étude du principe de propulsion Voith-Schneider de la bouée de CISCREA.

2011-2012

J'ai arrêté la responsabilité du programme $\pi+$, pour prendre celle de la 3^{me} année (MEA3) de la formation.

- Automatique des Systèmes Linéaires Monovariables, MEA 3, 21h TD.
- Automatique Numérique des Systèmes Linéaires, MEA 3, 12h TD.
- Automatique des Systèmes Linéaires Multi-variables, MEA 4, 31.5h TD et 45 h TP.
- Travaux Pratiques 'Signaux, Circuits, systèmes', MEA3, 36h TP.
- Mini-Projet P6, MEA 4, 56h TP.
- PIFE, MEA 5, 15h eqTD : j'ai encadré, en collaboration avec D. Andreu, les Projet Intégré de Fin d'Etudes de A. Lasbouygues et N. Gobillot, qui ont consacré leurs travaux à la conception d'une maquette pédagogique basée sur le modèle réduit d'un véhicule à 4 roues. Il s'agissait de mettre en évidence la diversité des thématiques pédagogiques qui peuvent être illustrées par un tel système embarqué : automatique, électronique (FPGA), réseau. Ces travaux ont permis d'inclure cette maquette pédagogique à la formation, nos collègues électroniciens et informaticiens s'y référant pour illustrer les concepts qu'ils transmettent.

2012-2013

Durant cette année, l'ensemble de l'équipe pédagogique de MEA a conduit une réflexion sur une réforme pédagogique permettant la création de deux options : 'Robotique' et 'Micro-électronique'. De plus une filière par alternance 'systèmes embarqués' a été introduite dans l'école. La refonte des enseignements et des volumes horaires associés a été un travail long qui a fini par aboutir à une nouvelle organisation de l'année MEA3.

- Systèmes Linéaires Mono-variable, MEA3, 7.5h CM et 15h TD : j'ai pris en charge une partie des cours magistraux de cette matière : définition de la stabilité, notion de pôle, transformation de Laplace...
- Mini-projets robotique, MEA3, 50h TP : les nouvelles recrues de MEA sont initiées à la robotique au travers de problèmes simples mais fondamentaux, en simulation.
- Automatique des Systèmes Linéaires Multi-variables, MEA 4, 21h TD et 30 h TP.
- Mini-Projet P6, MEA 4, 28h TP.
- Automatique des Systèmes Linéaires, SE3, 9h CM et 9h TD : nous partageons cet enseignement avec S. Dusausay. Il s'agit principalement de reprendre le programme donné en MEA3, en l'adaptant au public par alternance de la formation SE, qui peut présenter de grandes disparités.
- Systèmes à temps discret, SE4, 12h CM et 12h TD : nouvellement chargé de cours sur l'automatique discrète, j'ai organisé mes enseignements de façon à traiter de la question de manière très empirique, ce qui me semblait plus adapté au public des élèves ingénieurs par alternance. Nous avons ainsi proposé une séquence de 15 heures de travaux pratiques sur le thème.

2013-2014

La réforme pédagogique initiée l'année précédente concerne maintenant l'année supérieure (MEA4). J'interviens dans les enseignements d'option (robotique) comme décrit ci-dessous :

- Systèmes Linéaires Mono-variable, MEA3, 7.5h CM et 27h TD.
- Automatique des Systèmes Linéaires Multi-variables, MEA 4, 10.5h CM et 30 h TD.
- Automatique des Systèmes Linéaires, SE3, 9h CM et 9h TD.
- Systèmes à temps discret, SE4, 12h CM et 12h TD.
- Mini-projets robotique, MEA3, 32h TP.
- Projet Robotique S7, MEA4, 10.5h.
- Projet Robotique Mobile 1, MEA4, 24h TP : nous illustrons la problématique de la robotique mobile sous l'angle du système embarqué. Dans un premier temps, nous traitons de modélisation puis de commande. La Projet Robotique Mobile 2 permet

d'aborder la question de l'architecture de contrôle, au sein de laquelle les élèves implémentent les solutions qu'ils ont précédemment proposées.

- Modélisation et Commande, MEA4, 10.5 h CM : il s'agit des éléments de cours supportant le Projet Robotique Mobile 1.

7.2.2 Responsabilités

2014-2015	Responsable des stages MEA4
2011 - 2014	Responsable d'année MEA3
2008 - 2011	Responsable du programme Polytech Sino-Français Mundus (ex $\pi+$)

7.3 Bibliométrie

However, not everything that can be counted counts, and not everything that counts can be counted.

W. B. CAMERON

7.3.1 liste des publications en revues internationales avec comité de lecture

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Année	Journal	Editeur
	Vol : Iss, pp	D.O.I.	Facteur d'impact
[1*]	Guidance of Unmanned Surface Vehicles : Experiments in Vehicle Following		
	Bibuli, M. ; Caccia, M. ; Lapierre, L. ; Bruzzone, G.		
	2012	Robotics & Automation Magazine	IEEE
	19 : 3, 92-102	10.1109/MRA.2011.2181784	1.985
[2*]	Path-following algorithms and experiments for an Unmanned Surface Vehicle		
	Bibuli M., Bruzzone G., Caccia M., Lapierre L.		
	2009	Journal of Field Robotics	WILEY
	26 : 8, 669-688	10.1002/rob.20303	3.542
[3*]	Synchronized Path Following Control of Multiple Homogenous Underactuated AUVs		
	Xiang X., Liu C. , Lapierre L. , Jouvencel B.		
	2012	Journal of Systems Science and Complexity	SPRINGER
	25 : 1, 71-89	10.1007/s11424-012-0109-2	0.373
[4*]	A guaranteed obstacle avoidance guidance system The safe manoeuvring zone		
	Lapierre L., Zapata R.		
	2012	Autonomous Robots	SPRINGER
	32 : 3, 177-187	10.1007/s10514-011-9269-5	1.5
[5*]	Distributed control of coordinated path tracking for networked nonholonomic mobile vehicles		
	Zhang Q., Lapierre L., Xiang X.		
	2012	Transactions on Industrial Informatics	IEEE
	9 : 1, 472 - 484	10.1109/TII.2012.2219541	2.99

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Année	Journal	Editeur
	Vol : Iss, pp	D.O.I.	Facteur d'impact
[6*]	Robust diving control of an AUV		
	Lapierre L.		
	2008	Ocean Engineering	ELSEVIER
	36 : 1, 92-104	10.1016/j.oceaneng.2008.10.006	1.19
[7*]	Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV		
	Lapierre L., Jouvencel B.		
	2008	Journal of Oceanic Engineering	IEEE
	33 :2, 89-102	10.1109/JOE.2008.923554	0.95
[8*]	Combined Path-following and Obstacle Avoidance Control of a Wheeled Robot		
	Lapierre L., Jouvencel B.		
	2007	International Journal of Robotics Research	SAGE
	26 : 4, 361-375	10.1177/0278364907076790	2.503
[9*]	Position / Force Control of an Underwater Mobile Manipulator		
	Lapierre L., Fraisse P., Dauchez P.		
	2003	Journal of Robotic Systems	WILEY
	20 : 12, 707-722	10.1002/rob.10119	1.88
[10*]	Freesub : Navigation Guidance and Control of An IAUV		
	Labbé D., Wilson P., Weiss P., Lapierre L.		
	2003	International Journal of Maritime Engineering	RINA
	146 : 2, 71-9	10.3940/rina.ijme.2004.a2.3504	0.23
[11*]	Nonsingular path following control of a unicycle in the presence of parametric modeling uncertainties		
	Lapierre L., Soetanto D., Pascoal A.		
	2006	International Journal of Robust and Nonlinear Control	WILEY
	16 :10, 485-503	10.1002/rnc.1075	2.652
[12*]	Enhancing Fault Tolerance of Autonomous Mobile Robots Robotics and Autonomous Systems		
	Crestani D., Godary Dejean K., Lapierre L.		
	2014	Robotics and Autonomous Systems	ELSEVIER
	01/2015 ; 68	10.1016/j.robot.2014.12.015	1.11
[13*]	Nonlinear path-following control of an AUV		
	Lapierre L. and Soetanto D.		
	2007	Ocean Engineering	ELSEVIER
	34 :11-12, 1734-1744	10.1016/j.oceaneng.2006.10.019	1.615
[14*]	Smooth transition of AUV motion control : From fully-actuated to under-actuated configuration		
	Xiang, X., Lapierre L. and Jouvencel B.		
	2014	Robotics and Autonomous Systems	ELSEVIER
	67 : 12, 14-22	10.1016/j.robot.2014.09.024	1.105

7.3.2 liste des publications soumises en revues internationales avec comité de lecture et en attente d'acceptation

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Date	Journal	Editeur
[15*]	From stabilization to path following of a constant-speed unicycle-type nonholonomic system		
	Lapierre L., Xiang X.		
	Mai 2014	International Journal of Robust and Nonlinear Control	WILEY

7.3.3 Liste des publications en conférences internationales avec comité de lecture

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Date	Conférence	Lieu
[16*]	A Collision Avoidance Algorithm Based on the Virtual Target Approach for Cooperative Unmanned Surface Vehicles		
	Marco Bibuli, Gabriele Bruzzone, Massimo Caccia and Lionel Lapierre		
	2012	IEEE CDC	Maui, Hawaii
[17*]	Path tracking : Combined path following and trajectory tracking for autonomous underwater vehicles		
	Xianbo Xiang , Lapierre Lionel, Liu Chao, Jouvencel Bruno		
	2011	IEEE / RSJ IROS	San Francisco, CA, USA
[18*]	Guidance Based Collision Avoidance of Coordinated Nonholonomic Autonomous Vehicles		
	Xianbo Xiang , Lapierre Lionel, Jouvencel Bruno		
	2010	IEEE / RSJ IROS	Taipei, Taiwan
[19*]	Global methodology in control architecture to improve mobile robot reliability		
	B. Durand, K. Godary-Dejean, L. Lapierre, D. Crestani		
	2010	IEEE / RSJ IROS	Taipei, Taiwan

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Date	Conférence	Lieu
[20*]	Hardware-in-the-loop simulators for multiple vehicle scenario : survey on existing solutions and proposal of a new architecture		
	Parodi O., Lapierre L., Jouvencel B.		
	2009	IEEE / RSJ IROS	St. Louis, Missouri, USA
[21*]	Coordinated Path Following Control of Multiple Wheeled Mobile Robots Through Decentralized Speed Adaptation		
	Xianbo Xiang, Lionel Lapierre, Bruno Jouvencel, Olivier Parodi		
	2009	IEEE / RSJ IROS	St. Louis, Missouri, USA
[22*]	Guidance of a flotilla of wheeled robots : A practical solution		
	Lapierre L., Zapata, R., Bibuli M.		
	2010	IAV / IFAC	Lecce, Italy
[23*]	Guidance based collision free and obstacle avoidance of autonomous vehicles under formation constraints		
	Xiang X., Lapierre L., Jouvencel B.		
	2010	IAV / IFAC	Lecce, Italy
[24*]	Thetis : A Real-Time Multi-Vehicles Hybrid Simulator for Heterogeneous Vehicles		
	Parodi O., Lapierre L., Jouvencel B.		
	2008	IEEE / RSJ IROS	Nice, France
[25*]	Coordinated Path Following Control of Multiple Nonholonomic Vehicles		
	Xianbo Xiang, Lionel Lapierre, Bruno Jouvencel, Olivier Parodi		
	2009	IEEE OCEANS	Bremen, Germany
[26*]	Using Adaptive Control Architecture to enhance Autonomous Mobile Robot Reliability		
	B. Durand, K. Godary-Dejean, L. Lapierre, D. Crestani		
	2010	TAROS	Plymouth, UK
[27*]	Fault tolerance enhancement using autonomy adaptation for autonomous mobile robots		
	B. Durand, K. Godary-Dejean, L. Lapierre, R. Passama, D. Crestani		
	2010	SYSTOL	Nice, France
[30*]	Hybrid Position/Force Control of a ROV with a Manipulator		
	Lapierre L., Fraisse P., M'Sirdi N.K.		
	1998	OCEAN'S 98	Nice, France
[31*]	Position/Force Control of an Underwater Vehicle Equipped with a Robotic Manipulator		
	Fraisse, P., Lapierre, L., Dauchez, P., Pierrot, F.		
	2000	SYROCO'00	Vienna, Autriche

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Date	Conférence	Lieu
[32*]	Non-linear path-following control of an AUV		
	Lapierre L., Soetanto D., Pascoal A.		
	2003	GCUV'03	Newport, South Wales, UK
[33*]	Adaptive non-linear vision-based path following control of a non-holonomic robot		
	Lapierre L., Soetanto D., Pascoal A.		
	2003	ECC'03	Cambridge, UK
[34*]	Unicycle Vision-based Path-following Control		
	Lapierre L., Soetanto D., Pascoal A.		
	2003	MED'03	Rhodes, Rhodes Island, Greece
[35*]	Adaptive, non-singular path-following control of dynamic wheeled robot		
	Lapierre L., Soetanto D., Pascoal A.		
	2003	ICAR'03	Coimbra, Portugal
[36*]	Coordinated Motion Control of marine robots		
	Lapierre L., Soetanto D., Pascoal A.		
	2003	MCMC'03	Girona, Spain
[37*]	FreeSub : Navigation, Guidance and Control System for Intervention AUV		
	D. Labbé, P. Wilson, P. Weiss, L. Lapierre		
	2003	SCSS'03	Orlando, Florida, USA
[38*]	FREESUB : Modular control system for intervention AUVS (IAUV)		
	Weiss, P., Catret Mascarell, J.V., Badica, M, Labbe, D.F.L., Lapierre, L., Brignone, L. and Wilson, P. A		
	2003	UUST	Boston, USA
[39*]	Adaptive, non-singular path following control of a wheeled robot		
	D. Soetanto, L. Lapierre, A. Pascoal		
	2003	CDC'03	Maui, Hawaii
[40*]	Path Following Control of an Eel-like Robot		
	D. Soetanto, L. Lapierre, A. Pascoal		
	2005	Oceans Europe '05	Brest, France
[41*]	Optimised Gait for Anguilliform Locomotion		
	Olivier Parodi, Lionel Lapierre, Bruno Jouvencel		
	2006	OCEANS'06	Singapore
[42*]	A Reactive Control Approach for Pipeline Inspection with an AUV		
	P. Paim, B. Jouvencel and L. Lapierre		
	2005	OCEANS'05	Washington DC, USA
[43*]	Robust Diving Control of an AUV		
	L. Lapierre, V. Creuze and B. Jouvencel		
	2006	MCMC'06	Lisbon, Portugal

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Date	Conférence	Lieu
[44*]	Concurrent Path Following and Obstacle Avoidance Control of a Unicycle-type Robot		
	L. Lapierre, R. Zapata and B. Jouvencel		
	2007	AVCS'07	Buenos Aires, Argentina
[45*]	Simultaneous Path Following and Obstacle Avoidance Control of a Unicycle-type Robot		
	L. Lapierre, R. Zapata and B. Jouvencel		
	2007	ICRA'07	Roma, Italie
[46*]	Path-Following Control of a Wheeled Robot under actuation saturation constraints		
	L. Lapierre, R. Zapata and B. Jouvencel		
	2007	ICRA'07	Roma, Italie
[47*]	Path-Following Control of a Wheeled Robot under actuation saturation constraints		
	Lapierre L., Indiverri G.		
	2007	IAV'07	Toulouse, France
[48*]	Stable and reactive centering in conduits for karstic exploration		
	Lasbouygues A., Ropars B., Lapierre L., Andreu D. and Jourde H.		
	2014	ECC'14	Strasbourg, France
[49*]	Thruster's Dead-zones Compensation for the Actuation System of an Underwater Vehicle		
	Ropars B., Lasbouygues A., Lapierre L. and Andreu D.		
	2015	ECC'15	Linz, Austria
[50*]	Vehicle-Following Guidance for Unmanned Marine Vehicles		
	Bibuli, M., Parodi, O., Lapierre, L., Bruzzone, G., Caccia, M.		
	2009	MCMC'09	Guarujá, Brazil
[51*]	Atoms Based Control of Mobile Robots with Hardware-In-the-Loop validation		
	Lasbouygues, A., Ropars, B., Passama, R., Andreu, D., Lapierre, L.		
	2015	accepted to IROS'15	Hamburg, Germany

7.3.4 Conférences nationales, avec comité de lecture

Ref.	Titre		
	Auteurs		
	Date	Conférence	Lieu
[28*]	Reliability improvement in control architecture for mobile robots : implementation using COTAMA		
	B. Durand, K. Godary-Dejean, D. Andreu, L. Lapierre, D. Crestani		
	2010	CAR	Douai, France
[29*]	Inconsistencies Evaluation Mechanisms for an Hybrid Control Architecture with Adaptive Autonomy		
	Durand B., Godary K., Lapierre L., Crestani D.		
	2009	CAR	Toulouse, France
[54*]	Towards a Fault Tolerant Control Architecture with Performances Guarantee for Mobile Robots		
	Jaiem L., Lapierre L., Godary K., Crestani D.		
	2014	CAR	Paris, France
[55*]	HIL Simulator fir AUV with ContrACT		
	Louis S., Andreu D., Godary K., Lapierre L.		
	2015	CAR	Lyon, France

7.3.5 Chapitres d'ouvrages

Ref.	Titre du chapitre	
	Titre de l'ouvrage	
	Auteurs	
	Date	Editeur
	Pages	ISBN
[51*]	Underwater Robots Part I : current systems and problem pose	
	Mobile Robotics – Towards New Applications	
	Lapierre L.	
	2006	Pro Verlag & Advanced Robotic Systems International (ARS)
	pp : 309-334	ISBN : 978-3-86611-314-5
[52*]	Underwater Robots Part II : existing solutions and open issues	
	Mobile Robotics – Towards New Applications	
	Lapierre L.	
	2006	Pro Verlag & Advanced Robotic Systems International (ARS)
	pp : 335-372	ISBN : 978-3-86611-314-5
[53*]	Cooperative Acoustic Navigation Scheme for Heterogenous Autonomous Underwater Vehicles	
	Underwater Vehicles	
	Xianbo Xiang, Lionel Lapierre, Bruno Jouvencel, Guohua Xu and Xinhan Huang	
	2009	A. V. Inzartsev - In Tech
	pp : 525-539	ISBN 978-953-7619-49-7

7.4 Animation Scientifique

7.4.1 Participation à des jurys de thèse

Thomas Salgado , encadré par B. Jouvencel
Contribution à la commande d'un robot sous-marin autonome de type torpille
Soutenue le 22 Février 2004, au LIRMM à Montpellier.

Jean-Mathias Spiewak , encadré par B. Jouvencel
Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes
Soutenue le 22 Février 2007, au LIRMM à Montpellier.

Abdellah El Jalaoui , encadré par D. Andreu sous la direction de B. Jouvencel
Gestion Contextuelle de Tâches pour le contrôle d'un véhicule sous-marin autonome
Soutenue le 19 Décembre 2007, au LIRMM à Montpellier.

Olivier Parodi , encadré par B. Jouvencel
Simulation hybride pour la coordination de véhicules hétérogènes au sein d'une flottille
Soutenue le 28 septembre 2007, au LIRMM à Montpellier.

Assia Belachir , sous la direction de Simon Lacroix et de Félix Ingrand
A cooperative architecture for target localization using underwater vehicles
Soutenue le 10 février 2011, au LAAS à Toulouse.

Lei Zhang , encadré René Zapata
Self-Adaptive Markov Localization for Single-Robot and Multi-Robot Systems
Soutenue le 15 Janvier 2010, au LIRMM à Montpellier.

Xianbo Xiang , encadré L. Lapiere sous la direction de B. Jouvencel
Coordinated motion control of multiple underactuated autonomous underwater vehicles
Soutenue le 22 février 2011, au LIRMM à Montpellier.

7.4.2 Le LABEX NUMEV

J'ai intégré le comité du pilotage du LABEX NUMEV² (Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant) en janvier 2015. L'objectif du LABEX NUMEV est de développer les technologies de l'information et de la communication pour les domaines de l'environnement et du vivant, selon plusieurs axes : modélisation, algorithmes et calculs, données scientifiques (traitement, intégration, sécurisation) et systèmes, modèles et mesures. Deux projets intégrés (PI) le structure en :

- Aide à la personne malade ou déficiente : neuro-prothèses, robotique médicale, capteurs physiologiques "embarqués" et
- Observation de l'environnement et du vivant : conception de capteurs et leur mise en réseaux, développement de systèmes de spatialisation (drones, micro-satellites), traitement des données.

La direction du LABEX est assurée par P. Poignet (PR UM) et Franck Nicoud (PR UM). Avec Emmanuel Le Clézio (PR UM), nous assurons l'animation du deuxième PI. L'incitation induite par NUMEV crée une dynamique réelle (le projet KARST en est un exemple) mêlant des chercheurs d'horizons différents et ouvrant des problématiques scientifiques nouvelles. Intégrer le comité du pilotage de NUMEV sera, j'en suis convaincu, une aventure passionnante.

7.4.3 Le conseil scientifique du LIRMM

J'ai été élu membre du conseil scientifique du LIRMM en 2014. Nous traitons des diverses questions relatives à la politique scientifique du laboratoire.

2. <http://www.lirmm.fr/numev/index.php>



Bibliographie

- [1] Nehmzow, U, Scientific Methods in Mobile Robotics : Quantitative Analysis of Agent Behaviour, Springer-Verlag London Limited, London, 2006, DOI : 10.1007/1-84628-260-8. Cité page [11](#).
- [2] Brockett, R.W., Asymptotic Stability and Feedback Stabilization, *Differential Geometric Control Theory*, Brockett, R. W., Millman, R. S. and Sussman, H. J., Eds., Birkhäuser, Boston, U.S.A., 1983, 181-191. Cité page [21](#).
- [3] Krstić, M.I., Kanellakopoulos, and Kokotovic, P., Nonlinear and Adaptive Control Design, John Willey & Sons, New York, 1995 Cité page [38](#).
- [4] Hespanha, J.P., "Stabilization of Nonholonomic Integrators Via Logic Based Switching", Proceedings of the 13th World Congress of IFAC, Vol. E, San Francisco, CA, U.S.A., 1996, 467-472. Cité pages [23](#) and [39](#).
- [5] Canudas de Wit, C., Khennouf, H., Samson, C. and Sordalen, O., "Nonlinear Control Design for Mobile Robots", *Recent Trend in Mobile robots*, vol. 11, World scientific series in robotics and Automated Systems, Yuan F. Zheng, Ed., 1993. Cité pages [22](#) and [26](#).
- [6] Godhavn, J. M. and Egeland, O., "A Lyapunov Approach to Exponential Stabilization of Nonholonomic Systems in Power Form", *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol 42, nb.7, 1997, 1028-1032. Cité page [22](#).
- [7] Micaelli, A. and Samson, C., " Path Following and Time-Varying Feedback Stabilization of A Wheeled Robot," *Proceedings of International Conference ICARCV'92, RO-13.1*, Singapore, September 1992 Cité page [22](#).

- [8] Aguiar, A.P., Atassi, A., and Pascoal, A.M., "Regulation of a Nonholonomic Dynamic Wheeled Mobile Robot with Parametric Modeling Uncertainty Using Lyapunov Function," *Proceeding of CDC'2000, 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sidney, Australia, December 2000. Cité page [23](#).
- [9] Aguiar, A.P., and Pascoal, A.M., "Stabilization of the Extended Nonholonomic Double Integrator via Logic Based Hybrid Control : an Application to Point Stabilization of Mobile Robots", *SYROCO'00 - 6th International IFAC Symposium on Robot Control*, Vienna, Austria, 2000. Cité page [23](#).
- [10] Astolfi, A., "Exponential Stabilization of a Wheeled Mobile Robot Via Discontinuous Control", *Journal of Dynamics, Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, 1999, 121-126. Cité page [23](#).
- [11] Canudas de Wit, C., and Sordalen, O., "Exponential Stabilization of Mobile Robots with Nonholonomic Constraints", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 11, pp. 1791-1797, Nov. 1992 Cité page [23](#).
- [12] Hara, Naoyuki, Hideki Kokame, and Keiji Konishi. "Circular periodic motion generation for mobile robots using limit cycle systems." *American Control Conference (ACC)*, 2010. IEEE, 2010. Cité page [23](#).
- [13] Morin, Pascal, and Claude Samson. "Trajectory tracking for nonholonomic vehicles." *Robot Motion and Control*. Springer London, 2006. 3-23. Cité page [23](#).
- [14] Ceccarelli, Nicola, et al. "Collective circular motion of multi-vehicle systems." *Automatica* 44.12 (2008) : 3025-3035. Cité page [23](#).
- [15] Kim, Dong-Han, and Jong-Hwan Kim. "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer." *Robotics and Autonomous Systems* 42.1 (2003) : 17-30. Cité page [23](#).
- [16] EI-Hawwary and Maggiore, Studies on Passivity-Based Stabilization of Closed Sets, *International Journal of Control*, vol. 84, no. 2, pp. 336-350, 2011 Cité page [23](#).
- [17] Micaelli, A. and Samson, C., "Trajectory - Tracking for Unicycle - Type and Two - Steering - Wheels Mobile Robots," *Technical Report No. 2097*, INRIA, Sophia-Antipolis, Nov. 1993 Cité page [26](#).
- [18] Samson, C. and Ait-Abderrahim, K., "Mobile Robot Control Part 1 : Feedback Control of A Non-Holonomic Mobile Robots," *Technical Report No. 1281*, INRIA, Sophia-Antipolis, France, June 1991 Cité page [26](#).

- [19] Walsh, G., Tilbury, D., Sastry, S. and Laumond, J.P., "Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 1, pp. 216-222, 1994. Cité page [26](#).
- [20] Freund, E. and Mayr, R., "Nonlinear Path Control in Automated Vehicle Guidance", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol 13, No1, pp. 49-60, Feb 1997. Cité page [26](#).
- [21] Slotine J.J., Li W. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, New Jersey, 1995. Cité page [28](#).
- [22] Fierro, R., and Lewis, F., "Control of a nonholonomic mobile robot : Backstepping kinematics into Dynamics", *Proc. of the 33rd Conference on Decision and Control*, Florida, USA, 1994. Cité page [26](#).
- [23] Aicardi, M., Casalino, G., Bicchi, A., and Balestrino, A. Closed Loop Steering of Unicycle-Like Vehicles via Lyapunov Techniques. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 27-35, March 1995. Cité page [28](#).
- [24] Aicardi, M., Casalino, G., Indiveri, G., Aguiar, P., Encarnacao, P., and Pascoal, A., "A Planar Path Following Controller for Underactuated Marine Vehicles," *Proceedings of MED2001*, , Dubrovnik, Croatia, June 2001. Cité page [28](#).
- [25] del Rio, F. et al., "A New Method for Tracking Memorized Paths : Applications to Unicycle Robots," *Proceedings of MED2002* , Lisbon, Portugal, July 2002. Cité page [28](#).
- [26] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", *IJRR*, 5, 1, 90-98, Spring, 1986. Cité page [30](#).
- [27] Elnagar A, Hussein A, Motion Planning using Maxwell's equations, in the Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems , Lausanne, Switzerland (2002) Cité page [30](#).
- [28] Iniguez P, Rossel J, A Hierarchical and Dynamic Method to Compute Harmonic Functions for Constrained Motion Planning, in the Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems , Lausanne, Switzerland (2002) Cité page [30](#).
- [29] Ge S, Cui Y, Path planning for Mobile Robots Using New Potential Functions, in *Proc. of the 3rd Asian Control Conference*, July 4-7, Shanghai, China (2000) Cité page [30](#).
- [30] Louste C, Conception d'une methode de planification pour robot mobile selon la methode des milieux continus appliquee aux fluides visqueux, Ph. D. Thesis nb 6701, LIRMM, Montpellier, (1999, in french) Cité page [30](#).

- [31] Zapata R, Cacitti A, Lepinay P, DVZ-based Collision Avoidance Control of Non-holonomic Mobile Manipulators, JESA, European Journal of Automated Systems, Vol38, Num5, pp. 559-588 (2004) Cité page [30](#).
- [32] Sgorbissa A, Capezio F, Zacaria R, Rebora A, Campani M, A minimalist approach to Path-Following among unknown obstacles, in the Proc of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, (2010) Cité page [32](#).
- [33] Encarnação P, Pascoal A, Combined trajectory tracking and path following : an application to the coordinated control of marine craft, in the Proc. of the 40th IEEE CDC, Orlando, Florida, (2001) Cité page [33](#).
- [34] Hindman, R. and Hauser, J. (1996), Maneuver modified trajectory tracking, Proc. of MTNS96, International Symposium on the Mathematical Theory of Networks and Systems. St Louis, MO, USA Cité page [33](#).
- [35] Giuletti, F., Pollini, L., and Innocenti, M. (2000), "Autonomous formation flight," IEEE Control Systems Magazine, December 2000, pp. 34-44. Cité page [33](#).
- [36] Pratchter, M., D'Azzo, J.J., and Proud, A.W. (2001), Flight formation control, Journal of Guidance, Control and Dynamics. Vol. 24, N0. 2, March-April 2001, pp. 246-254. Cité page [33](#).
- [37] Queiroz, M.S., Kapila, V., and Yan, Q. (2000), "Adaptive nonlinear control of multiple spacecraft formation flying," Journal of Guidance, Control and Dynamics. Vol. 23, N0.3, May-June 2000, pp. 385-390. Cité page [33](#).
- [38] Mesbahi, M. and Hadaegh, F.Y. (2001), "Formation flying control of multiple spacecraft via graphs, matrix inequalities, and switching. Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 24, No. 2, March-April 2001, pp. 369-377. Cité page [33](#).
- [39] Desai, J.P., Otrowski, J., and Kumar, V. (1998), "Controlling formations of multiple robots," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2864-2869. Cité page [33](#).
- [40] Skjetne, R., Moi, S., and Fossen, T.I. (2002), "Nonlinear formation control of marine craft," Proc. IEEE International Conference on Decision and Control, 2002. Cité page [33](#).
- [41] Stilwell, D.J., and Bishop, B.E. (2000), "Platoons of underwater vehicles," IEEE Control Systems Magazine, December, 2000, pp. 45-52. Cité page [33](#).
- [42] Samson, C., Espiau B. and Le Borgne, M., Robot Control : The Task Function Approach, Oxford University Press, 1991, ISBN : 0198538057 Cité page [41](#).

- [43] Liegeois A., Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. smc-7. No. 12, December 1977, pp. 868-871. Cité page [41](#).
- [44] Escande, A., Mansard, N. and Wieber P.B., Hierarchical Quadratic Programming : Fast Online Humanoid-Robot Motion Generation, in the International Journal of Robotics Research, sage, 2014, 33 (7), pp. 1006-1028. Cité page [41](#).
- [45] Siciliano, B. and Slotine, J.J., A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly redundant Robotic Systems, in the Fifth International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 19-22 June 1991, Pisa, Italy, DOI : 10.1109/ICAR.1991.240390. Cité page [41](#).
- [46] Hollerbach, J.M. and Ki, S., Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, Iss. 4, pp. 308-316, August 1987, DOI : 10.1109/JRA.1987.1087111. Cité page [41](#).
- [47] Kaminer I., Pascoal A., Kang W., Yakimenko, O., Integrated Vision/Inertial Navigation Systems Design Using Nonlinear Filtering, January 2001 issue of IEEE Transactions on Aerospace and Electronics, vol. 37 No.1 pp. 158-172. Cité pages [44](#) and [56](#).
- [48] Oliveira, P. and Pascoal, A., On the design of multirate complementary filters for autonomous marine vehicle navigation. In GCUV2003-1st IFAC Workshop on Guidance and Control of Underwater Vehicles, December 2003, Lisbon, Portugal. Cité pages [43](#), [44](#), and [56](#).
- [49] Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O. and Walter E. (2001), Applied Interval Analysis with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics, Springer-Verlag, Londond, UK. DOI : 10.1007/978-1-4471-0249-6. Cité page [43](#).
- [50] A. ElJalaoui, Gestion Contextuelle de taches pour le Controle d'un vehicule sous-marin Autonome, These de doctorat de l'universite Montpellier 2, 2007. Cité pages [44](#) and [50](#).
- [51] Simon, D., Song, Y.Q., Aubrun, C., Co-design Approaches to Dependable Networked Control Systems, ISTE and WILEY Eds., ISBN : 978-1-84821-176-6, January 2010. Cité page [50](#).
- [52] Brooks, R.A., A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, 2 (1), pp 14-23, 1986. Non cité.
- [53] Arzelies P. (1994). Tolerances de navigation en bathymétrie imagerie. Journal De Physique IV, 4(C5), 1289-1292. <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:19945286> Cité page [50](#).

- [54] Passama, R., Andreu, D., CONTRACT : a software environment for developing control architecture. R. Passama, D. Andreu, CAR '11 : Control Architectures of Robots, 2011, Grenoble, France. Cité page [51](#).
- [55] Hanlon, P.D., and Maybeck, S., Multiple-Model Adaptive Estimation Using a Residual Correlation Kalman Filter Bank, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 36, No. 2, April 2000. Cité page [56](#).

Abstract

One abstract

Keywords: *one keyword, another one*

Résumé

Un

Mots clefs : *un mot clef, un autre*

Annexe

Une sélection de 5 publications



Nonsingular path following control of a unicycle in the presence of parametric modelling uncertainties

L. Lapierre^{1,*†}, D. Soetanto^{2,‡} and A. Pascoal^{2,§}

¹*Laboratory of Computer Science, Robotics, and Microelectronics (LIRMM), Underwater Robotics Division,
161 Rue Ada, 34392 Montpellier, Cedex 5, France*

²*Institute for Systems and Robotics and Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal*

SUMMARY

A new type of control law is derived to steer the dynamic model of a wheeled robot of unicycle type along a desired path. The methodology adopted for path following control deals explicitly with vehicle dynamics and plant parameter uncertainty. Furthermore, it overcomes stringent initial condition constraints that are present in a number of path following control strategies described in the literature. This is done by controlling explicitly the rate of progression of a ‘virtual target’ to be tracked along the path, thus bypassing the problems that arise when the position of the virtual target is simply defined by the projection of the actual vehicle on that path. In the paper, a nonlinear adaptive control law is derived that yields convergence of the (closed-loop system) path following error trajectories to zero. Controller design relies on Lyapunov theory and backstepping techniques. Simulation results illustrate the performance of the control system proposed. Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

KEY WORDS: path following; wheeled robots; adaptive control; backstepping

1. INTRODUCTION

The problem of motion control of autonomous vehicles (including air, land, and marine robots) has received considerable attention during the last few years. The problems addressed in the literature can be roughly classified in three groups:

1. *point stabilization*—the goal is to stabilize the vehicle at a given point, with a given orientation;

*Correspondence to: L. Lapierre, Laboratory of Computer Science, Robotics, and Microelectronics (LIRMM), Underwater Robotics Division, 161 Rue Ada, 34392 Montpellier, Cedex 5, France.

†E-mail: lapierre@lirmm.fr

‡E-mail: didik@isr.ist.utl.pt

§E-mail: antonio@isr.ist.utl.pt

Contract/grant sponsor: EC

Contract/grant sponsor: Portuguese Foundation for Science and Technology

2. *trajectory tracking*—the vehicle is required to track a time parameterized reference, and
3. *path following*—the vehicle is required to converge to and follow a path, without explicit temporal specifications.

Point stabilization presents a true challenge to control system designers when the vehicle has nonholonomic (or nonintegrable) constraints, since there is no smooth (or even continuous) state-feedback law that will yield stability, as pointed out by Brockett [1]. To overcome this difficulty three main approaches have been proposed: smooth time-varying control laws [2–4] and discontinuous as well as hybrid feedback laws [5–9].

The trajectory tracking problem for fully actuated systems is now well understood and satisfactory solutions can be found in advanced nonlinear control textbooks. However, in the case of underactuated vehicles, that is, when the vehicle has less actuators than state variables to be tracked, the problem is still a very interesting topic of research. Linearization and feedback linearization methods [10,11], as well as Lyapunov-based control laws [2,12] have been proposed.

Path following control has received relatively less attention than the other two problems. See the publications of Samson and Ait-Abderrahim [13] and Micaelli and Samson [14] for pioneering work in the area as well as Canudas de Wit *et al.* [2] and Jiang and Nijmeijer [15] and the references therein. Path following systems for marine vehicles have been reported by Encarnação *et al.* [16,17]. The underlying assumption in path following control is that the vehicle's forward speed tracks a desired speed profile, while the controller acts on the vehicle orientation to drive it to the path. Typically, smoother convergence to a path is achieved, in comparison with the performance obtained with trajectory tracking controllers, and the control signals are less likely pushed to saturation.

This paper addresses the problem of steering the dynamic model of a wheeled robot of unicycle type along a desired path. Its main contribution is twofold: (i) it extends the results obtained in Reference [14]—for kinematic models of wheeled robots—to a more general setting, in order to deal with vehicle dynamics and parameter uncertainty, and (ii) it overcomes stringent initial condition constraints that are present in a number of path following control strategies described in the literature. This is done by controlling explicitly the rate of progression of a 'virtual target' to be tracked along the path, thus bypassing the problems that arise when the position of the virtual target is simply defined by the projection of the actual vehicle on that path. This procedure avoids the *singularities* that occur when the distance to path is not well defined and allows for a proof of global convergence of the actual path of the vehicle to the desired path. This is in striking contrast with the results described in Reference [14] for example, where only local convergence has been proven. To the best of the authors' knowledge, the idea of exploring the extra degree of freedom that comes from controlling the motion of a virtual target along a path appeared for the first time in the work of Aicardi *et al.* [18] for the control of wheeled robots. The circle of ideas exploited in Reference [18] was extended to deal with marine craft control in Reference [19]. However, none of these references addresses the issues of vehicle dynamics and parameter uncertainty. Furthermore, the methodologies adopted in References [18,19] for control system design build on an entirely different technique that requires the introduction of a nonsingular transformation in the original error space. Interestingly enough, a recent publication, by del Rio *et al.* [20] explores the same concept of a virtual target for path following of wheeled robots.

In this paper, controller design builds on the work reported in Reference [14] on path following control and relies heavily on Lyapunov-based backstepping techniques established by Krstić *et al.* [21] in order to extend kinematic control laws to a dynamic setting. Parameter uncertainties are dealt with in an adaptive framework by augmenting Lyapunov candidate functions with terms that are quadratic in the parameter errors. See Reference [5], where identical techniques were used in the design of an adaptive control law to steer the dynamic model of a wheeled robot to a point, with a desired orientation, in the presence of parameter uncertainty.

The paper is organized as follows. Section 2 introduces the problem of path following control for a wheeled robot of unicycle type. Section 3 develops a nonlinear, adaptive, path following control law to deal with vehicle dynamics and parameter uncertainty. The performance of the control system proposed is illustrated in simulation in Section 4. Finally, Section 5 contains the conclusions and describes some problems that warrant further research.

2. PATH FOLLOWING CONTROL. PROBLEM FORMULATION

This section reviews the dynamic model of a wheeled robot and provides a rigorous formulation of the problem of steering it along a desired path. The reader is referred to References [5, 14] for background material.

The following assumptions are made regarding the robot, see Figure 1. The vehicle has two identical parallel, nondeformable rear wheels which are controlled by two independent motors, and a steering front wheel. It is assumed that the plane of each wheel is perpendicular to the

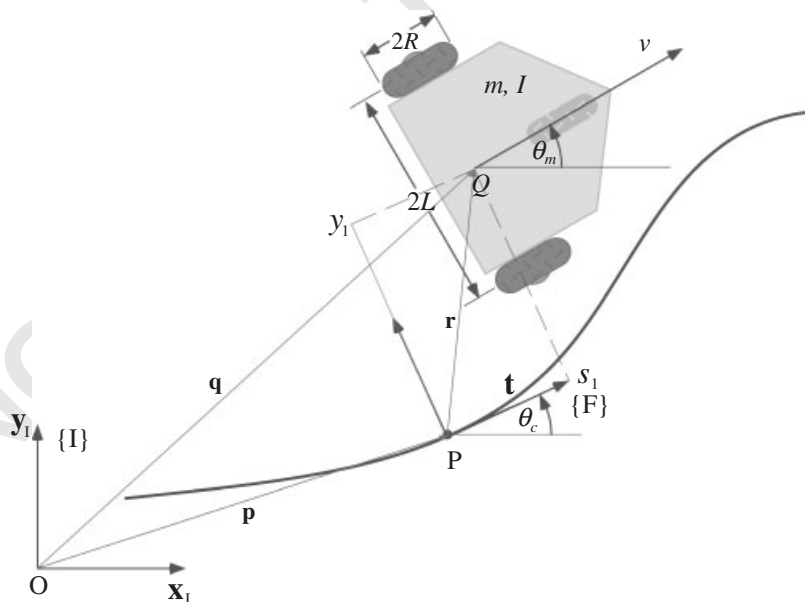


Figure 1. Unicycle's parameters and frame definitions.

ground and that the contact between the wheels and the ground is pure rolling and nonslipping, i.e. the velocity of the centre of mass of the robot is orthogonal to the rear wheels axis. It is further assumed that the masses and inertias of the wheels are negligible and that the centre of mass of the mobile robot is located in the middle of the axis connecting the rear wheels. Each rear wheel is powered by a motor which generates a control torque τ_i ; $i = 1, 2$.

2.1. Kinematic equations of motion. The Serret–Frenet frame

The solution to the problem of path following derived in Reference [14] admits an intuitive explanation: a path following controller should look at (i) the distance from the vehicle to the path and (ii) the angle between the vehicle velocity vector and the tangent to the path, and reduce both to zero. This motivates the development of the kinematic model of the vehicle in terms of a Serret–Frenet frame $\{F\}$ that moves along the path; $\{F\}$ plays the role of the body axis of a ‘virtual target vehicle’ that should be tracked by the ‘real vehicle’. Using this set-up, the abovementioned distance and angle become the coordinates of the error space where the control problem is formulated and solved. In this paper, motivated by the work in Reference [14], a Frenet frame $\{F\}$ that moves along the path to be followed is used with a significant difference: *the Frenet frame is not attached to the point on the path that is closest to the vehicle*. Instead, the origin of $\{F\}$ along the path is made to evolve according to a conveniently defined function of time, effectively yielding an extra controller design parameter. As it will be seen, this seemingly simple procedure allows to lift the stringent initial condition constraints that arise with the path following controlled described in References [14]. The notation that follows is by now standard. See for example References [13, 14].

Consider Figure 1, where P is an arbitrary point on the path to be followed and Q is the centre of mass of the moving vehicle. Associated with P , consider the corresponding Serret–Frenet frame $\{F\}$. The signed curvilinear abscissa of P along the path is denoted s . Clearly, Q can either be expressed as $\mathbf{q} = (X, Y, 0)$ in a selected inertial reference frame $\{I\}$ or as $(s_1, y_1, 0)$ in $\{F\}$. Stated equivalently, Q can be given in (X, Y) or (s_1, y_1) coordinates (see Figure 1). Let the position of point P in $\{I\}$ be vector $\mathbf{p}$. Let

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

be the rotation matrix from $\{I\}$ to $\{F\}$, parameterized locally by the angle θ_c . Define $\omega_c = \dot{\theta}_c$. Then,

$$\begin{aligned} \omega_c &= \dot{\theta}_c = c_c(s)\dot{s} \\ \dot{c}_c(s) &= g_c(s)\dot{s} \end{aligned} \tag{1}$$

where $c_c(s)$ and $g_c(s) = dc_c(s)/ds$ denote the path curvature and its derivative, respectively. The velocity of P in $\{I\}$ can be expressed in $\{F\}$ to yield

$$\left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F = \begin{bmatrix} \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

It is also straightforward to compute the velocity of Q in $\{I\}$ as

$$\left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_I = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_I + \mathbf{R}^{-1} \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)_F + \mathbf{R}^{-1}(\omega_c \times \mathbf{r})$$

where $\mathbf{r}$ is the vector from P to Q . Multiplying the above equation on the left by $\mathbf{R}$ gives the velocity of Q in $\{I\}$ expressed in $\{F\}$ as

$$\mathbf{R} \left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_I = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F + \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)_F + \omega_c \times \mathbf{r}$$

Using the relations

$$\left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_I = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)_F = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{y}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

and

$$\begin{aligned} \omega_c \times \mathbf{r} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} = c_c(s)\dot{s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ y_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -c_c(s)\dot{s}y_1 \\ c_c(s)\dot{s}s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Equation (2) can be rewritten as

$$\mathbf{R} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}(1 - c_c(s)y_1) + \dot{s}_1 \\ \dot{y}_1 + c_c(s)\dot{s}s_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Solving for $\dot{s}_1$ and $\dot{y}_1$ yields

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= [\cos \theta_c \quad \sin \theta_c] \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} - \dot{s}(1 - c_c y_1) \\ \dot{y}_1 &= [-\sin \theta_c \quad \cos \theta_c] \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} - c_c \dot{s} s_1 \end{aligned} \quad (2)$$

At this point it is important to notice that in Reference [14] $s_1 = 0$ for all t , since the location of point P is defined by the projection of Q on the path, assuming the projection is well defined. One is then forced to solve for $\dot{s}$ in the equation above. However, by doing so $1 - c_c y_1$ appears in

the denominator, thus creating a singularity at $y_1 = 1/c_c$. As a result, the control law derived in Reference [14] requires that the initial position of Q be restricted to a tube around the path, the radius of which must be less than $1/c_{c,\max}$, where $c_{c,\max}$ denotes the maximum curvature of the path. Clearly, this constraint is very conservative since the occurrence of a large $c_{c,\max}$ in even a very small section of the path only will impose a rather strict constraint on the initial vehicle's position, no matter where it starts with respect to that path.

By making s_1 not necessarily equal to zero, a virtual target that is not coincident with the projection of the vehicle on the path is created, thus introducing an extra degree of freedom for controller design. By specifying how fast the newly defined target moves, the occurrence of a singularity at $y_1 = 1/c_c$ is removed. The velocity of the unicycle in the $\{I\}$ frame satisfies the equation

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} \cos \theta_m \\ \sin \theta_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

where θ_m and v denote the yaw angle of the vehicle and its body-axis speed, respectively. Substituting (3) in (2) and introducing the variable $\theta = \theta_m - \theta_c$ gives the kinematic model of the unicycle in the (s, y) coordinates is given by

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -\dot{s}(1 - c_c y_1) + v \cos \theta \\ \dot{y}_1 &= -c_c \dot{s} s_1 + v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_m - c_c \dot{s} \end{aligned} \quad (4)$$

where $\omega_m = \dot{\theta}_m$.

2.2. Dynamics. Problem formulation

The complete dynamic model of the unicycle is obtained by augmenting (4) with the equations

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{F}{m} \\ \dot{\omega} &= \dot{\omega}_m - c_c \dot{s} - g_c \dot{s}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

where $\dot{\omega}_m = N/I$ and m and I are the mass and the mass moment of inertia of the unicycle, respectively. Notice how equation $\dot{v} = F/m$ captures the fact that the motion of the unicycle is along its longitudinal axis, in reaction to the longitudinal force F . This is a consequence of the common assumption that there is no slippage of the vehicle along its lateral axis (nonholonomic constraint).

Finally, F and N can be rewritten in terms of the control inputs τ_1 and τ_2 as

$$\begin{aligned} F &= \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{R} \\ N &= \frac{L(\tau_1 - \tau_2)}{R} \end{aligned} \quad (6)$$

where R is the radius of the rear wheels and $2L$ is the distance between them.

With the above notation, the problem under study can be formulated as follows:

Given a desired speed profile $v_d(t) > v_{\min} > 0$ for the vehicle speed v , and a path to be followed parameterized in terms of its length, derive a feedback control law for τ_1 and τ_2 to drive y_1 , θ , and $v - v_d$ asymptotically to zero in the presence of plant parameter uncertainties in m , I , R , and L .

3. NONLINEAR CONTROL DESIGN

This section introduces a nonlinear closed-loop control law to steer the dynamic model of a wheeled robot described by (4)–(5) along a desired path, in the presence of parametric uncertainties by resorting to backstepping techniques. The reader will find in Reference [21] a lucid exposition of interesting theoretical and practical issues involved in backstepping. See also Reference [5] for related work on wheeled robot control in the face of parameter uncertainty. Controller design unfolds in three basic steps where a sequence of Lyapunov functions are built to deal with kinematics, dynamics, and parameter uncertainty in succession.

3.1. Nonlinear controller design using the kinematic model

The analysis that follows is inspired by the work in Reference [13,14] on path following control for kinematic models of wheeled robots. Recall from the problem definition in Section 2 that the main objective of the path following control law is to drive y_1 and θ to zero. Starting at the kinematic level, these objectives can be embodied in the Lyapunov function candidate, see Reference [14].

$$V_1 = \frac{1}{2}(s_1^2 + y_1^2) + \frac{1}{2\gamma}(\theta - \delta(y_1, v))^2 \quad (7)$$

where it is assumed that

- A.1. $\delta(0, v) = 0$.
- A.2. $y_1 v \sin \delta(y_1, v) \leq 0 \quad \forall y_1 \quad \forall v$.
- A.3. $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) \neq 0$.

In the V_1 Lyapunov function adopted, the first term $\frac{1}{2}(s_1^2 + y_1^2)$ captures the distance between the vehicle and the path, which must be reduced to 0. The second term aims to shape the approach angle $\theta = \theta_m - \theta_c$ of the vehicle to the path as a function of the ‘lateral’ distance y_1 and speed v , by forcing it to follow a desired orientation profile embodied in the function δ . See Reference [13], where the use of a δ function of this kind was first proposed.

Assumption A.1 specifies that the desired relative heading vanishes as y_1 goes to zero, thus imposing the condition that the vehicle’s main axis must be tangent to the path when the lateral distance y_1 is 0. Assumption A.2 provides an adequate reference sign definition in order to drive the vehicle to the path (turn left when the vehicle is on the right side of the path, and turn right in the other situation). Finally, Assumption A.3 stated that the vehicle does not tend to a state of rest. The need for these conditions will become apparent in the development that follows. The derivative of V_1 can be easily computed to give

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 \dot{s}_1 + y_1 \dot{y}_1 + \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta)(\dot{\theta} - \dot{\delta}) \\ &= s_1(v \cos \theta - \dot{s}(1 - c_c y_1) - \dot{s} c_c y_1) + y_1 v \sin \theta + \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta)(\dot{\theta} - \dot{\delta}) \\ &= s_1(v \cos \theta - \dot{s}) + y_1 v \sin \delta + \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta) \left(\dot{\theta} - \dot{\delta} + \gamma y_1 v \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} \right) \end{aligned}$$

Let the ideal (also called virtual) ‘kinematic control laws’ for s and θ be defined as

$$\begin{aligned}\dot{s} &= v \cos \theta + k_1 s_1 \\ \dot{\theta} &= \dot{\delta} - \gamma y_1 v \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} - k_2(\theta - \delta)\end{aligned}\quad (8)$$

where k_1 and k_2 are positive gains. Then,

$$\dot{V}_1 = -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{(\theta - \delta)^2}{\gamma} \leq 0 \quad (9)$$

Note the presence of the term $y_1 v \sin \delta$ in the previous equation and how assumption A.2 is justified.

3.2. Backstepping the dynamics

The above feedback control law applies to the kinematic model of the wheeled robot only. In what follows, using backstepping techniques, that control law is extended to deal with the vehicle dynamics. Notice how in the kinematic design the speed of the robot $v(t)$ was assumed to follow a *desired speed profile*, say $v_d(t)$. In the dynamic design this assumption is dropped, and a feedback control law must be designed so that the tracking error $v(t) - v_d(t)$ approaches zero. Notice also that the robot’s angular speed ω_m (or equivalently the variable $\dot{\theta}$) was assumed to be a control input. This assumption will be lifted by taking into account the vehicle dynamics. Following Reference [21] define the virtual control law for $\dot{\theta}$ (desired behaviour of $\dot{\theta}$ in (8)) as

$$\zeta = \dot{\delta} - \gamma y_1 v \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} - k_2(\theta - \delta) \quad (10)$$

and let $\varepsilon = \dot{\theta} - \zeta$ be the difference between actual and desired values of $\dot{\theta}$. Replacing $\dot{\theta}$ by $\varepsilon + \zeta$ in the computation of $\dot{V}_1$ gives

$$\dot{V}_1 = -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{(\theta - \delta)^2}{\gamma} + \frac{(\theta - \delta)}{\gamma} \varepsilon \quad (11)$$

Augment now the candidate Lyapunov function V_1 with the terms $\varepsilon^2/2$ and $(v - v_d)^2/2$ to obtain

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}[\varepsilon^2 + (v - v_d)^2]$$

with derivative

$$\dot{V}_2 = -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta)^2 + \varepsilon \left(\frac{1}{\gamma}(\theta - \delta) + \dot{\varepsilon} \right) + (v - v_d)(\dot{v} - \dot{v}_d)$$

Simple computations show that if

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon} &= -\frac{1}{\gamma}(\theta - \delta) - k_3 \varepsilon \\ \dot{v} &= \dot{v}_d - k_4(v - v_d)\end{aligned}\quad (12)$$

where k_3 and k_4 are positive gains. Then

$$\dot{V}_2 = -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta)^2 - k_3 \varepsilon^2 - k_4(v - v_d)^2 \leq 0 \quad (13)$$

It is now straightforward to compute the control inputs F and N (and thus τ_1 and τ_2) by solving the dynamics equation (5) to obtain

$$\begin{aligned} N &= I(f_1(\cdot) - k_3\varepsilon) \\ F &= m(f_2(\cdot) - k_4(v - v_d)) \end{aligned} \quad (14)$$

where

$$\begin{aligned} f_1(\cdot) &= \dot{\zeta} - \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta) + c_c\dot{\zeta} + g_c\dot{\zeta}^2 \\ f_2(\cdot) &= \dot{v}_d \end{aligned}$$

The above control law makes $\dot{V}_2$ negative semidefinite. This fact plays an important role in the proof of convergence of the robot to the path.

3.3. Choice of the approach angle $\delta(y_1, v)$ and control computation

As explained before, the choice of the $\delta(y_1, v)$ function is instrumental in shaping the transient maneuvers during the path approach phase. In Reference [14], the authors propose to use $\delta(y_1, v) = -\text{sign}(v)\theta_a \tanh(y_1)$. This choice is natural, but raises some subtle mathematical difficulties because $\delta(y_1, v)$ is not differentiable with respect to v at $v = 0$.

We propose instead the approach function

$$\delta(y_1, v) = -\theta_a \tanh(k_\delta y_1 v) \quad (15)$$

where $0 < \theta_a < \pi/2$ and k_δ is an arbitrary positive gain.

Clearly, this function satisfies the assumptions A.1 and A.2. The candidate controller proposed so far requires the computation of $\dot{\delta}$ and $\ddot{\delta}$ as

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \delta'_y \dot{y}_1 + \delta'_v \dot{v} \\ \ddot{\delta} &= \delta''_y \dot{y}_1^2 + \delta''_v \dot{v}^2 + \delta'_{yv} \ddot{y}_1 + \delta''_v \ddot{v} + (\delta'_{yy} + \delta'_{yv1}) \dot{y}_1 \dot{v} + \delta'_{yv2} \dot{v} \end{aligned} \quad (16)$$

where

$$\begin{aligned} \delta'_y &= -\theta_a k_\delta v (1 - \tanh^2(k_\delta y_1 v)) \\ \delta'_v &= -\theta_a k_\delta y_1 (1 - \tanh^2(k_\delta y_1 v)) \\ \delta''_y &= \theta_a (k_\delta v)^2 2 \tanh(k_\delta y_1 v) (1 - \tanh^2(k_\delta y_1 v)) \\ \delta''_v &= \theta_a (k_\delta y_1)^2 2 \tanh(k_\delta y_1 v) (1 - \tanh^2(k_\delta y_1 v)) \\ \delta'_{yv1} &= -\theta_a k_\delta + \theta_a k_\delta \tanh^2(k_\delta y_1 v) + \theta_a k_\delta v 2 \tanh(k_\delta y_1 v) k_\delta y_1 (1 - \tanh^2(k_\delta y_1 v)) \\ \delta'_{yv2} &= \delta'_y (\sin \theta - c_c s_1 \cos \theta) \\ \delta'_{yy} &= -\theta_a k_\delta + \theta_a k_\delta \tanh^2(k_\delta y_1 v) + \theta_a k_\delta y_1 2 \tanh(k_\delta y_1 v) k_\delta v (1 - \tanh^2(k_\delta y_1 v)) \end{aligned} \quad (17)$$

Equation (16) show that it is necessary to compute the forward acceleration $\dot{v}$ and jerk $\ddot{v}$. Because measuring these quantities is hard at best, one must resort to the dynamic model of the vehicle. Assume for the time being that the unicycle's physical parameters m , I , L , and R are known exactly. At this point it is convenient to redefine the control inputs u_i ; $i = 1, 2$ as

$u_1 = \tau_1 - \tau_2$ and $u_2 = \tau_1 + \tau_2$. This yields the dynamic equations (see (6))

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_m &= \frac{u_1}{c_1} \\ \dot{v} &= \frac{u_2}{c_2}\end{aligned}\quad (18)$$

where $c_1 = IR/L$ and $c_2 = mR$ are positive parameters. With this input transformation the controller can be re-written as

$$\begin{aligned}u_1 &= c_1(f_{u1}^1 + f_{u1}^{\dot{v}}\dot{v} + f_{u1}^{\dot{v}^2}\dot{v}^2 + f_{u1}^{\ddot{v}}\ddot{v}) \\ u_2 &= c_2 f_{u2}^1\end{aligned}\quad (19)$$

where

$$\begin{aligned}f_{u1}^1 &= f_{f1}^1 - k_3 \left(\dot{\theta} - \delta'_y \dot{y}_1 + \gamma y_1 v \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} + k_2(\theta - \delta) \right) \\ f_{u1}^{\dot{v}} &= f_{f1}^{\dot{v}} + k_3 \delta'_v \\ f_{u1}^{\dot{v}^2} &= \delta''_v \\ f_{u1}^{\ddot{v}} &= \delta'_v \\ f_{u2}^1 &= \dot{v}_d - k_4(v - v_d) \\ f_{f1}^1 &= f_{\xi}^1 - \frac{1}{\gamma}(\theta - \delta) + g_c s^2 + c_c(v \dot{\theta} \sin \theta + k_1 \dot{s}_1) \\ f_{f1}^{\dot{v}} &= f_{\xi}^{\dot{v}} + c_c \cos \theta \\ f_{\xi}^1 &= f_{\delta}^1 - \gamma v \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} \dot{y}_1 + \dot{\theta} \left[-k_2 - \frac{\gamma v y_1}{(\theta - \delta)^2} (\cos \theta (\theta - \delta) - (\sin \theta - \sin \delta)) \right] \\ &\quad + \delta'_y \dot{y}_1 \left[k_2 + \frac{\gamma v y_1}{(\theta - \delta)^2} (\cos \delta (\theta - \delta) - (\sin \theta - \sin \delta)) \right] \\ f_{\xi}^{\dot{v}} &= f_{\delta}^{\dot{v}} - \gamma y_1 \frac{\sin \theta - \sin \delta}{\theta - \delta} + \delta'_v \left[k_2 + \frac{\gamma v y_1}{(\theta - \delta)^2} (\cos \delta (\theta - \delta) - (\sin \theta - \sin \delta)) \right] \\ f_{\delta}^1 &= \delta''_v \dot{y}_1^2 + \delta'_v f_{\dot{y}_1}^1 \\ f_{\delta}^{\dot{v}} &= (\delta'_{vy} + \delta'_{yv1}) \dot{y}_1 + \delta'_{yv2} + \delta'_v f_{\dot{y}_1}^{\dot{v}} \\ f_{\dot{y}_1}^1 &= -c_c \dot{s} \dot{s}_1 - g_c s^2 s_1 + \dot{\theta} v \cos \theta - c_c s_1 (k_1 \dot{s}_1 - \dot{\theta} v \sin \theta) \\ f_{\dot{y}_1}^{\dot{v}} &= \sin \theta - c_c s_1 \cos \theta\end{aligned}\quad (20)$$

At this stage, assuming that the vehicle parameters are known exactly, the acceleration $\dot{v}$ and jerk $\ddot{v}$ are obtained from the physical model of the vehicle as

$$\dot{v} = \frac{u_2}{c_2} = \dot{v}_d - k_4(v - v_d), \quad \ddot{v} = \frac{\dot{u}_2}{c_2} = \ddot{v}_d - k_4(\dot{v} - \dot{v}_d)\quad (21)$$

3.4. Parameter adaptation

We now tackle the case where the unicycle's physical parameters m , I , L , and R are not known accurately. To this effect, we start by re-writing the control law obtained in (19). Let $\bar{c}_i$ be the estimated values of the parameters, and c_i their actual unknown values. Define

$$\begin{aligned} u_1^{\text{opt}} &= c_1 f_{u1,1} + c_3 f_{u1,2} + c_4 f_{u1,3} \\ u_2^{\text{opt}} &= c_2 f_{u2} \end{aligned} \quad (22)$$

with

$$\begin{aligned} f_{u1,1} &= f_{u1}^1 \\ c_3 &= \frac{c_1}{c_2} \\ f_{u1,2} &= f_{u1}^{\dot{v}} u_2 + f_{u1}^{\ddot{v}} \bar{c}_2 (\ddot{v}_d - k_4 \dot{v}_d) \\ c_4 &= \frac{c_1}{c_2^2} \\ f_{u1,3} &= f_{u1}^{\dot{v}^2} u_2^2 - f_{u1}^{\ddot{v}} \bar{c}_2 k_4 u_2 \\ f_{u2} &= \dot{v}_d - k_4 (v - v_d) \end{aligned} \quad (23)$$

where the notation u_i^{opt} was introduced to stress the fact that this (ideal) control law is computed with the true values of the parameters. Notice how the control law depends on four new parameters c_i ; $i = 1, \dots, 4$ that are determined by the true values of the physical parameters defined above. In practice, the control law defined above must be implemented using the estimates of $\bar{c}_i$ of c_i ; $i = 1, \dots, 4$ yielding the actual control law

$$\begin{aligned} u_1 &= \bar{c}_1 f_{u1,1} + \bar{c}_3 f_{u1,2} + \bar{c}_4 f_{u1,3} \\ u_2 &= \bar{c}_2 f_{u2} \end{aligned} \quad (24)$$

Let $\Delta c_i = \bar{c}_i - c_i$, be the errors between true and estimated parameters. Notice that $\Delta \dot{c}_i = \dot{\bar{c}}_i - \dot{c}_i = \dot{\bar{c}}_i$; $i = 1, 2$, since the true parameters are constant. Using (24),

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{1}{\gamma} (\theta - \delta)^2 - k_3 \varepsilon^2 - k_4 (v - v_d)^2 \\ &\quad + \frac{\varepsilon}{c_1} (\Delta c_1 f_{u1,1} + \Delta c_3 f_{u1,2} + \Delta c_4 f_{u1,3}) + \frac{(v - v_d)}{c_2} \Delta c_2 f_{u2} \end{aligned} \quad (25)$$

which is no longer guaranteed to be negative semidefinite. In order to deal with this problem, augment V_3 with the parameter error terms to obtain the final candidate Lyapunov function

$$V_3 = V_2 + \frac{k_5}{2} \frac{\Delta c_1^2 + \Delta c_3^2 + \Delta c_4^2}{c_1} + \frac{k_6}{2} \frac{\Delta c_2^2}{c_2} \quad (26)$$

and compute its derivative

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{1}{\gamma} (\theta - \delta)^2 - k_3 \varepsilon^2 - k_4 (v - v_d)^2 + \frac{\Delta c_1}{c_1} (\varepsilon f_{u1,1} + k_5 \dot{\varepsilon}_1) \\ & + \frac{\Delta c_2}{c_2} ((v - v_d) f_{u2} + k_6 \dot{\varepsilon}_2) + \frac{\Delta c_3}{c_1} (\varepsilon f_{u1,3} + k_5 \dot{\varepsilon}_3) + \frac{\Delta c_4}{c_1} (\varepsilon f_{u1,4} + k_5 \dot{\varepsilon}_4) \end{aligned} \quad (27)$$

Let a parameter update law be defined as

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= -\frac{\varepsilon f_{u1,1}}{k_5} \\ \dot{\varepsilon}_2 &= -\frac{(v - v_d) f_{u2}}{k_6} \\ \dot{\varepsilon}_3 &= -\frac{\varepsilon f_{u1,3}}{k_5} \\ \dot{\varepsilon}_4 &= -\frac{\varepsilon f_{u1,4}}{k_5} \end{aligned}$$

This choice of adaptation law cancels the nonnegative terms of $\dot{V}_3$, yielding

$$\dot{V}_3 = -k_1 s_1^2 + y_1 v \sin \delta - \frac{1}{\gamma} (\theta - \delta)^2 - \frac{k_3}{I} \varepsilon^2 - \frac{k_4}{m} (v - v_d)^2 \leq 0 \quad (28)$$

that is, $\dot{V}_3$ becomes negative semidefinite.

3.5. Complete system. Convergence analysis

From the presentation above the complete adaptive, path following control system is described by the state equations

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= -\dot{s}(1 - c_c y_1) + v \cos \theta \\ \dot{y}_1 &= -c_c \dot{s} s_1 + v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{u_1}{c_1} - c_c \dot{s} - g_c s^2 \\ \dot{v} &= \frac{u_2}{c_2} \end{aligned} \quad (29)$$

together with the control law

$$\begin{aligned} u_1 &= \bar{c}_1 f_{u1,1} + \bar{c}_3 f_{u1,2} + \bar{c}_4 f_{u1,3} \\ u_2 &= \bar{c}_2 f_{u2} \end{aligned} \quad (30)$$

the parameter adaptation law

$$\begin{aligned}\dot{c}_1 &= -\frac{\varepsilon f_{u1,1}}{k_5} \\ \dot{c}_2 &= -\frac{(v - v_d)f_{u2}}{k_6} \\ \dot{c}_3 &= -\frac{\varepsilon f_{u1,3}}{k_5} \\ \dot{c}_4 &= -\frac{\varepsilon f_{u1,4}}{k_5}\end{aligned}\quad (31)$$

and the virtual target dynamics

$$\dot{s} = v \cos \theta + k_1 s_1 \quad (32)$$

In the above equations, all functions are replaced by their estimated values. The main result of the paper is stated next.

Proposition 1

Consider the closed-loop adaptive control system given by the dynamic model of unicycle (29) driven by the control law (30), together with the adaptation scheme (31) and the virtual target dynamics (32). Let v_d be a desired velocity profile. Assume that v_d and its first- and second-order derivatives are bounded. Further assume that v_d does not tend to zero as t tends to infinity. Then y_1 , θ , and $v - v_d$ tend asymptotically to zero in the presence of bounded plant parameter uncertainties in m, I, R , and L . Stated differently, the robot converges to the prescribed path asymptotically, in the presence of parametric modelling uncertainties, and tracks the desired speed profile v_d asymptotically.

Proof

In what follows, we describe the main steps involved in the proof of Proposition 1. The proof builds on the partial results obtained so far and makes ample use of Barbalat's lemma stated below.

Barbalat's lemma

Let the function $f(t)$ admit a second-order derivative with respect to t and assume that the limit of $f(t)$ when t tends to infinity is well defined. Further assume that $\dot{f}(t)$ is uniformly continuous. Then $\dot{f}(t)$ tends to 0 as t tends to ∞ . $\square$

For details about the Barbalat's lemma, its proof, and application, please refer to Reference [22]. The key steps in the proof can be described as follows:

- Start by considering the positive definite Lyapunov candidate V_3 in (26). Straightforward computations show that the choice of the control expression (30), together with the adaptation scheme (31) and the virtual target dynamics (32) makes $\dot{V}_3$ is negative semidefinite. Hence V_3 is a positive and monotonically decreasing function, and therefore $\lim_{t \rightarrow \infty} V_3$ exists and is finite.

- It is now possible to show that $s_1, y_1, \theta, \varepsilon$, and v are bounded because δ and v_d are assumed to be bounded. From the equations above it then follows that $\dot{s}_1, \dot{y}_1, \dot{\varepsilon}$, and $\dot{v}$ are bounded as well. Based on this result, a straightforward differentiation of $\dot{V}_3$ will show that $\ddot{V}_3$ is bounded and therefore $\dot{V}_3$ is uniformly continuous.
- Finally, a simple application of Barbalat's lemma shows that $\dot{V}_3 \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$. As a consequence, the variables $s_1, y_1, \delta, \theta, \varepsilon$ and $v - v_d$ vanish as t tends to infinity, thus proving that the vehicle converges to the path and tracks the desired speed profile asymptotically.

Remark

The errors $\Delta c_i, i = 1, 2, 3, 4$ of the parameter estimation process do not show up in the final derivative of the Lyapunov function V_3 . Thus, convergence of the errors to zero cannot be guaranteed. It can be shown, however that $\Delta c_i, i = 1, 2, 3, 4$ converge to some limit values that are not necessarily zero. Nevertheless, the control law still drives the required error states to zero. This behaviour for the parameter estimates can be observed in a large class of adaptive control systems.

4. SIMULATION RESULTS

This section illustrates the performance of the path following control law derived through simulations with a dynamic model of a wheeled robot. The reference and actual robot paths are shown in Figure 2. The desired speed $v_d(t)$ was set to 1 m s^{-1} . The values of the design parameters were $\gamma = 1$ and $k_i = 1; i = 1, \dots, 6$. The following initial conditions were adopted in

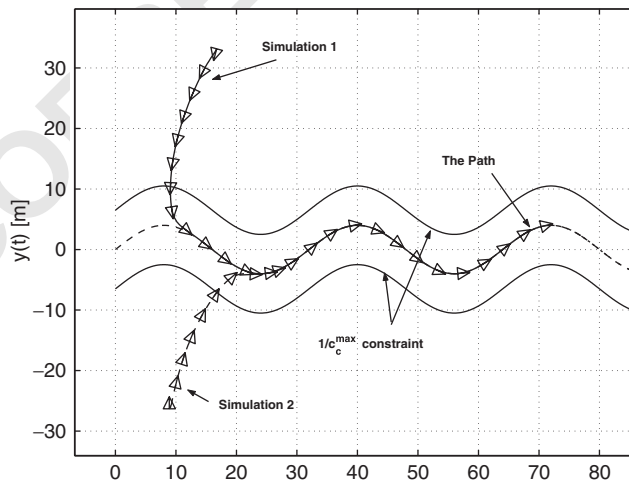


Figure 2. Desired and actual robot paths.

the simulations:

$$x_0 = \begin{bmatrix} s_1(0) \text{ (m)} \\ y_1(0) \text{ (m)} \\ \theta(0) \text{ (rad)} \\ v(0) \text{ (m/s)} \\ \dot{\theta}(0) \text{ (rad/s)} \\ s(0) \text{ (m)} \\ \bar{c}_1(0) \text{ (kg}^{-1}\text{)} \\ \bar{c}_2(0) \text{ (m)} \\ \bar{c}_3(0) \text{ (kg m)} \\ \bar{c}_4(0) \text{ (kg m}^2\text{)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 30 \\ -1.7 \\ 0.1 \\ 0 \\ 10 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ Simulation 1} = \begin{bmatrix} 4 \\ -30 \\ 1.7 \\ 0.1 \\ 0 \\ 10 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ Simulation 2}$$

The robot parameters used in the simulation are those of the Pioneer P3-DX robot: $m = 9$ kg, $I = 0.1$ kg m², $R = 0.1$ m and $L = 0.15$ m. The corresponding values for c_1 , c_2 , c_3 and c_4 are 0.06, 0.9, 0.07 and 0.08, respectively.

Figures 2–6 shows the results of the simulations. Notice how the lateral distance to the path is driven to zero and how the actual speed $v(t)$ converges to $v_d(t)$. Notice that $\dot{s}$ tends to $v_d(t)$ as well. Finally, it is important to remark that the errors in the parameter estimates do not go to zero. The objective of following the desired path is achieved nonetheless.

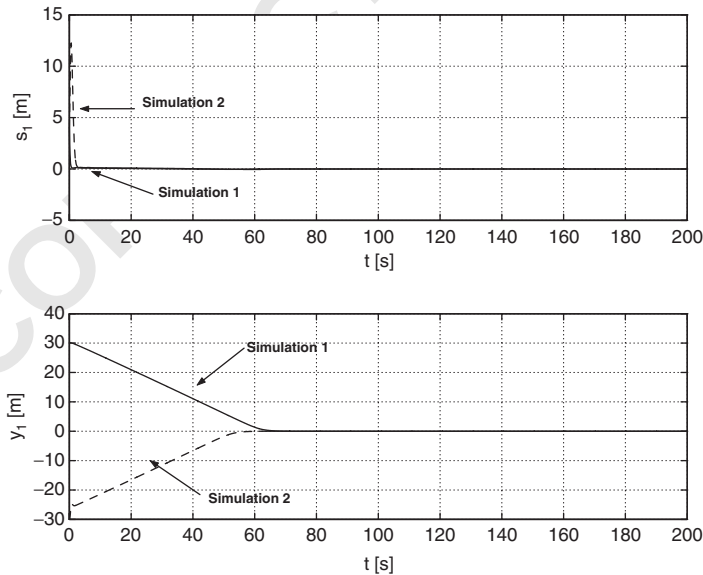
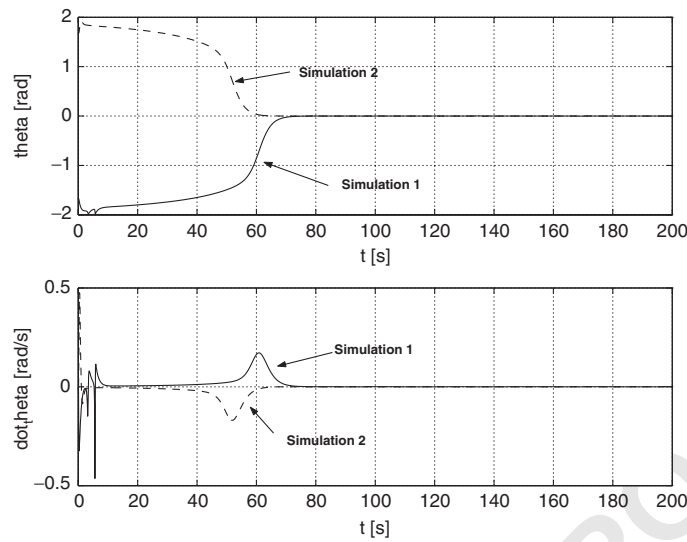
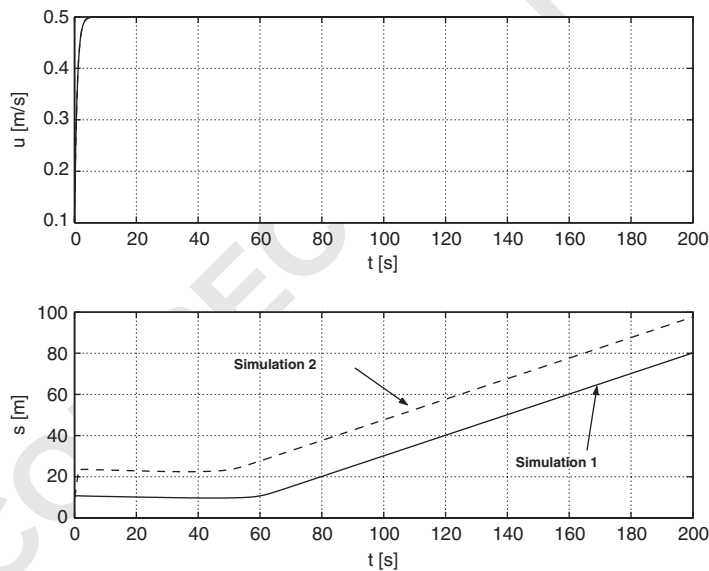


Figure 3. Time history of $s_1(t)$ and $y_1(t)$.

Figure 4. Time history of $\theta(t)$ and $\dot{\theta}(t)$.Figure 5. Time history of $v(t)$ and $s(t)$.

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The paper derived a nonlinear, adaptive control law for accurate path following of a dynamic-wheeled robot in the presence of parameter uncertainty. The key idea behind the new control law developed was to control explicitly the rate of progression of a ‘virtual target’ to be tracked

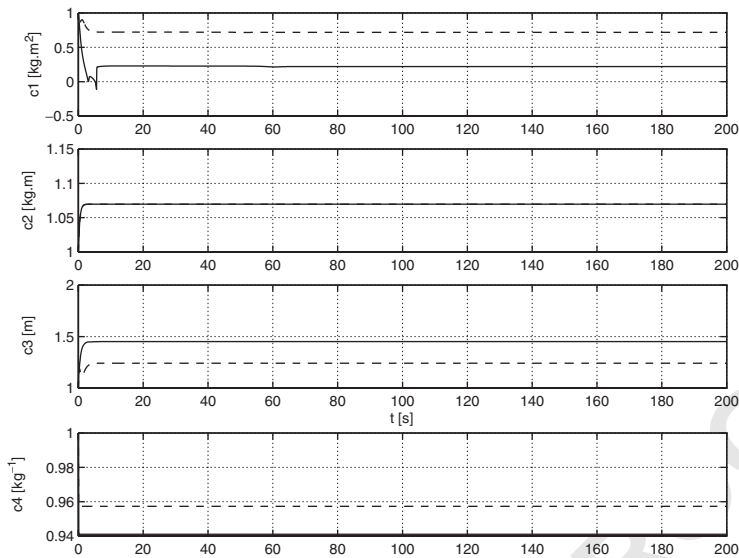


Figure 6. Time history of $c_1(t)$, $c_2(t)$, $c_3(t)$ and $c_4(t)$ (simulation 1: full line; Simulation 2: dashed line).

along the path, thus bypassing the ‘singularity’ problems that arise when the position of the virtual target is simply defined by the projection of the actual vehicle position on that path. Controller design relied on backstepping techniques. The paper offered a formal proof of convergence of the robot to the path. Simulation results illustrated the performance of the control system proposed. The research done in the scope of the present work unveiled some important issues that warrant further research. Among them, the following are worth emphasizing.

The idea of using a virtual target for path following is present, albeit in an implicit manner, in the work of Aicardi *et al.* [19], Skjetne *et al.* [23] and del Rio *et al.* [20], where a virtual target control law was ‘intuitively chosen’ even before a path following control law was developed. The originality of the present work lies in the fact that the virtual target control law falls naturally from the type of path following control law proposed, thus yielding superior performance and avoiding singularity conditions even in the presence of parameter uncertainty. This method seems to be very promising. Currently, we are investigating the benefits of using the virtual target vehicle principle to solve the combined problem of path following and obstacle avoidance for a unicycle-type robot.

In the study adopted, access to vehicle acceleration (and jerk) was done indirectly by resorting to the vehicle dynamics. The possible criticism that such a strategy may lead to poor performance or even instability (because of model parameter uncertainty) was partially addressed by incorporating an adaptive scheme. However, in the development that followed, we tacitly assumed that external disturbances, measurement noise, and unmodelled dynamics were absent. Measuring the accelerations directly via a dedicated sensor suite and using that information in a newly designed control law has the potential to yield better performance and to simplify the complexity of the path following control scheme. However, this would certainly introduce a path for noise through the acceleration

measurements. Clearly, this introduces a tradeoff in system design that must be explicitly studied.

Finally, and in order to fully complete this study, the problem of path following in the presence of actuator saturation must also be addressed.

ACKNOWLEDGEMENTS

The first author benefited from a grant of the EC, under project FREESUB. The work of the second author was supported by a post-doctoral grant from the Portuguese Foundation for Science and Technology.

REFERENCES

1. Brockett RW. Asymptotic stability and feedback stabilization. In *Differential Geometric Control Theory*, Brockett RW, Millman RS, Sussman HJ (eds). Birkhäuser: Boston, U.S.A., 1983; 181–191.
2. Canudas de Wit C, Khennouf H, Samson C, Sordalen O. Nonlinear control design for mobile robots. In: *Recent Trend in Mobile Robots*, Zheng YF (ed.), vol. 11. World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, 1993.
3. Godhavn JM, Egeland O. A Lyapunov approach to exponential stabilization of nonholonomic systems in power form. *IEEE Transaction on Automatic Control* 1997; **42**(7):1028–1032.
4. Micaelli A, Samson C. Path following and time-varying feedback stabilization of a wheeled robot. *Proceedings of International Conference ICARCV92, RO-13.1*, Singapore, September 1992.
5. Aguiar AP, Atassi A, Pascoal AM. Regulation of a nonholonomic dynamic wheeled mobile robot with parametric modeling uncertainty using Lyapunov function. *Proceeding of CDC'2000, 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia, December 2000.
6. Aguiar AP, Pascoal AM. Stabilization of the extended nonholonomic double integrator via logic based hybrid control: an application to point stabilization of mobile robots. *SYROCO'00—6th International IFAC Symposium on Robot Control*, Vienna, Austria, 2000.
7. Astolfi A. Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control. *Journal of Dynamics, Systems, Measurement and Control* 1999; **121**:121–126.
8. Hespanha JP. Stabilization of nonholonomic integrators via logic based switching. *Proceedings of the 13th World Congress of IFAC*, vol. E, San Francisco, CA, U.S.A., 1996; 467–472.
9. Canudas de Wit C, Sordalen O. Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1992; **37**(11):1791–1797.
10. Walsh G, Tilbury D, Sastry S, Laumond JP. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1994; **39**(1):216–222.
11. Freund E, Mayr R. Nonlinear path control in automated vehicle guidance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 1997; **13**(1):49–60.
12. Fierro R, Lewis F. Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics. *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*, Florida, U.S.A., 1994.
13. Samson C, Ait-Abderrahim K. Mobile robot control. Part 1: Feedback control of a non-holonomic mobile robots. *Technical Report No. 1281*, INRIA, Sophia-Antipolis, France, June 1991.
14. Micaelli A, Samson C. Trajectory—tracking for unicycle—type and two—steering—wheels mobile robots. *Technical Report No. 2097*, INRIA, Sophia-Antipolis, November 1993.
15. Jiang Z, Nijmeijer H. A recursive technique for tracking control of nonholonomic systems in the chained form. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1999; **44**(2):265–279.
16. Encarnação P, Pascoal A, Arcak M. Path following for autonomous marine craft. *Proceedings of the 5th IFAC Conference on Marine Craft Maneuvering and Control, MCMC'00*, Aalborg, Denmark, August 1992; 117–122.
17. Encarnação P, Pascoal A, Arcak M. Path following for marine vehicle in the presence of unknown currents. *Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Robot Control, SYROCO'00*, vol. II, Vienna, Austria, December 2000; 469–474.
18. Aicardi M, Casalino G, Bicchi A, Balestino A. Closed loop steering of unicycle-like vehicles via Lyapunov techniques. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 1995; **2**(1):27–35.
19. Aicardi M, Casalino G, Indiveri G, Aguiar A, Encarnao P, Pascoal A. A planar path following controller for underactuated marine vehicles. *Proceedings of the MED01 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, Croatia, June 2001.

20. del Rio F *et al.* A new method for tracking memorized paths: applications to unicycle robots. *Proceedings of the MED2002*, Lisbon, Portugal, July 2002.
21. Krstić MI, Kanellakopoulos, Kokotovic P. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. Wiley: New York, 1995.
22. Slotine JJ, Li W. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
23. Skjetne R, Fossen T, Kokotovic P. Output maneuvering for a class of nonlinear systems. *Proceedings of the IFAC World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.
24. Lapierre L, Soetanto D, Pascoal A. Nonlinear path following control of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Guidance and Control of Underwater Vehicle—GCUV'03*, Newport, South Wales, U.K., April 2003.
25. Soetanto D, Lapierre L, Pascoal A. Control of a wheeled robot with saturating actuators. *ISR Internal Report*, Lisbon, Portugal, September 2002.



While preparing this paper/manuscript for typesetting, the following queries have arisen

Query No	Proof Page / line no	Details required	Authors Response
1	REF.	Please provide publisher and place of publication for Ref. [2].	
2	REF.	Please provide initial/s if any for Kanellakopoulos in Ref. [21].	
3	2/18	'Samson' changed to 'Samson and Ait-Abderrahim'; 'Micaelli et al.' changed to 'Micaelli and Samson'. Please check if the change is okay.	
4	17/30	'Skjetne' changed to 'Skjetne et al.'. Please check if the change is okay.	
5	FIG	Please check and confirm in figure 4 whether it is dottheta or dot^t heta.	

COPYRIGHT TRANSFER AGREEMENT

Wiley Production No.

Re: Manuscript entitled

(the "Contribution") written by

(the "Contributor") for publication in.....

(the "Journal") published by John Wiley & Sons Ltd ("Wiley").

In order to expedite the publishing process and enable Wiley to disseminate your work to the fullest extent, we need to have this Copyright Transfer Agreement signed and returned to us with the submission of your manuscript. If the Contribution is not accepted for publication this Agreement shall be null and void.

A. COPYRIGHT

1. The Contributor assigns to Wiley, during the full term of copyright and any extensions or renewals of that term, all copyright in and to the Contribution, including but not limited to the right to publish, republish, transmit, sell, distribute and otherwise use the Contribution and the material contained therein in electronic and print editions of the Journal and in derivative works throughout the world, in all languages and in all media of expression now known or later developed, and to license or permit others to do so.
2. Reproduction, posting, transmission or other distribution or use of the Contribution or any material contained therein, in any medium as permitted hereunder, requires a citation to the Journal and an appropriate credit to Wiley as Publisher, suitable in form and content as follows: (Title of Article, Author, Journal Title and Volume/Issue Copyright © [year] John Wiley & Sons Ltd or copyright owner as specified in the Journal.)

B. RETAINED RIGHTS

Notwithstanding the above, the Contributor or, if applicable, the Contributor's Employer, retains all proprietary rights other than copyright, such as patent rights, in any process, procedure or article of manufacture described in the Contribution, and the right to make oral presentations of material from the Contribution.

C. OTHER RIGHTS OF CONTRIBUTOR

Wiley grants back to the Contributor the following:

1. The right to share with colleagues print or electronic "preprints" of the unpublished Contribution, in form and content as accepted by Wiley for publication in the Journal. Such preprints may be posted as electronic files on the Contributor's own website for personal or professional use, or on the Contributor's internal university or corporate networks/intranet, or secure external website at the Contributor's institution, but not for commercial sale or for any systematic external distribution by a third party (eg: a listserver or database connected to a public access server). Prior to publication, the Contributor must include the following notice on the preprint: "This is a preprint of an article accepted for publication in [Journal title] Copyright © (year) (copyright owner as specified in the Journal)". After publication of the Contribution by Wiley, the preprint notice should be amended to read as follows: "This is a preprint of an article published in [include the complete citation information for the final version of the Contribution as published in the print edition of the Journal]" and should provide an electronic link to the Journal's WWW site, located at the following Wiley URL: <http://www.interscience.wiley.com/>. The Contributor agrees not to update the preprint or replace it with the published version of the Contribution.
2. The right, without charge, to photocopy or to transmit on-line or to download, print out and distribute to a colleague a copy of the published Contribution in whole or in part, for the Contributor's personal or professional use, for the advancement of scholarly or scientific research or study, or for corporate informational purposes in accordance with paragraph D2 below.
3. The right to republish, without charge, in print format, all or part of the material from the published Contribution in a book written or edited by the Contributor.
4. The right to use selected figures and tables, and selected text (up to 250 words) from the Contribution, for the Contributor's own teaching purposes, or for incorporation within another work by the Contributor that is made part of an edited work published (in print or electronic format) by a third party, or for presentation in electronic format on an internal computer network or external website of the Contributor or the Contributor's employer. The abstract shall not be included as part of such selected text.
5. The right to include the Contribution in a compilation for classroom use (course packs) to be distributed to students at the Contributor's institution free of charge or to be stored in electronic format in datarooms for access by students at the Contributor's institution as part of their course work (sometimes called "electronic reserve rooms") and for in-house training programmes at the Contributor's employer.

D. CONTRIBUTIONS OWNED BY EMPLOYER

1. If the Contribution was written by the Contributor in the course of the Contributor's employment (as a "work-made-for-hire" in the course of employment), the Contribution is owned by the company/employer which must sign this Agreement (in addition to the Contributor's signature), in the space provided below. In such case, the company/employer hereby assigns to Wiley, during the full term of copyright, all copyright in and to the Contribution for the full term of copyright throughout the world as specified in paragraph A above.
2. In addition to the rights specified as retained in paragraph B above and the rights granted back to the Contributor pursuant to paragraph C above, Wiley hereby grants back, without charge, to such company/employer, its subsidiaries and divisions, the right to make copies of and distribute the published Contribution internally in print format or electronically on the Company's internal network. Upon payment of the Publisher's reprint fee, the institution may distribute (but not re-sell) print copies of the published Contribution externally. Although copies so made shall not be available for individual re-sale, they may be included by the company/employer as part of an information package included with software or other products offered for sale or license. Posting of the published Contribution by the institution on a public access website may only be done with Wiley's written permission, and payment of any applicable fee(s).

E. GOVERNMENT CONTRACTS

In the case of a Contribution prepared under US Government contract or grant, the US Government may reproduce, without charge, all or portions of the Contribution and may authorise others to do so, for official US Government purposes only, if the US Government contract or grant so requires. (Government Employees: see note at end.)

F. COPYRIGHT NOTICE

The Contributor and the company/employer agree that any and all copies of the Contribution or any part thereof distributed or posted by them in print or electronic format as permitted herein will include the notice of copyright as stipulated in the Journal and a full citation to the Journal as published by Wiley.

G. CONTRIBUTOR'S REPRESENTATIONS

The Contributor represents that the Contribution is the Contributor's original work. If the Contribution was prepared jointly, the Contributor agrees to inform the co-Contributors of the terms of this Agreement and to obtain their signature(s) to this Agreement or their written permission to sign on their behalf. The Contribution is submitted only to this Journal and has not been published before, except for "preprints" as permitted above. (If excerpts from copyrighted works owned by third parties are included, the Contributor will obtain written permission from the copyright owners for all uses as set forth in Wiley's permissions form or in the Journal's Instructions for Contributors, and show credit to the sources in the Contribution.) The Contributor also warrants that the Contribution contains no libelous or unlawful statements, does not infringe on the right or privacy of others, or contain material or instructions that might cause harm or injury.

Tick one box and fill in the appropriate section before returning the original signed copy to the Publisher

☐ **Contributor-owned work**

Contributor's signature Date

Type or print name and title

Co-contributor's signature Date

Type or print name and title

Attach additional signature page as necessary

☐ **Company/Institution-owned work (made-for-hire in the course of employment)**

Contributor's signature Date

Type or print name and title

Company or Institution
(Employer-for Hire)

Authorised signature of Employer Date

Type or print name and title

☐ **US Government work**

Note to US Government Employees

A Contribution prepared by a US federal government employee as part of the employee's official duties, or which is an official US Government publication is called a "US Government work", and is in the public domain in the United States. In such case, the employee may cross out paragraph A1 but must sign and return this Agreement. If the Contribution was not prepared as part of the employee's duties or is not an official US Government publication, it is not a US Government work.

☐ **UK Government work (Crown Copyright)**

Note to UK Government Employees

The rights in a Contribution by an employee of a UK Government department, agency or other Crown body as part of his/her official duties, or which is an official government publication, belong to the Crown. In such case, the Publisher will forward the relevant form to the Employee for signature.

WILEY AUTHOR DISCOUNT CARD

As a highly valued contributor to Wiley's publications, we would like to show our appreciation to you by offering a **unique 25% discount** off the published price of any of our books*.

To take advantage of this offer, all you need to do is apply for the **Wiley Author Discount Card** by completing the attached form and returning it to us at the following address:

The Database Group
John Wiley & Sons Ltd
The Atrium
Southern Gate
Chichester
West Sussex PO19 8SQ
UK

In the meantime, whenever you order books direct from us, simply quote promotional code **S001W** to take advantage of the 25% discount.

The newest and quickest way to order your books from us is via our new European website at:

<http://www.wileyeurope.com>

Key benefits to using the site and ordering online include:

- Real-time SECURE on-line ordering
- The most up-to-date search functionality to make browsing the catalogue easier
- Dedicated Author resource centre
- E-mail a friend
- Easy to use navigation
- Regular special offers
- Sign up for subject orientated e-mail alerts

So take advantage of this great offer, return your completed form today to receive your discount card.

Yours sincerely,



Verity Leaver
E-marketing and Database Manager

*TERMS AND CONDITIONS

This offer is exclusive to Wiley Authors, Editors, Contributors and Editorial Board Members in acquiring books (excluding encyclopaedias and major reference works) for their personal use. There must be no resale through any channel. The offer is subject to stock availability and cannot be applied retrospectively. This entitlement cannot be used in conjunction with any other special offer. Wiley reserves the right to amend the terms of the offer at any time.

REGISTRATION FORM FOR 25% BOOK DISCOUNT CARD

To enjoy your special discount, tell us your areas of interest and you will receive relevant catalogues or leaflets from which to select your books. Please indicate your specific subject areas below.

Accounting ☐ • Public ☐ • Corporate ☐	Architecture ☐
Chemistry ☐ • Analytical ☐ • Industrial/Safety ☐ • Organic ☐ • Inorganic ☐ • Polymer ☐ • Spectroscopy ☐	Business/Management ☐
Encyclopedia/Reference ☐ • Business/Finance ☐ • Life Sciences ☐ • Medical Sciences ☐ • Physical Sciences ☐ • Technology ☐	Computer Science ☐ • Database/Data Warehouse ☐ • Internet Business ☐ • Networking ☐ • Programming/Software Development ☐ • Object Technology ☐
Earth & Environmental Science ☐	Engineering ☐ • Civil ☐ • Communications Technology ☐ • Electronic ☐ • Environmental ☐ • Industrial ☐ • Mechanical ☐
Hospitality ☐	Finance/Investing ☐ • Economics ☐ • Institutional ☐ • Personal Finance ☐
Genetics ☐ • Bioinformatics/Computational Biology ☐ • Proteomics ☐ • Genomics ☐ • Gene Mapping ☐ • Clinical Genetics ☐	Life Science ☐
Medical Science ☐ • Cardiovascular ☐ • Diabetes ☐ • Endocrinology ☐ • Imaging ☐ • Obstetrics/Gynaecology ☐ • Oncology ☐ • Pharmacology ☐ • Psychiatry ☐	Landscape Architecture ☐
Non-Profit ☐	Mathematics/Statistics ☐
	Manufacturing ☐
	Material Science ☐
	Psychology ☐ • Clinical ☐ • Forensic ☐ • Social & Personality ☐ • Health & Sport ☐ • Cognitive ☐ • Organizational ☐ • Developmental and Special Ed ☐ • Child Welfare ☐ • Self-Help ☐
	Physics/Physical Science ☐

[] I confirm that I am a Wiley Author/Editor/Contributor/Editorial Board Member of the following publications:

SIGNATURE:

PLEASE COMPLETE THE FOLLOWING DETAILS IN BLOCK CAPITALS:

TITLE AND NAME: (e.g. Mr, Mrs, Dr)

JOB TITLE:

DEPARTMENT:

COMPANY/INSTITUTION:

ADDRESS:

.....

.....

.....

TOWN/CITY:

COUNTY/STATE:

COUNTRY:

POSTCODE/ZIP CODE:

DAYTIME TEL:

FAX:

E-MAIL:

YOUR PERSONAL DATA

We, John Wiley & Sons Ltd, will use the information you have provided to fulfil your request. In addition, we would like to:

1. Use your information to keep you informed by post, e-mail or telephone of titles and offers of interest to you and available from us or other Wiley Group companies worldwide, and may supply your details to members of the Wiley Group for this purpose.
[] Please tick the box if you do not wish to receive this information
2. Share your information with other carefully selected companies so that they may contact you by post, fax or e-mail with details of titles and offers that may be of interest to you.
[] Please tick the box if you do not wish to receive this information.

If, at any time, you wish to stop receiving information, please contact the Database Group (databasegroup@wiley.co.uk) at John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, UK.

E-MAIL ALERTING SERVICE

We offer an information service on our product ranges via e-mail. If you do not wish to receive information and offers from John Wiley companies worldwide via e-mail, please tick the box [].

This offer is exclusive to Wiley Authors, Editors, Contributors and Editorial Board Members in acquiring books (excluding encyclopaedias and major reference works) for their personal use. There should be no resale through any channel. The offer is subject to stock availability and may not be applied retrospectively. This entitlement cannot be used in conjunction with any other special offer. Wiley reserves the right to vary the terms of the offer at any time.

Ref: S001W



Contents lists available at ScienceDirect

Ocean Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng



Robust diving control of an AUV

Lionel Lapierre^{*}

LIRMM, 161 Rue Ada, 34392 Montpellier, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 March 2008

Accepted 23 October 2008

Available online 25 November 2008

Keywords:

Robust control

Nonlinear control

Underwater system

AUV

ABSTRACT

Mobile systems traveling through a complex environment present major difficulties in determining accurate dynamic models. Autonomous underwater vehicle motion in ocean conditions requires investigation of new control solutions that guarantee robustness against external parameter uncertainty. A diving-control design, based on Lyapunov theory and back-stepping techniques, is proposed and verified. Using adaptive and switching schemes, the control system is able to meet the required robustness. The results of the control system are theoretically proven and simulations are developed to demonstrate the performance of the solutions proposed.

© 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The severe problem of managing water resources leads public and private authorities to finance research of the use of alternative water resources such as karst submarine springs. This is the purpose of the MEDITATE sixth framework program.¹ The Montpellier Laboratory of Computer Science, Robotics, and Microelectronics (LIRMM) is responsible for carrying out physical and chemical water sampling, through the use of its autonomous underwater vehicle (AUV), Taipan 2.

The work reported here focuses on the control of the Taipan 2. Its purpose is to take electrical conductivity and temperature mapping at various depths over a karst water spring. The objective is to obtain sufficient samples to generate an accurate 3D numerical model of the spring in order to quantify its flow and water quality. These measurements must be carried out at different periods of the year in order to evaluate the change in seasonal flow dynamics. This requires accurate geo-referencing of the data. Consequently, the vehicle needs to adjust its trajectory using periodic GPS positioning calibration in an autonomous manner.

An important constraint is the depth at which the springs are located. We are currently performing validation tests on the fresh water spring *La Vise*. The resurgence depth is around 36 m, located at the bottom of an 80-m diameter cone, and rising up to a depth of 2 m.

Initial tests were performed using the Taipan 2. These tests emphasized the necessity for precise control of the vertical trajectory, because the vehicle must be able to navigate in a very

shallow environment. The purpose of this paper is to present the design of a robust control law that provides the desired accuracy in the vertical control of an AUV. The performance of the solution is evaluated using simulations.

1.1. Taipan 2: vehicle description

The Taipan 2 AUV is currently being developed by LIRMM (France) and the Hytec/ECA company (France). It is particularly well suited for this type of application because of its small size and weight (1.8 m length, 0.2 m diameter, 60 kg) and relatively low cost. Its design is derived from the torpedo-shaped Taipan 1 AUV. It has a single propeller, a rudder and a stern diving plane. Additional bow diving planes endow the vehicle with new capabilities particularly suited to very shallow water applications. Unlike other similar vehicles (Remus², Gavia³ and Callas⁴), Taipan 2 is able to follow a desired depth profile with a null pitch angle, and dive from the surface autonomously. The bow control planes can counteract the positive buoyancy necessary to guarantee recovery. The Taipan 2 carries a wide range of sensors. For the purpose of navigation the AUV has two depth sensors, the acceleration and orientation unit 3DM-GX1 (Microstrain) and the Workhorse Doppler Velocity Log (RDI Instrument), and it also has a low power GPS Unit (Lassen). The mission specific sensors carried by the vehicle are a side scan sonar (Tritech), a CTD sampler (ADM), a CCD VPC-795DN camera (Pacific Corporation) and two molded underwater transducers (Murata). A third iteration of the vehicle is currently underway, and it will include

^{*} Tel.: +33 4 67 41 85 15; fax: +33 4 67 41 85 00.

E-mail address: lapierre@lirmm.fr

¹ URL: http://www.meditate.hacettepe.edu.tr/prjdesc/sum_just.htm

² Hydroid Inc., Remus homepage, URL: <http://www.hydroidinc.com>

³ Gavia Comp., Gavia homepage, URL: <http://www.gavia.is/>

⁴ CNIM., Callas homepage, URL: <http://www.cnim.fr/>

an electronic pencil beam sonar (Imagenex) and an acoustic modem (ORCA).

1.2. AUV control

The performance of an AUV controller that is model based depends on the accuracy of the model parameters. Accurate modeling for an AUV is a difficult task, and results in a set of highly coupled nonlinear equations (Aucher, 1981; Fossen, 1994; Lewis, 1988; Batchelor, 1967; Newman, 1977). Controller design resulting from classic linear approaches does not generate satisfactory performances, as exposed by Kim (2000). Silvestre et al. (2002) propose a gain-scheduled trajectory-tracking controller. The linearization of the system dynamics about trimming-trajectory, helices parameterized by the vehicle's linear speed, yaw rate and flight path angle, results in a time-invariant plant. Thus, considering a global trajectory consisting of the piecewise union of trimming trajectories, the problem is thereby solved by designing a set of linear controllers for the linearized plants at each operating point. Interpolating between these controllers guarantees adequate local performance for all the linearized plants. However, this methodology does not explicitly address the issues of global stability and performance.

Accuracy of the model estimation cannot be guaranteed, so the robustness of the control scheme is important. One of the classical control methods relies on the sliding-mode design, exposed by Slotine and Li (1991). Salgado-Jimenez et al. (2004) propose a control design applied to the Taipan 2 AUV, based on a high-order sliding mode, that explicitly addresses the chattering problem encountered when using the classic sliding mode. This is achieved by controlling high-order derivatives of the sliding surface, thus removing the discontinuity of the control vector. This method exhibits robust behavior, but the equivalent control is designed using a linearized method that does not allow for global stability and performance analysis. Song and Smith (2000) combine the sliding-mode advantages with a fuzzy approach expressing the switching rules based on experimental data. This approach allows for the design of a solution without considering any system model. Nevertheless, global stability and performance of this solution still cannot be addressed. Naeem et al. (2002, 2004) propose a control based on model prediction using genetic algorithms, but the performances and stability properties are not addressed. Designing a control scheme that guarantees global convergence requirements is of major interest in the field of autonomous underwater robotics. The final objective is to ensure safe recovery of the vehicle at the end of the mission. This goal requires many different aspects of the system to be simultaneously considered. The hardware and software architectures must exhibit a deterministic behavior. The navigation system should provide a certain estimation of system states within guaranteed error tolerance, and the control scheme must exhibit desirable global performances. Considering the model nonlinearities, the Lyapunov approach has many advantages. A first step allows for designing a control solution that considers the system kinematics and meets global convergence requirements. Then using the backstepping approach (Krstic et al., 1995), the system model is augmented with its dynamic states, while still meeting global performance requirements. Another backstepping stage allows for parameter uncertainty to be taken into account, designing an adaptive scheme that guarantees robustness. This method is only valid if the parameters appear with an affine form in the control expression. An application to a nonholonomic wheeled system has been proposed by Soetanto et al. (2003). In the case of an AUV, the underactuation constraint (where there are fewer actuators than degrees of freedom to be controlled) is

expressed at the dynamic level, and its consideration leads to a control expression that contains dynamic parameters which do not appear with an affine form (Lapiere, 2003). Existing solutions are based on a model simplification, reducing the problem to a multivariable linear system (Healey and Lienard, 1993; Fossen, 1994; Prestero, 2001), or using a McLaurin series expansion of the trigonometric terms around a well-chosen guidance function, asji-Hong and Pan-Mook (2005) did.

Recently, there has been a surge of interest in the problem of coordinated motion control of fleets of autonomous marine vehicles. The work reported in the literature addresses a large class of challenging problems that include, among others, cooperative exploration (Zhang et al., 2007), formation flying (Porfiri et al., 2007; Stilwell and Bishop, 2000) and mobile sensor networks (Ogren et al., 2004) carried by swarms of vehicles.

Our approach considers the vertical dynamic model of the Taipan 2 AUV, taking advantage of the presence of bow control surfaces that yield a control expression where the parameters appear with an affine form. Moreover, the presence of these bow fins makes the system fully actuated in the vertical plane, for nonzero forward velocity. The diving profile can be fully controlled with a desired pitch angle that theoretically can be null. Diving from the surface with a desired null pitch angle might not be efficient. The time to reach the desired depth could become very long. This allows for navigation at the desired depth with a null pitch angle. The positive system buoyancy, necessary for recovery, induces an upward force that must be counteracted by the bow fins. An active buoyant control system could achieve the same goal, but the lack of any controlled organs of this type will result in conflict between the pitch and depth controls.

The paper is organized as follows: Section 2 formulates the problem under study, and presents the kinematic and vertical dynamic models of the Taipan 2 AUV. Section 3 presents the method for designing a dynamic control of the vehicle's depth behavior and introduces the design of the adaptive scheme to achieve the desired robustness. Then another robust scheme is presented, based on switching system theory. Section 4 contains simulation results and discussions. Section 5 concludes the paper.

2. Problem formulation

This section introduces the notation used throughout the paper. The kinematic and vertical dynamic models of the Taipan 2 AUV is presented, and a formulation of the problem of driving a vehicle in the vertical plane is stated.

2.1. Notation

The following notation will be used in the paper. The symbol $\{A\} := \{x_A, y_A, z_A\}$ denotes a reference frame with origin O_A and unit vectors x_A, y_A and z_A . Given two reference frames $\{A\}$ and $\{B\}$, ${}^B_R A$ is the rotation matrix from $\{B\}$ to $\{A\}$. The general kinematic and dynamic equations of a vehicle can be developed using a global coordinate frame $\{U\}$ and a body-fixed coordinate frame $\{B\}$, as depicted in Fig. 1. Consider the Taipan 2 vehicle with frames and variables defined according to the SNAME convention (SNAME, 1964). Following this convention:

- $[u, v, w]$ defines the linear system velocities (surge, sway and heave, respectively) expressed in the body frame $\{B\}$.
- $[\phi, \theta, \psi]$ defines the vehicle's attitude, designing, respectively, the roll, pitch and yaw angles.
- $[p, q, r]$ denotes the angular velocities about each of the axis of the body coordinate frame. The kinematic relation between $[p, q, r]$ and $[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]$ is given in Eq. (1).

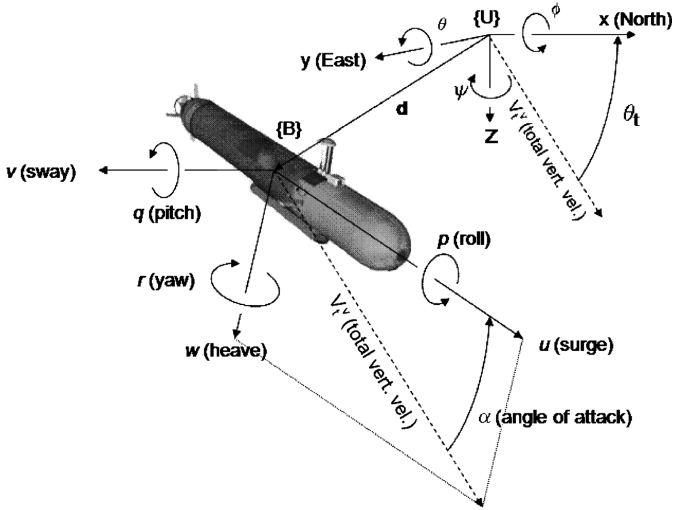


Fig. 1. Body-fixed frame {B} and earth-fixed reference frame {U}.

- v_t^v defines the total velocity projected onto the diving plane, $v_t^v = \sqrt{u^2 + w^2}$.
- α is the angle of attack, $\alpha = -\arctan(w/u)$.
- θ_t is the angle of the total velocity vector with respect to the horizontal surface where $\theta_t = \theta + \alpha$.
- δ_r^{up} and δ_r^{dp} are the deflection angles of the rudder surfaces. In the Taipan 2, the upper and lower rudder surfaces are independently controlled. This allows compensation of the rolling effect from the thruster.
- δ_b and δ_s are the deflection angle of the bow and stern surfaces, respectively. In the Taipan 2, the portside and starboard surfaces are coupled. Fig. 2 illustrates the definition of the angle of the control surfaces.

Let $d = [x, y, z]$ be the position of {B} with respect to {U}. The complete kinematic model of the AUV is

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos \psi \cos \theta - v \sin \psi \cos \phi + v \cos \psi \sin \theta \sin \phi \\ &\quad + w \sin \psi \sin \phi + w \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \dot{y} &= u \sin \psi \cos \theta + v \cos \psi \cos \phi + v \sin \psi \sin \theta \sin \phi \\ &\quad - w \cos \psi \sin \phi + w \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ \dot{z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \\ \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= q \sin \phi / \cos \theta + r \cos \phi / \cos \theta\end{aligned}\quad (1)$$

The Taipan 2 vehicle dynamic model has been theoretically estimated with the classic methods in Fossen (1994) and Aucher (1981). For control design purpose, and as done in Silvestre et al. (2002), we simplify the full model in neglecting the stable roll motion. Then the simplified vertical plane model can be written as

$$\begin{aligned}F_u &= m_u \dot{u} + d_u \\ F_w &= m_w \dot{w} + m_{uq} u q + d_w \\ \Gamma_q &= m_q \dot{q} + m_{pr} p r + d_q\end{aligned}\quad (2)$$

where $m_u = \text{mass} - X_{\dot{u}}$, $m_w = \text{mass} - Z_{\dot{w}}$, $m_q = I_{yy} - M_{\dot{q}}$, $m_{uq} = -\text{mass}$, $m_{pr} = -I_{zz}$, $d_u = -X_{uu}u|u| + \text{mass}(qw - vr + z_g(pr))$, $d_w = -Z_{ww}w|w| - Z_{uw}uw - \text{mass}z_g(p^2 + q^2)$ and $d_q = -M_{qq}q|q| - M_{uq}uq - M_{uw}uw + (z_g \text{mass}g - z_b \text{buoy}g) \sin \theta + \text{mass}z_g(wq - vr)$.

The variables $X_{\dot{u}}$, $Z_{\dot{w}}$ and $M_{\dot{q}}$ represent the dynamic derivative coefficients of the vertical plane dynamics of Taipan 2. The terms mass , buoy and $I_{\cdot}$ are the mass, buoyancy and moments of inertia of the vehicle, respectively. z_g and z_b , respectively, are the location of the center of gravity and the center of buoyancy along the z_B

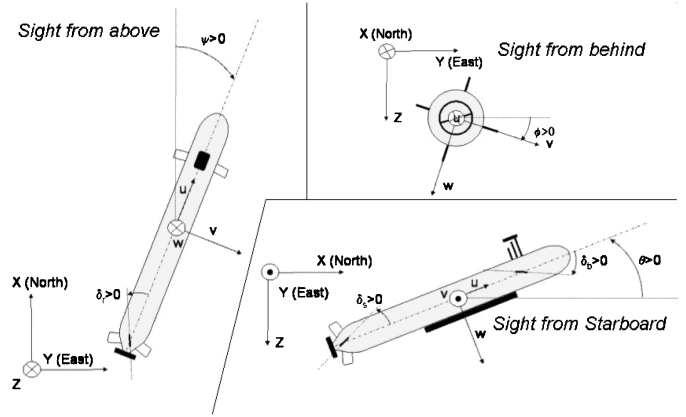


Fig. 2. Body frame and control surfaces angles definition.

axis with respect to the axis of propulsion. Due to the two planes of symmetry of the vehicle geometry, x_g, y_g and x_b, y_b are zeroes. To simplify, we assume a linear effect for surface deflection. The propulsion model is treated as a constant source and the thrust as it is done by in Prestero (2001). The value of the propulsion coefficients are derived from experiments at sea conducted on Taipan 2. These tests show that the vehicle maintains a forward velocity of 1.5 ms^{-1} with maximum pulse width modulation (PWM) input of the propulsion motor. We assume that at this steady velocity, the system compensates for the axial drag effect. Then the propulsion model coefficients are computed as

$$X_{uprop} = -X_{uu}(1.5)^2 \quad (3)$$

Taking into account these assumptions, the vertical plane actuation model can be written as follows:

$$\begin{aligned}F_u &= X_{uprop} \\ F_w &= Z_{uu\delta_b} u^2 \delta_b + Z_{uu\delta_s} u^2 \delta_s \\ \Gamma_q &= M_{uu\delta_b} u^2 \delta_b + M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s\end{aligned}$$

Table 1 (see Appendix A) gives the dimensional values of these derivatives for Taipan 2.

2.2. Problem formulation

Our objective is to design a control law for the system described by its kinematic and dynamic models (1) and (2) to asymptotically reach a desired depth profile, regardless of misestimation in model parameters, and assuming negligible roll dynamics. The design process will include three steps. We will first consider the kinematic level, and proceed to a Lyapunov-based control design that exhibits asymptotic global performances. The second step consists of augmenting the considered system with its dynamic states (2), and using backstepping techniques, design a dynamic control that respects the previous convergence requirement. The third stage will again use a backstepping process to explicitly consider the effect of parameter misestimation on the global performance, and design a robust control scheme to remove this effect. Here we propose two different methods. First we establish the robust scheme design using classic Lyapunov theory. Then we use switching-system theory to achieve the same goal. The previous problems are mathematically stated as follows:

Kinematic problem C₁. Consider the AUV kinematic equations given by (1), traveling with a forward velocity u . Given a desired depth z_d , derive a feedback control law for the w and q velocities so

that the depth error $\tilde{z} = z - z_d$ and the pitch angle θ tend uniformly and asymptotically to zero.

The solution to problem C_1 allows for designing kinematic references for the velocities w and q in order to drive the depth z to desired depth z_d and the pitch angle θ to 0. Then this solution is used during a backstepping process to compute the force and torque inputs, in terms of F_w and Γ_q , in order to follow the previous kinematic references. This is the topic of the dynamic problem C_2 .

Dynamic problem C_2 . Consider the AUV kinematic and dynamic equations given by (1) and (2), propelled with the parameters of Eq. (3). Given a desired depth z_d , derive a feedback control law for the bow (δ_b) and stern (δ_s) fins so that the depth error $\tilde{z} = z - z_d$ and the pitch angle θ tend uniformly and asymptotically to zero.

The previous solution assumes an impossibly perfect knowledge of the system parameters. Problem C_3 includes in its statement the misestimation of the system parameters, and the solution exposed in the sequel proposes the design of a classic adaptive scheme. That allows for the convergence requirement despite parameters misestimation.

Adaptive dynamic problem C_3 . Consider the AUV kinematic and dynamic equations given by (1) and (2), propelled with the parameters of Eq. (3). Given a set of estimated parameters $\hat{X}_\bullet, \hat{Z}_\bullet, \hat{M}_\bullet, \hat{I}_\bullet, \hat{z}_g, \hat{z}_b, \hat{m}_{ass}$ and $\hat{b}_{uoy}$ and a desired depth z_d , derive a feedback control law for the bow (δ_b) and stern (δ_s) fins so that the depth error $\tilde{z} = z - z_d$ and the pitch angle θ tend uniformly and asymptotically to zero.

As shown in Section 4.3, the previous adaptive solution does not guarantee the existence of a bound in the evolution of the value of the system parameters used in the control expression. Therefore, this solution is not well suited for practical applications. Problem C_4 proposes another statement, that requires two sets of parameters values. The first set is guaranteed to overestimate the real parameters value, and the second is guaranteed to underestimate the real parameters value. Section 4.4 proposes the design of a switching control that guarantees the convergence of the system, despite misestimation of the parameters, while guaranteeing the constraints on the control inputs. This is the switching robust problem C_4 .

Switching robust problem C_4 . Consider the AUV kinematic and dynamic equations given by (1) and (2), propelled with the parameters of Eq. (3). Given a set of estimated parameters, that are guaranteed to overestimate their respective real values $\hat{X}_\bullet, \hat{Z}_\bullet, \hat{M}_\bullet, \hat{I}_\bullet, \hat{z}_g, \hat{z}_b, \hat{m}_{ass}$ and $\hat{b}_{uoy}$, a set of underestimated parameters $\underline{X}_\bullet, \underline{Z}_\bullet, \underline{M}_\bullet, \underline{I}_\bullet, \underline{z}_g, \underline{z}_b, \underline{m}_{ass}$ and $\underline{b}_{uoy}$ and a desired depth z_d , derive a feedback control law for the bow (δ_b) and stern (δ_s) fins so that the depth error $\tilde{z} = z - z_d$ and the pitch angle θ tend uniformly and asymptotically to zero.

The next section proposes a solution to problems $C_i, i = 1, \dots, 4$.

3. Control design

This section proposes a solution to the problems stated in the previous section. The complexity of the problem is generally reduced by using an appropriate guidance strategy. This is a method to shape the expression of the error function that the control law tries to reduce to zero. Many guidance strategies have been proposed, see Naeem (2002) for a review. An interesting study case, where a guidance strategy solves the problem of relaxing the classic path-following constraint in the horizontal plane applied to a nonholonomic wheeled or underactuated

marine robots, is treated by Soetanto et al. (2003) and Lapiere et al. (2003). Here we consider a nonlinear guidance strategy inspired by the work of Samson and Ait-Abderrahim (1991).

Previous work (Lapiere et al., 2003) addressed the problem of path-following control of an underactuated AUV in the horizontal plane. One of the conclusions was that controlling total velocity horizontal direction (through the control of yaw dynamics), according to an appropriate guidance function, allows for asymptotically and uniformly driving of the origin of the body-frame attached to the vehicle onto the desired path. Due to the unactuated sway dynamics, the results show that the vehicle is driven onto the path, but that the heading is not permanently tangent to the path. This can also be seen in the case of a straight-line path with a lateral sea current. The analogy with our present application (in the diving plane) is straightforward. Consider an AUV that only carries stern control-surfaces. The presence of positive buoyancy plays a similar role to the sea current in the previous horizontal path-following application. Thus, a depth control using only the stern planes will result in a system that naturally compensates for buoyancy by pitching negatively. The use of the bow-plane control will enable counteracting of this ascending effect, thus controlling the pitch dynamics.

Regarding the proofs of the following propositions, we will extensively use a corollary of Barbalat's Lemma and LaSalle's Theorem, stated as follows:

Barbalat's Lemma. If $f(t)$ is a double differentiable function such that $f(t)$ is finite as t goes to ∞ , and such that $\dot{f}(t)$ is uniformly continuous, then $\dot{f}(t)$ tends to 0 as t tends to ∞ .

Uniform continuity sufficient condition. $\dot{f}(t)$ is uniformly continuous if $\ddot{f}(t)$ exists and is bounded.

Corollary of Barbalat's Lemma (CBL). If $f(t)$ is a double differentiable function such that $f(t)$ is finite as t goes to ∞ , and such that $\dot{f}(t)$ exists and is bounded, then $\dot{f}(t)$ tends to 0 as t tends to ∞ .

LaSalle's invariance principle. Let Ω be a positively invariant set of the autonomous system described in (1) and (2). Suppose that every solution starting in Ω converges to a set $E \subset \Omega$ and let M be the largest invariant set contained in E . Then every bounded solution starting in Ω converges to M as t tends to ∞ .

See Slotine and Li (1991) for details on Barbalat's Lemma and its application. For the proof and application of LaSalle's Theorem, see Sepulchre et al. (1997) and Khalil (2002). Note that the application of LaSalle's Theorem is restricted to autonomous systems. However, since in our situation the references of the system (known forward velocity u , desired depth z_d , desired null pitch angle) are known and constant, and the system parameters are constant we fall in this category and we can apply LaSalle's invariance principle.

Regarding Proposition 4, we omit the complete proof. The solution relies on switching system theory and a rigorous proof should introduce some notion about the switching capability of the system (minimum dwell time), that is dependant on the onboard hardware and software architectures. In order to avoid complications, we restrict ourself to simply sketch a proof.

3.1. Kinematic control design

The following proposition suggests a solution to problem C_1 .

Proposition 1. Consider the AUV kinematic equations given by (1), traveling with a forward velocity u . Let z_d be the desired depth the vehicle has to reach with a null pitch angle. Let λ and λ_t be two

guidance functions described by the following equations:

$$\lambda = \lambda^A \tanh(k^A \tilde{z}) \quad (4)$$

$$\lambda_t = \lambda_t^A \tanh(k_t^A \tilde{z}) \quad (5)$$

where k^A, k_t^A are positive gains, $0 < \lambda^A < \pi/2$ and $0 < \lambda_t^A < \pi/2$ are the positive maximum values of the guidance references λ and λ_t and $\tilde{z} = z - z_d$ is the depth error. The following velocity profile, described by Eqs. (6) and (7), for q and w , solves problem **C**₁.

$$q = \frac{\dot{\theta}^{REF} + r \sin \phi}{\cos \phi} \quad (6)$$

$$w = \int_0^t \left[(\dot{\lambda}_t - \dot{\theta}^{REF} - k_w(\theta_t - \lambda_t)) \frac{(v_t^v)^2}{u} \right] dt \quad (7)$$

where $\dot{\theta}^{REF} = [\dot{\lambda} - k_\theta(\theta - \lambda)]$ and k_θ, k_w are positive gains.

Proof of Proposition 1. Consider the Lyapunov candidate $V_1 = \frac{1}{2}(\theta - \lambda)^2 + \frac{1}{2}(\theta_t - \lambda_t)^2$. Straightforward computation shows that

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \dot{\lambda} - k_\theta(\theta - \lambda) \\ \dot{\theta}_t &= \dot{\lambda}_t - \dot{\theta} - k_w(\theta_t - \lambda_t) \end{aligned} \quad (8)$$

yields $\dot{V}_1 = -k_\theta(\theta - \lambda)^2 - k_w(\theta_t - \lambda_t)^2 \leq 0$. Since V_1 is a positive and monotonically decreasing function, $\lim_{t \rightarrow \infty} V_1(t)$ exists. It is straightforward to show that $\dot{V}_1$ exists and is bounded. Then, an application of Barbalat's Lemma allows for the conclusion that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1(t) = 0$. Hence the related variables θ and θ_t are bounded, and asymptotically converge to the invariant set Ω_1 defined as $\Omega_1 := \{(\theta, \theta_t) \in \mathbb{R}^2 / \theta = \lambda, \theta_t = \lambda_t\}$. Let us now study the system trajectory onto the set Ω_1 , considering the Lyapunov candidate function $V_2 = \frac{1}{2}\tilde{z}^2$, defined onto the invariant set Ω_1 . Tedious but straightforward algebraic computation shows

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= u\tilde{z} \left[-\sin \lambda \left(1 - \frac{\cos \phi}{1 + \tan \lambda \tan \lambda_t} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\tan \lambda_t \cos \lambda}{1 + \tan \lambda \tan \lambda_t} \cos \phi + \frac{v}{u} \cos \theta \sin \phi \right] \end{aligned}$$

The previous expression is composed with three terms, in which appear the rolling angle ϕ and the side slip angle $\beta = \arctan(v/u)$. Clearly these terms are dependent on the horizontal and the rolling-plane controllers. Studying the coupling between the three planes could be an interesting question, but will lead in this work to unnecessary complications. So, as mentioned in the problem statement, we neglect the roll effect dynamics. The previous expression thus becomes

$$\dot{V}_2 = u\tilde{z} \left[\frac{-\tan \lambda_t}{1 + \tan \lambda \tan \lambda_t} \frac{1}{\cos \lambda} \right]$$

Considering the definition of the guidance functions (4) and (5), we know that $-\pi/2 < \lambda < \pi/2$, $-\pi/2 < \lambda_t < \pi/2$ and that both functions have the same sign than $\tilde{z}$. Then we conclude that $\dot{V}_2(t) \leq 0$ onto Ω_1 and for all t . Since V_2 is positive and monotonically decreasing, $\lim_{t \rightarrow \infty} V_2(t)$ exists, hence $\tilde{z}$ is bounded. Since $\tilde{z}$ is bounded, $\dot{V}_2$ and $\tilde{z}$ are also bounded. Then, direct derivation shows that the condition of boundedness for $\dot{V}_2$ is met. The application of Barbalat's Lemma onto the invariant set Ω_1 allows for the conclusion that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_2(t)|_{\Omega_1} = 0$. So $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{z}(t)|_{\Omega_1} = 0$. Hence, considering the definition of λ , we conclude that $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = 0$ onto Ω_1 . Consequently, the set defined by $(\tilde{z} = 0, \theta = 0)$ is the unique invariant set of Ω_1 . We conclude that the control described in (8) ensures that every system trajectory converges to the set where $(\tilde{z} = 0, \theta = 0)$. A simple manipulation of the kinematic equations shows that Eqs. (6) and (7) realize control (8). $\square$

Expression (7) might appear complex for a kinematic control. In fact, designing a kinematic control for a dynamic system such an AUV does not make much sense. As we have already noted (Lapiere et al., 2003), the kinematic design injects dynamics into the process. This is why the control expression (7) contains an integral. As we will see in the sequel, the design of the dynamic control is much simpler, but relies on the previously stated results.

3.2. Dynamic control design

The next proposition suggests a solution to problem **C**₂.

Proposition 2. Consider the AUV kinematic and dynamic equations given by (1) and (2), propelled with the parameters of Eq. (3). Let z_d be the desired depth the vehicle has to reach with a null pitch angle and λ and λ_t the two guidance functions defined by Eqs. (4) and (5), where k^A, k_t^A are positive gains, $0 < \lambda^A < \pi/2, 0 < \lambda_t^A < \pi/2$ are the positive maximum values of the guided variables and $\tilde{z} = z - z_d$ is the depth error. The dynamic control is then defined as follows:

$$\begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} F_w^{CONT} \\ F_q^{CONT} \end{bmatrix} \quad (9)$$

where

$$A = u^2 \begin{bmatrix} Z_{uu\delta_b} & Z_{uu\delta_s} \\ M_{uu\delta_b} & M_{uu\delta_s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

and

$$\begin{aligned} F_w^{CONT} &= m_w \dot{w}^{CONT} + m_{uq} u q + d_w \\ F_q^{CONT} &= m_q \dot{q}^{CONT} + m_{pq} p q + d_q \end{aligned} \quad (11)$$

where

$$\begin{aligned} \dot{w}^{CONT} &= \frac{-(v_t^v)^2 \dot{\alpha}^{REF} + w(X_{prop} - d_u)/m_u}{u} \\ \dot{q}^{CONT} &= \dot{q}^{REF} - k_q(q - q^{REF}) \end{aligned} \quad (12)$$

and

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}^{REF} &= \dot{\lambda}_t - \dot{\theta}^{REF} - k_w(\theta_t - \lambda_t) \\ q^{REF} &= \frac{(\dot{\theta}^{REF} + r \sin \phi)}{\cos \phi} \\ \dot{\theta}^{REF} &= \dot{\lambda} - k_\theta(\theta - \lambda) \end{aligned} \quad (13)$$

where k_θ, k_q and k_w are positive gains that solves problem **C**₂.

Proof of Proposition 2. Consider the expressions of Eq. (8) as a reference to drive the dynamic AUV model. These references are also reported in (13). Consider the Lyapunov candidate $V_3 = \frac{1}{2}(q - q^{REF})^2 + \frac{1}{2}(\theta_t - \lambda_t)^2$. Clearly the choice of the acceleration profile:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \dot{q}^{REF} - k_q(q - q^{REF}) \\ \dot{\alpha} &= \dot{\lambda}_t - \dot{\theta} - k_w(\theta_t - \lambda_t) \end{aligned}$$

yields $\dot{V}_3(t) = -k_q(q - q^{REF})^2 - k_w(\theta_t - \lambda_t)^2 \leq 0$, for all t . Considering the dynamic model (2), the application of the force and torque expressed in (11) realize the previous acceleration profile. One step further consists in taking into account the (simple) actuation model and results in the expression of the fin control in (9). Since V_3 is a positive, monotonically decreasing function, $\lim_{t \rightarrow \infty} V_3(t)$ exists. Showing that $\dot{V}_3$ is bounded is trivial, and an application of Barbalat's Lemma allows for stating that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_3 = 0$. Then, the system trajectories asymptotically converge to an invariant set Ω_2 defined as $\Omega_2 := \{(q, \theta_t) \in \mathbb{R}^2 / q = q^{REF}, \theta_t = \lambda_t\}$. Let us now study the system trajectories onto the Ω_2 set. Since $q|_{\Omega_2} = q^{REF}$,

$\dot{\theta}|_{\Omega_2} = \dot{\lambda} - k_\theta(\theta - \lambda)$. The consideration Lyapunov candidate $V_4 = \frac{1}{2}(\theta - \lambda)^2$ onto the Ω_2 set allows for the conclusion that the evolution of θ is asymptotically and uniformly converging to an invariant subset of Ω_2 , that is Ω_1 itself. Considering the system convergence properties onto the set Ω_1 stated in the previous proof, the application of LaSalle's Theorem allows for the conclusion that $\dot{z}$ and θ are asymptotically and uniformly converging to zero. $\square$

Expression (9) drives the dynamic model of the AUV to a desired depth, controlling the pitch angle with the guidance function λ . This control expression implies a perfect knowledge of the system parameters which is impossible to reach. The next section proposes the design of an adaptive scheme that preserves the asymptotic and uniform convergence requirement, despite parameter misestimation.

3.3. Robust adaptive control design

The following proposition suggests a solution to problem C_3 .

Proposition 3. Consider the AUV kinematic and dynamic equations given by (1) and (2), propelled with the parameters of Eq. (3). Let $\hat{X}_\cdot, \hat{Z}_\cdot, \hat{M}_\cdot, \hat{I}_\cdot, \hat{z}_g, \hat{z}_b, \hat{m}ass$ and $\hat{b}uoy$ be a set of estimated parameters. And let z_d be the desired depth the system has to reach with a null pitch angle. Then, the following control expression solves problem C_3 .

$$\begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} F_w^{CONT} \\ F_q^{CONT} \end{bmatrix}$$

where A is expressed in Eq. (10), and

$$\begin{aligned} F_q^{CONT} &= \sum_{i=1}^7 f_i p_i \\ F_w^{CONT} &= \sum_{j=1}^8 g_j q_j \end{aligned} \quad (14)$$

with

$$\begin{aligned} g_1 &= \dot{w}^{CONT}, \quad f_1 = \dot{q}^{CONT} \\ g_2 &= \cos \theta \cos \phi, \quad f_2 = -u w \\ g_3 &= v p, \quad f_3 = p r \\ g_4 &= -u q, \quad f_4 = w q - v r \\ g_5 &= -(p^2 + q^2), \quad f_5 = \sin \theta \\ g_6 &= w|w|, \quad f_6 = q|q| \\ g_7 &= u w, \quad f_7 = u q \\ g_8 &= u q \end{aligned} \quad (15)$$

and

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= -k_i^p (q - q^{REF}) f_i, \quad i = 1, \dots, 7 \\ \dot{q}_j &= -k_j^q (\theta_t - \lambda_t) \frac{u}{(v^v)^2} g_j, \quad j = 1, \dots, 8 \end{aligned} \quad (16)$$

considering the following parameter initial value:

$$\begin{aligned} q_1^0 &= \hat{m}ass - \hat{Z}_{\dot{w}}, \quad p_1^0 = \hat{I}_{yy} - \hat{M}_{\dot{q}} \\ q_2^0 &= -(\hat{m}ass - \hat{b}uoy)g, \quad p_2^0 = \hat{M}_{uw} \\ q_3^0 &= \hat{m}ass, \quad p_3^0 = \hat{I}_{zz} \\ q_4^0 &= \hat{m}ass, \quad p_4^0 = \hat{z}_g \hat{m}ass \\ q_5^0 &= \hat{z}_g \hat{m}ass, \quad p_5^0 = (\hat{z}_g \hat{m}ass - \hat{z}_b \hat{b}uoy)g \\ q_6^0 &= -\hat{Z}_{ww}, \quad p_6^0 = -\hat{M}_{qq} \\ q_7^0 &= -\hat{Z}_{uw}, \quad p_7^0 = -\hat{M}_{uq} \\ q_8^0 &= -\hat{Z}_{uq} \end{aligned} \quad (17)$$

where $k_\theta, k_q, k_w, k_i^p$ and k_j^q , with $i = 1, \dots, 7$ and $j = 1, \dots, 8$, are positive gains. The expression of $\dot{q}^{CONT}$ and $\dot{w}^{CONT}$ can be obtained from Eq. (12).

Note that the parameter adaptation does not concern the actuation model. Considering the simplicity of the considered actuation model, the adaptation of its parameters is not significant. To avoid coupling expressions of the controlled torque and force, we have decided to remove the fin parameters from the adaptation scheme. Note that the distribution of signs between p_i and f_i and between q_j and g_j has been carried out in order to guarantee the positiveness of parameters p_i and q_i .

Proof of Proposition 3. Consider the expressions of the controlled force and torque in (11). These expressions are rewritten using in (14). The functions g_j and f_i are written in (15). The values of parameters p_i and q_j can be found in (17). Note that the two expressions (11) and (14) are equivalent if the parameters q_j and p_i are constant and computed with the real dynamic parameter values of Table 1 (see Appendix A). Let us call this optimal evaluation p_i^{opt} and q_j^{opt} and note that these values are positive (cf. the comment at the end of the statement of Proposition 3). Consider now that the evaluation of parameters q_j and p_i is made with estimated values of the Taipan 2 parameters. Let $\tilde{p}_i = p_i - p_i^{opt}$ and $\tilde{q}_j = q_j - q_j^{opt}$ be the estimation errors. The application of $F_q^{opt} = \sum_{i=1}^7 p_i^{opt} f_i$ and $F_w^{opt} = \sum_{j=1}^8 q_j^{opt} g_j$ guarantees the asymptotic convergence of the system, as seen previously. But, the application of $F_q^{CONT} = \sum_{i=1}^7 p_i f_i$ and $F_w^{CONT} = \sum_{j=1}^8 q_j g_j$ induces a nonnegative $\dot{V}_3$ Lyapunov derivative:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -k_q(q - q^{REF})^2 + (q - q^{REF}) \left(\sum_{i=1}^7 \frac{\tilde{p}_i f_i}{p_i^{opt}} \right) \\ &\quad - k_w(\theta_t - \lambda_t)^2 + (\theta_t - \lambda_t) \left(\sum_{j=1}^8 \frac{\tilde{q}_j g_j}{q_j^{opt}} \frac{u}{(v^v)^2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Let V_5 be another Lyapunov candidate.

$$V_5 = V_3 + \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^7 \frac{1}{k_i^p} \frac{(\tilde{p}_i)^2}{p_i^{opt}} + \sum_{j=1}^8 \frac{1}{k_j^q} \frac{(\tilde{q}_j)^2}{q_j^{opt}} \right] \quad (19)$$

Note that p_i^{opt} and q_j^{opt} are constant and positive, hence V_5 is positive definite, $\tilde{p}_i = p_i$ and $\tilde{q}_j = q_j$. Then, the adaptation scheme (16) yields $\dot{V}_5 = \dot{V}_3 \leq 0$. The convergence proof follows the same idea as that used in the previous proof. $\square$

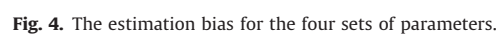
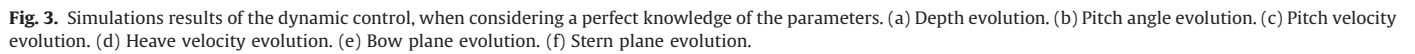
The definition of p_i, f_i, q_j and g_j guarantee the positivity of the parameters p_i and q_j . It is necessary to ensure that the Lyapunov function V_5 is positive definite. This requires a previous knowledge of the parameters' signs. This is generally the case, but not always. Moreover, as simulation results will show, the previous solution analysis is incomplete. Indeed, nothing in the considered Lyapunov function prevents the parameter adaptation evolution to diverge despite the fact that the global convergence is mathematically guaranteed.

The next solution proposes a robust control design based on switching-system theory that does not require adaptation.

3.4. Robust switching control design

The following proposition suggests a solution to problem C_4 .

Proposition 4. Consider the AUV kinematic and dynamic equations given by (1) and (2), propelled with the parameters of Eq. (3). Consider a set of estimated parameters, guaranteed to overestimate their respective real value $\hat{X}_\cdot, \hat{Z}_\cdot, \hat{M}_\cdot, \hat{I}_\cdot, \hat{z}_g, \hat{z}_b, \hat{m}ass$ and $\hat{b}uoy$, and set of underestimated parameters $\underline{X}_\cdot, \underline{Z}_\cdot, \underline{M}_\cdot, \underline{I}_\cdot, \underline{z}_g, \underline{z}_b, \underline{m}ass$ and $\underline{b}uoy$. Let z_d be the desired depth the system has to reach with a null pitch



angle. Then, the following control scheme solves problem **C4**:

$$\begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} F_w^{\text{CONT}} \\ \Gamma_q^{\text{CONT}} \end{bmatrix}$$

where A is expressed in Eq. (10), and

$$\begin{aligned} \Gamma_q^{\text{CONT}} &= \sum_{i=1}^7 f_i p_i \\ F_w^{\text{CONT}} &= \sum_{j=1}^8 g_j q_j \end{aligned} \quad (20)$$

where the functions f_i and g_j are defined in (15). Parameters $\bar{p}_i$, $\bar{g}_j$ and $\underline{p}_i$, $\underline{g}_j$ are computed with their respective overestimated and underestimated parameters, in order to ensure that $\bar{p}_i = \bar{p}_i - p_i^{\text{opt}} > 0$, $\bar{q}_j = \bar{q}_j - q_j^{\text{opt}} > 0$, $\underline{p}_i = \underline{p}_i - p_i^{\text{opt}} < 0$ and $\underline{q}_j = \underline{q}_j - q_j^{\text{opt}} < 0$. And consider the following switching scheme:

$$\begin{aligned} \text{if } (q - q^{\text{REF}})f_i \geq 0 \quad \text{then } p_i &= \underline{p}_i \quad \text{else } p_i = \bar{p}_i, \quad i = 1, \dots, 7 \\ \text{if } (\theta_t - \lambda_t)g_j \geq 0 \quad \text{then } q_j &= \underline{q}_j \quad \text{else } q_j = \bar{q}_j, \quad j = 1, \dots, 8 \end{aligned} \quad (21)$$

Sketch of proof for Proposition 4. Consider the Lyapunov derivative function $\dot{V}_3$ of Eq. (18). A possible solution to ensure the negativity of this function is to choose the sign of $\bar{p}_i$ and $\bar{q}_j$. The switching scheme (21) plays this role. But this time the proof cannot rely on Barbalat's Lemma, because of the discontinuity of the control signal (we cannot prove that $\dot{V}_3$ is bounded). The proof is based on the switching system theory exposed in Hespanha et al. (1999) and Liberzon (2001). It is based on a geometrical analysis of the convergence of the discontinuous Lyapunov candidate, V_3 in our case. V_3 consists in a piecewise union of uniform and asymptotically convergent Lyapunov functions. Each function contributes to the convergence of the system. The problematic point is the impact of the switching on the global convergence property: the switch should not imply a jump in the evolution of the function that affects the convergence.

In our situation, since $V_3(t_{\text{sw}}^-) = V_3(t_{\text{sw}}^+)$, where t_{sw} is the instant when the switching occurs, the global convergence criterion is respected. But a situation where an infinite switching occurs, for example around the zeros of the switching conditions $(q - q^{\text{REF}})f_i$ and $(\theta_t - \lambda_t)g_j$, must be taken into account. Since there is no system able to follow this kind of behavior, convergence toward the origin cannot be guaranteed. One way to tackle this problem could be to consider the maximum switching delay (dwell time) necessary for the system, and evaluate the worst possible system reaction during this period. This would allow the definition of a zone around the desired references that the system is guaranteed to reach. However the overlapping convergence of the different references would have to be proved. This warrants further research.

The next section presents simulation results to illustrate the performances of the proposed solutions.

4. Simulation results

A C++ simulator based on the Taipan 2 dynamic model (cf. Table 1) has been developed. We present in the sequel simulation results to illustrate the performances of the proposed control law. We are assuming that the sensors provides an estimation of the states of the system with a period of 100 ms. Measurement noise is not considered in the theoretical framework. Nevertheless, some simulations include noisy measurements to illustrate the limits of the proposed methods. We consider that the rolling dynamics are compensated by a static stabilization (i.e. a differential offset of the rudder planes: $\delta_r^u p = 0.06$ and $\delta_r^u p = -0.06$ rad). The desired depth is set to $z_d = 10.0$ m.

During the simulations, the fin amplitude has been limited to $\pm 30^\circ$ to mimic the behavior of Taipan 2. The simulation results can be found in Appendix A. The performances displayed in these figures have to be qualitatively considered.

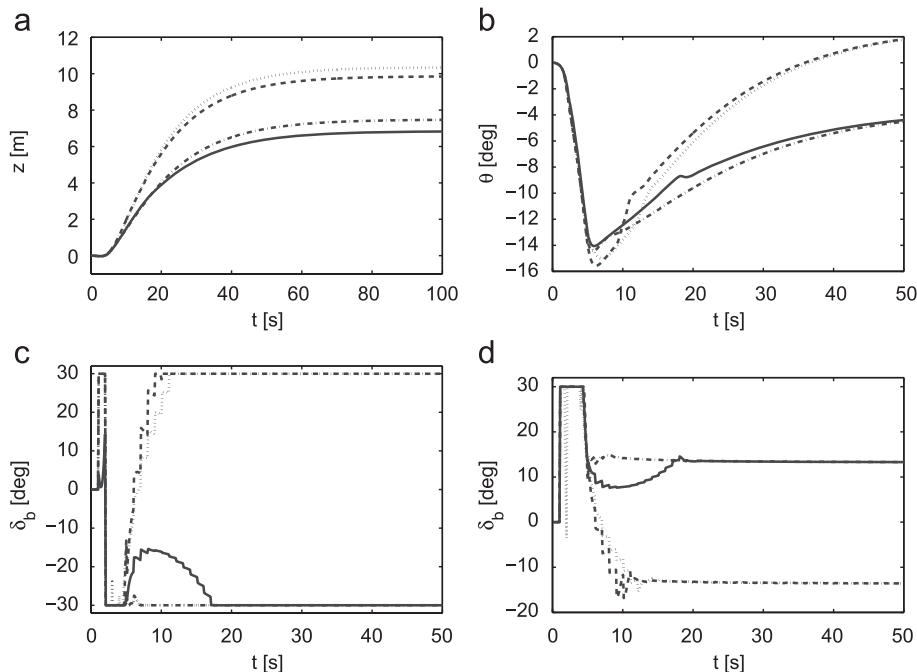


Fig. 5. Simulation results of the dynamic control, using four misestimated sets of parameters. (a) Depth evolution. (b) Pitch angle evolution. (c) Bow plane evolution. (d) Stern plane evolution.

4.1. Dynamic controller

The equations related to Proposition 3 have been implemented in the simulator. Recall that this solution assumes a perfect knowledge of the dynamic parameters. The control gains and parameters used for this simulation are given in Table 2. The simulations results are displayed in Figs. 3a–f, reported in Appendix A.

These simulations were carried out considering three different λ guidance functions. As expected, the convergence rate depends on the guidance amplitude λ^A (cf. Figs. 3a and b). The evolution of w (Fig. 3d) and q (Fig. 3c) velocities clearly shows the stabilization of the system at the desired reference. Figs. 3e and f indicate the

difference of strategy in the evolution of the control surfaces. In the case where diving with a constant null pitch is required (solid lines) the bow and stern control surfaces are positioned in a different direction than that resulting of the nonnull pitch control (dashed and dotted lines). Recall that these results have been obtained by supposing a perfect knowledge of the system parameters.

To illustrate the performances of the following robust controllers, we carried out simulations considering four different sets of misestimated parameters. These parameters were randomly estimated using the matlab function $\hat{X} = X + 2 * X * (rand - 0.5)$ for the positive estimation bias, and $\hat{X} = X + X * (rand - 0.5)$ for the negative estimation bias, where X represents

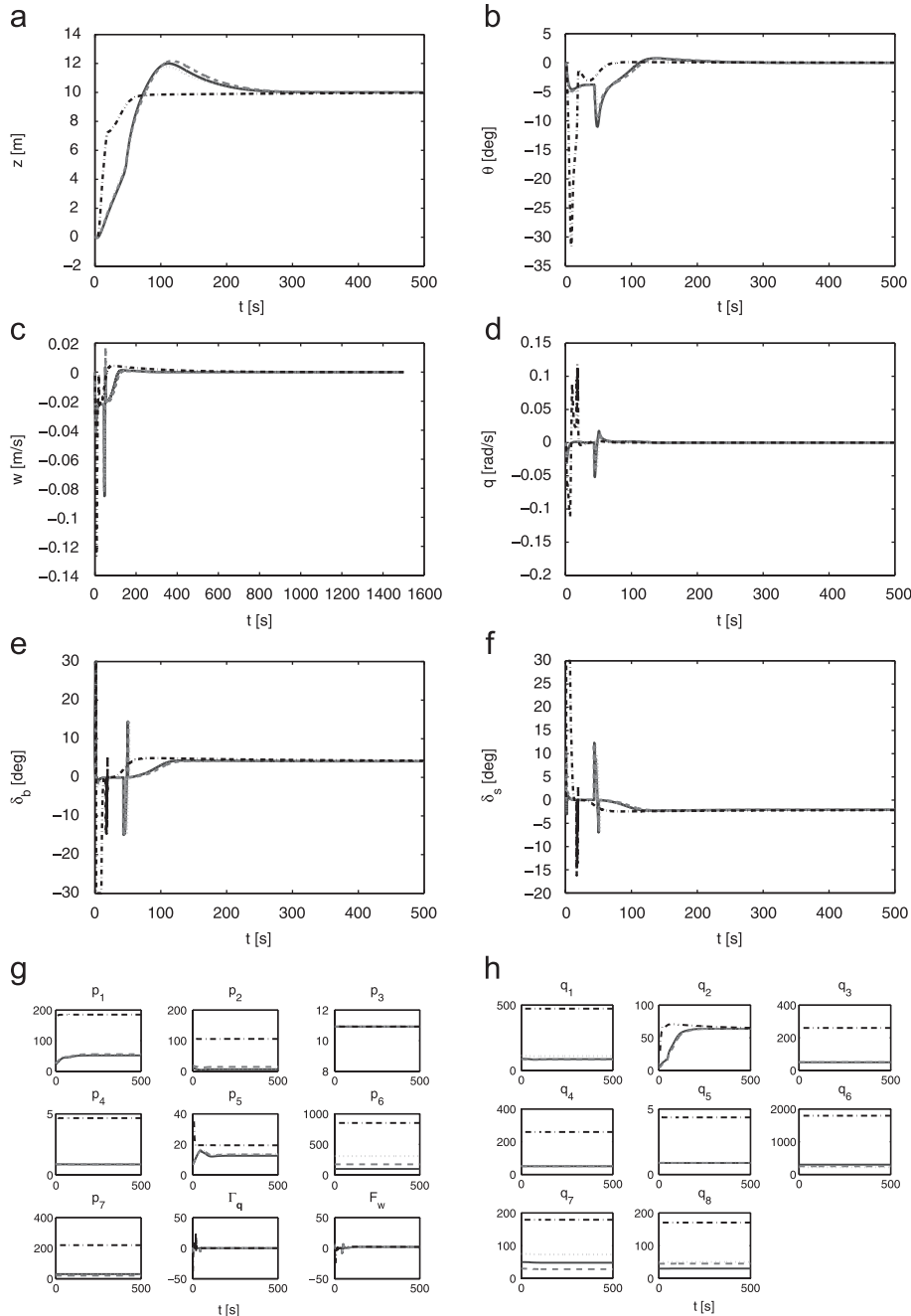


Fig. 6. Simulation results of the adaptive dynamic control, using four misestimated sets of parameters. (a) Depth evolution. (b) Pitch angle evolution. (c) Heave velocity evolution. (d) Pitch velocity evolution. (e) Bow plane evolution. (f) Stern plane evolution. (g) Parameters p_i adaptation evolution. (h) Parameters q_j adaptation evolution.

the real parameter value. This results in a reasonable estimation error, where the estimated parameters are included between twice and half the real parameter value. Some of the parameters (mass, buoy, moments of inertia) can be estimated with a high degree of accuracy. A smaller estimation deviation has been applied to these. The parameter estimation bias is displayed in Fig. 4.

Figs. 5a–d (displayed in Appendix A) show the convergence problem created by this misestimation. In this case, the system cannot clearly achieve the convergence. Another phenomenon must be considered. The effect of saturation on the fins makes the system converge to a local minimum. This problem will not be explicitly studied in this paper. But, as we will see in the sequel, the adaptive or robust switching scheme avoids this problem.

4.2. Adaptive controller

We have implemented the adaptive controller solution using the four sets of misestimated parameters. The adaptation gains have been chosen according to $k_i^p = k_j^q = 20$, $i = 1, \dots$,

$7, j = 1, \dots, 8$. The results are displayed in Figs. 6a–h, reported in Appendix A. These results show similar performances for the four sets of parameters. Effectively, Figs. 6e and f indicate the same control plane evolution regardless of the initial value of the estimated parameters. Studying the results of the evolution of the parameter adaptation in Figs. 6g and h shows that, as expected, the parameter estimations do not converge to their respective real values. This is a known behavior of this type of adaptive Lyapunov-based controller. Indeed, the Lyapunov function derivative $\dot{V}_5 = \frac{1}{2}(q - q^{REF})^2 + \frac{1}{2}(\theta_t - \lambda_t)^2$ does not contain any term related to the evolution of the parameter-adaptation to any static value. Nevertheless, Figs. 6g and h show the parameter convergence. This convergence is achieved for $q - q^{REF} = 0$ and $\theta_t - \lambda_t = 0$, that is, when guidance error is null.

To illustrate the efficiency and the limitations of this controller, we proceed to another simulation without considering any parameter value. The initial value of the parameter groups appearing in controllers p_i and q_j were set to 1. This is equivalent to consider the system without any parameter estimation. Moreover, the desired depth reference has been chosen as $z_d = 10, 20$,

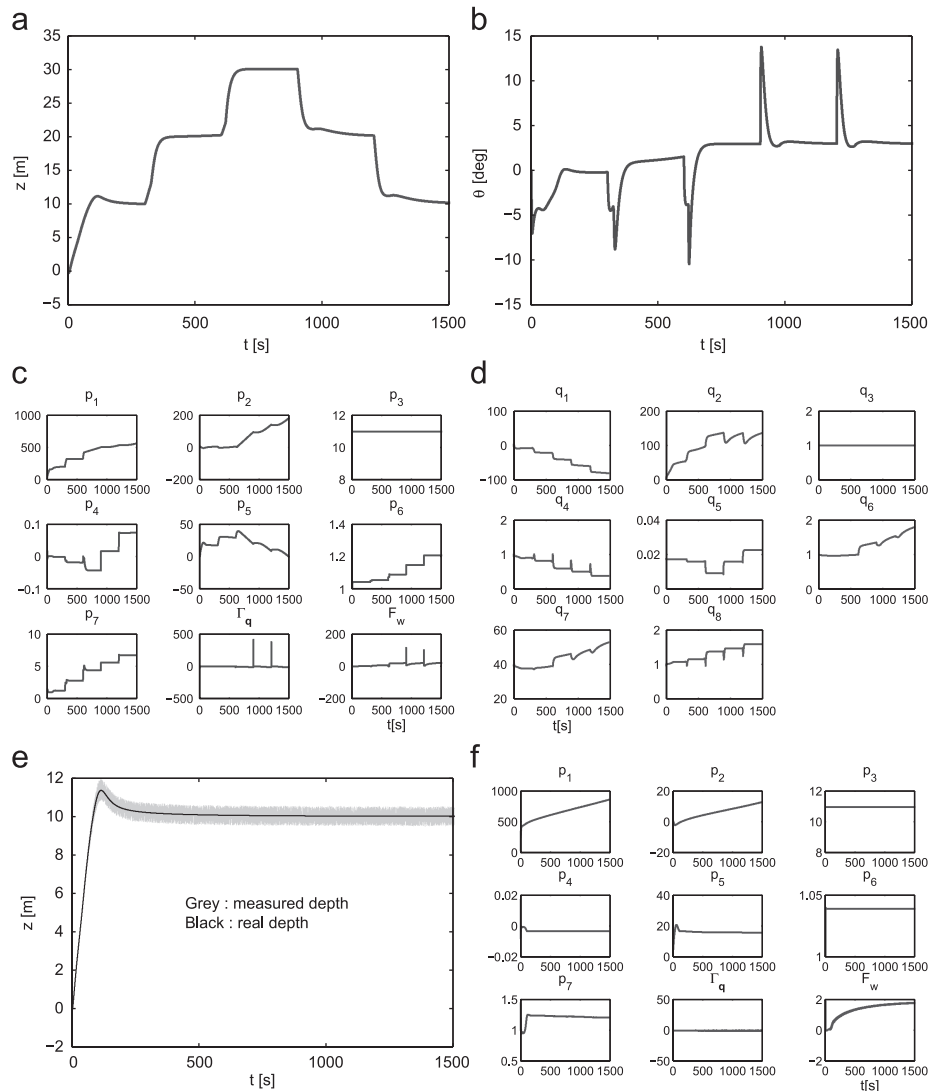


Fig. 7. Simulation results of the adaptive control, showing an unbounded behavior of the parameters adaptation, with a nonautonomous reference z_d (a–d) and with measurement noise (e and f). (a) Depth evolution. (b) Pitch angle evolution. (c) Parameters p_i adaptation evolution. (d) Parameters q_j adaptation evolution. (e) Depth evolution. (f) Evolution of parameters p_i .

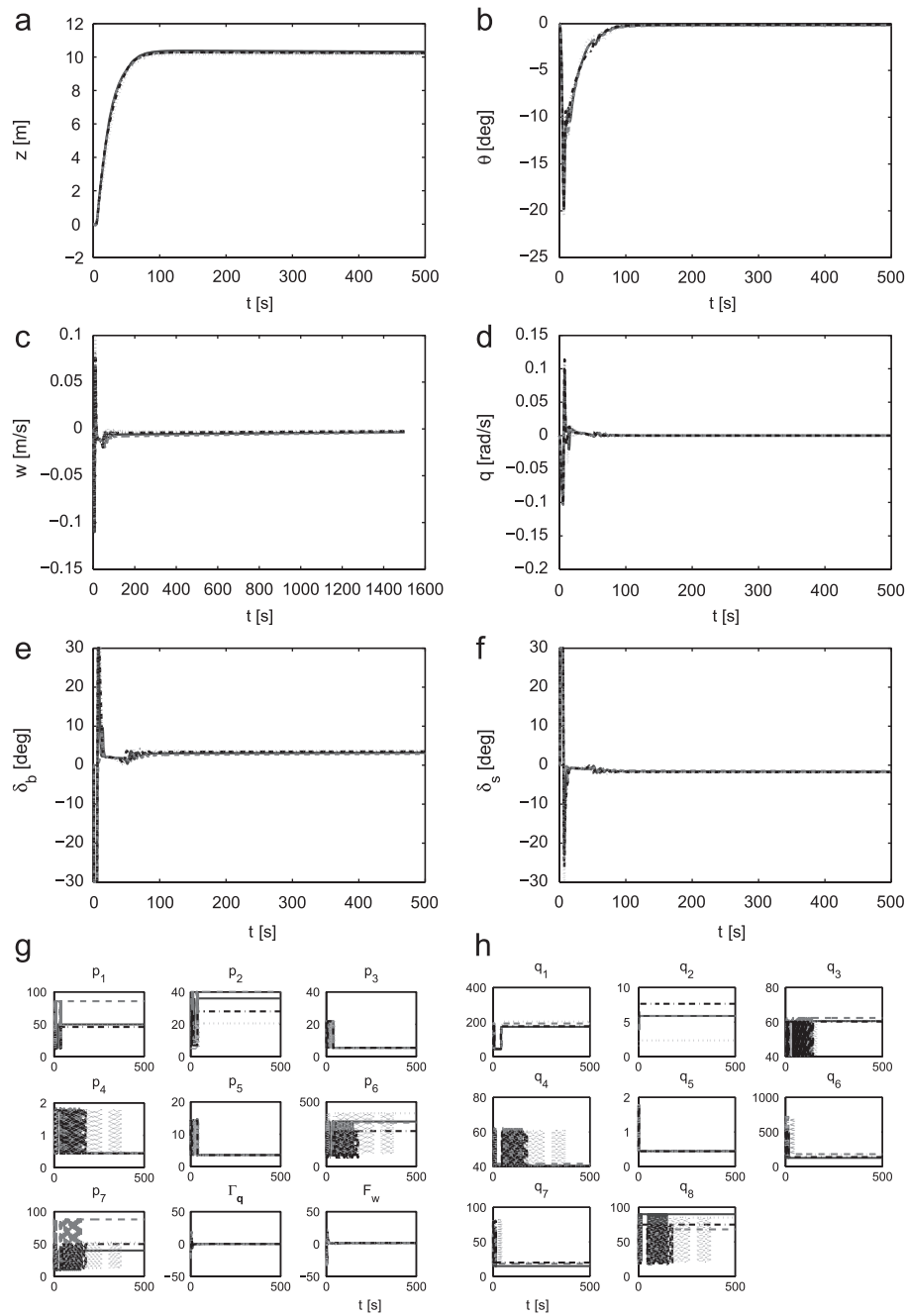


Fig. 8. Simulation results of the switching control. (a) Depth evolution. (b) Pitch angle evolution. (c) Heave velocity evolution. (d) Pitch velocity evolution. (e) Bow plane evolution. (f) Stern plane evolution. (g) Parameters p_i adaptation evolution. (h) Parameters q_j adaptation evolution.

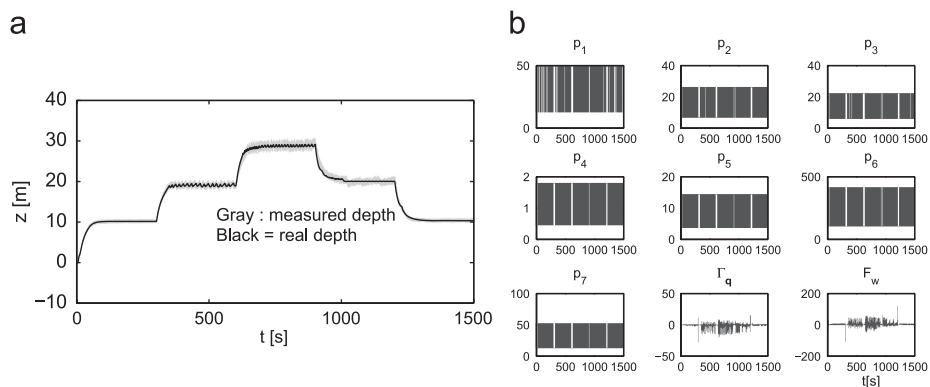


Fig. 9. Simulation results of the switching control, in presence of the measurement noise and using a nonautonomous reference z_d . (a) Depth evolution. (b) Evolution of parameters q_j .

30, 20 and 10 m. This choice was made to focus on the main drawback of this method, which is, nothing prevents the adaptation evolution of the parameters reaching an unbounded value, which is problematic since this parameter value is required in the control computation. The results are displayed in Appendix A.

The results of Figs. 7a and b display good system behavior, despite the initial unitary parameter value. Nevertheless, adaptation evolution of the parameters in Figs. 7c and d indicates an unbounded evolution of parameters p_1 , p_2 and q_2 . The cause of this can be found in the expression of the adaptation scheme of parameter $\dot{p}_1$. Clearly, this expression includes a term of the form $k_p^1 k_q (q - q^{REF})^2$. That is, the presence of an error in the guidance following will result in a monotonic increase in the p_1 parameter value. In order to demonstrate this undesired behavior in the presence of measurement noise, we carried out a test using noisy measurements of z and θ , with a desired depth $z_d = 10$ m. Figs. 7e and f, displayed in Appendix A, illustrate this behavior. While the system is converging to the desired depth, the value of parameter p_1 is constantly increasing.

From the analysis of the expression of the Lyapunov function V_5 we can deduce that there is no guarantee for the parameters evolution to be bounded. Moreover, under these conditions, the effect of measurement noise could also lead to some unbounded behavior. Another choice for this Lyapunov function may solve this problem.

The next section illustrates the performances of a switching-based robust control that avoids this drawback.

4.3. Robust switching controller

To validate the performances of this controller, we considered the four previous sets of estimated parameters. We doubled the value of each to produce the overestimated set, and halved the value to obtain the underestimated set. An exception concerns parameters q_2 , q_3 and q_4 , for which the upper value was produced by multiplying the estimated value by 1.2, and by 0.8 for the lower value. This is justified by the fact that the related values *mass* and *buoy* can be accurately estimated. Moreover, from the control point of view, doubling (or halving) these parameters induces a huge and undesired system reaction. The results are reported in Appendix A.

Figs. 8a and b show a good system reaction, clearly converging to the references. Nevertheless, results show a small static error. This error must be compared with the simulation results in Figs. 5a and b, to evaluate the improvement. It is caused by noncentered estimation bias, and is a function of the system dwell time. The theoretical evaluation of this static error could be an interesting study.

Velocity stabilization is shown in Figs. 8c and d. Fin action is displayed in Figs. 8e and f. The switching evolution of the parameter values are displayed in Figs. 8g and h.

Finally, in order to show that the drawbacks of the previous solution are avoided, we carried out a simulation with measurement noise, and considered a varying depth reference $z_d = 10, 20, 30, 20$ and 10 m. These results are not provided to prove any performances related to measurement-noise rejection, but simply to show that the presence of such noise does not lead to system instability. Fig. 9a, reported in Appendix A, shows the system converging toward the reference, with the expected chattering behavior. This kind of behavior could be reduced by filtering the orders sent to the controlled surfaces, or by using the same strategy as that employed in high-order sliding-mode control. Note in Fig. 9b that the presence of measurement noise implies a maximum switching rate (theoretically infinite) of the parameter

values. In this situation an explicit study of the dwell-time effect could allow the quantification of system performances. Note the similarity of this switching solution to the sliding-mode approach. In both solutions, the switching effect is used to obtain robustness. The study of this analogy will be an interesting subject for further research.

5. Conclusion

The goal of this paper is to accurately control the depth of an AUV in the presence of parametric modeling uncertainty. First a dynamic diving controller was used, assuming a perfect knowledge of the dynamic parameters. Then, an adaptive scheme was designed to obtain the desired robustness. Simulations extended the theoretical results and led to consider a unitary initial parameter value. In this situation, the desired convergence is achieved despite the large parameter misestimation. Moreover, internal stability problems concerning parameter evolution have been identified and analyzed. Indeed, the presence of measurement noise induces a monotonic drift in the evolution of some parameters. This undesired behavior prevents the implementation of this solution to a real system. Therefore, we proposed another robust scheme based on switching-system theory. We have shown that this switching-control method is implementable and preserves robustness.

Appendix A

A.1. The coefficients of the Taipan 2 vertical plane dynamic model

The hydrodynamic coefficients of the Taipan 2 AUV is presented in Table 1.

The control parameters used for the dynamic control simulation are presented in Table 2.

Table 1

The hydrodynamic dimensional coefficients of the Taipan 2 AUV.

Dimensioned hydrodynamic vertical plane coefficients of the Taipan 2 AUV		
X	Z	M
$X_{uu} = -4.00 \text{ kg m}^{-1}$	$Z_{uw} = -40.750 \text{ kg m}^{-1}$	$M_{uq} = -34.192 \text{ kg m rad}^{-1}$
$X_{\dot{u}} = -5.070 \text{ kg}$	$Z_{ww} = -350.00 \text{ kg m}^{-1}$	$M_{uw} = 10.280 \text{ kg}$
	$Z_w = -50.700 \text{ kg}$	
	$Z_{uq} = -37.327 \text{ kg rad}^{-1}$	$M_{qq} = -200.00 \text{ kg m}^2 \text{ rad}^{-2}$
		$M_q = -18.020 \text{ kg m}^2 \text{ rad}^{-1}$
	$Z_{uu\dot{\delta}_s} = 4.4913 \text{ kg m}^{-1} \text{ rad}^{-1}$	$M_{uu\dot{\delta}_s} = -8.4729 \text{ kg rad}^{-1}$
	$Z_{uu\dot{\delta}_s} = -4.4913 \text{ kg m}^{-1} \text{ rad}^{-1}$	$M_{uu\dot{\delta}_s} = -16.874 \text{ kg rad}^{-1}$
$z_g = 0.01757 \text{ m}$	$mass = 50.7 \text{ kg}$	$I_{yy} = 10.900 \text{ kg m}^2$
$z_b = 0.00316 \text{ m}$	$buoy = 50.9 \text{ kg}$	$g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$

Table 2

The control parameters used for the dynamic control simulation.

Parameter values of the dynamic control simulation		
$k_\theta = 1$ $k_q = 1$	$k_w = 1$ $k^A = 0.1$	$k_t^A = 0.1$ $z_d = 10 \text{ m}$.
solid line (deg.)	dashed line (deg.)	dotted line (deg.)
$\lambda^A = 0.0$	$\lambda^A = -10.0$	$\lambda^A = -20.0$
$\lambda_t^A = -2.0$	$\lambda_t^A = -2.0$	$\lambda_t^A = -2.0$

References

- Aucher M., 1981. Dynamique des sous-marins. Internal Report of the Science et technique de l'armement institution.
- Batchelor, G., 1967. An Introduction to Fluid Dynamics, first ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fossen, T., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. Wiley, NY, USA.
- Healey, A., Lienard, D., 1993. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 18 (3), 327–339.
- Hespanha, J., Liberzon, D., Morse, A., 1999. Logic based switching control of a non-holonomic system with parametric modeling uncertainties. *System and Control Letters, Special Issue on Hybrid Systems* 38 (3), 167–177.
- Ji-Hong, L., Pan-Mook, L., 2005. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle. *Oceanic Engineering* 32, 2165–2181.
- Khalil, H., 2002. Nonlinear Systems. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Kim, M., 2000. Nonlinear control and robust observer design for marine vehicles. Ph.D Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, November 3.
- Krstic, M., Kanellakopoulos, I., Kokotovic, P., 1995. Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley, NY, USA.
- Lapierre, L., Soetanto, D., Pascoal, A., 2003. Non-linear path-following control of an AUV. In: Proceedings of the Guidance and Control of Underwater Vehicle (GCUV) Conference, Newport, South Wales, UK, April.
- Lewis, E., 1988. Principles of naval architecture. In: Vol. I: Stability and Strength, 1988. Vol. II: Resistance, Propulsion and Vibration, 1988. Vol. III: Motions in Waves and Controllability, 1989. Edition of the Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), New York, USA.
- Liberzon, D., 2001. Control using logic and switching, part 1: switching in systems and control. In: Handout notes. CDC'01 Workshop, September 4–7. URL: <http://black.csl.uiuc.edu/~liberzon/>.
- Naeem, W., 2002. Model predictive control of an autonomous underwater vehicle. In: Proceedings of UKACC 2002 Postgraduate Symposium, Sheffield, UK, September, pp. 19–23.
- Naeem, W., Sutton R., Ahmad S., Burns R., 2002. A review of guidance laws applicable to unmanned underwater vehicles. In: Reports of the Marine and Industrial Dynamic Analysis Group. URL: www.cranfield.ac.uk/sims/marine/research/guidance.pdf.
- Naeem, W., Sutton, R., Ahmad, S., 2004. Pure pursuit guidance and model predictive control of an autonomous underwater vehicle for cable/pipeline tracking. *IMarEST Journal of Marine Science and Environment, Part C* (1) 15–25.
- Newman, J., 1977. Marine Hydrodynamics, first ed. MIT Press, Cambridge.
- Ogren, P., Fiorelli, E., Leonard, N., 2004. Cooperative control of mobile sensor networks: adaptive gradient climbing in a distributed environment. *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (8), 1292–1302.
- Porfiri, M., Gray Roberson, D., Stilwell, D., 2007. Tracking and formation control of multiple autonomous agents: a two-level consensus approach. *IFAC Journal Automatica* 43 (8), 1318–1328.
- Prestero, T., 2001. Verification of a six degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Master Thesis in Mechanical Engineering, MIT.
- Salgado-Jimenez, T., Spiewak, J.M., Fraise, P., Jouvencel, B., 2004. A robust control algorithm for AUV: based on a high order sliding mode. In: Proceedings of the MTS/IEEE International Conference, OCEANS'04, Kobe, Japan, November 9–12, 2004, pp. 276–281.
- Samson, C., Ait-Abderrahim, K., 1991. Mobile robot control part 1: feedback control of a nonholonomic mobile robot. Technical Report No. 1281, INRIA, Sophia Antipolis, France, June.
- Sepulchre, R., Jankovic, M., Kokotovic, P., 1997. Constructive Nonlinear Control. Springer, Berlin.
- Silvestre, C., Pascoal, A., Kaminer, I., 2002. On the design of gain-scheduled trajectory tracking controllers. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 12, 797–839.
- Slotine, J., Li, W., 1991. Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall, NJ, USA.
- SNAME, 1964. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical and Research Bulletin nos. 1–5 of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, USA.
- Soetanto, D., Lapierre, L., Pascoal, A., 2003. Adaptive, non-singular path following control of a wheeled robot. In: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Maui, Hawaii, USA, December.
- Song, F., Smith, S., 2000. Design of sliding mode fuzzy controllers for an autonomous underwater vehicle without system model. In: Proceedings of the MTS/IEEE Conference OCEANS'2000 MTS/IEEE, pp. 835–840.
- Stilwell, D., Bishop, B., 2000. Platoons of underwater vehicles. *IEEE Control Systems Magazine* 20 (6), 45–52.
- Zhang, F., Fratantoni, D., Paley, D., Lund, J., Leonard, E., 2007. Control of coordinated patterns for ocean sampling. *International Journal of Control* 80 (7), 1186–1199.

Author's Accepted Manuscript

Nonlinear path-following control of an AUV

Lionel Lapierre, Didik Soetanto

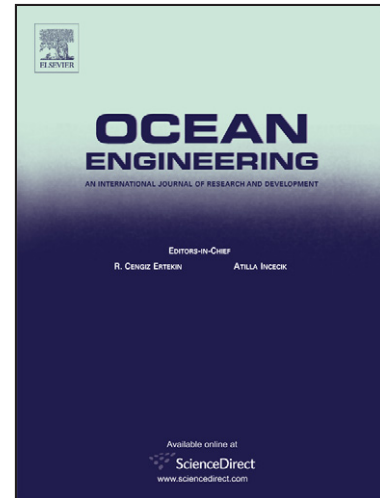
PII: S0029-8018(07)00040-6
DOI: doi:10.1016/j.oceaneng.2006.10.019
Reference: OE 1325

To appear in: *Ocean Engineering*

Received date: 16 January 2006
Revised date: 10 May 2006
Accepted date: 4 October 2006

Cite this article as: Lionel Lapierre and Didik Soetanto, Nonlinear path-following control of an AUV, *Ocean Engineering* (2007), doi:10.1016/j.oceaneng.2006.10.019

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting galley proof before it is published in its final citable form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.



www.elsevier.com/locate/oceaneng

Nonlinear Path-Following Control of an AUV

Lionel Lapierre*, Didik Soetanto

Abstract

A new type of control law is developed to steer an autonomous underwater vehicle (AUV) along a desired path. The methodology adopted for path-following deals explicitly with vehicle dynamics. Furthermore, it overcomes stringent initial condition constraints that are present in a number of path-following control strategies described in the literature. Controller design builds on Lyapunov theory and backstepping techniques. The resulting nonlinear feedback control law yields convergence of the path-following error trajectory to zero. Simulation results illustrate the performance of the control system proposed.

Index Terms

Nonlinear Control, Path-following, Underactuated Vehicles, Autonomous Underwater Vehicles.

I. INTRODUCTION

RAPID progress in marine robotics is steadily affording scientists advanced tools for ocean exploration and exploitation. However, much work remains to be done before marine robots can roam the oceans freely, acquiring scientific data on the temporal and spatial scales that are naturally imposed by the phenomena under study. To meet these goals, robots must be equipped with systems to steer them accurately and reliably in the harsh marine environment. For this reason, there has been considerable interest over the last few years in the development of advanced methods for marine vehicle motion control. Namely, point stabilization, trajectory tracking, and path-following control.

Point stabilization refers to the problem of steering a vehicle to a final target point, with a desired orientation. Trajectory tracking requires a vehicle to track a time-parameterized reference curve. Finally, path-following control aims at forcing a vehicle to converge to and follow a desired spatial path, without any temporal specifications. The latter objective occurs for example when it is required that an AUV examine an area by performing a "lawn mowing" maneuver along desired tracks with great accuracy, at speeds determined by a scientific end-user. The underlying assumption in path-following control is that the vehicle's forward speed conforms to a desired speed profile, while the controller acts on the vehicle's orientation to steer it to the path. Typically, smoother convergence to a path is achieved when path-following strategies are used instead of trajectory tracking control laws, and the control signals are less likely to reach saturation.

This paper proposes a new methodology for the design of path following systems for AUVs. The reader is referred to the work of Micaelli and Samson (Micaelli and Samson, 1992 and 1993) and the references therein for related ground-breaking work in the field of land robots, where powerful nonlinear path-following control structures were introduced. It is important to remark that even though the problem of path-following is essentially solved for land vehicles, the same does not hold true for marine craft. This is due to the fact that dynamics play a key role in the motion of the latter, thus requiring the development of methodologies for accurate path-following that take explicitly into account the presence of possibly complex, nonlinear hydrodynamic terms. This is in striking contrast with land vehicles, where methodologies that build on pure vehicle kinematics are often adequate for control.

The present paper builds on previous results obtained by Encarnação and Pascoal (Encarnação and Pascoal, 2000) and in (Encarnação *et al.*, 2000), where the results in (Micaelli and Samson, 1992 and 1993) were extended to deal with the control of marine vehicles in three-dimensional space, and to address explicitly the presence of non-negligible marine vehicle dynamics. The methodology for path-following proposed in (Encarnação *et al.*, 2000) can be easily understood by recalling that the total velocity vector of an AUV is not necessarily aligned with the vehicle's main axis, as is the case for wheeled robots (AUVs sideslip). However, by drawing a simple analogy between the problems of path-following for wheeled robots and AUVs, the latter can be cast as the equivalent problem of aligning the total AUV velocity vector with the tangent to the path by manipulating the vehicle's yaw rate. It is important to remark that in spite of its broader scope of application, the results in (Encarnação *et al.*, 2000), inherit the major shortcoming already present in the path following control strategy for wheeled robots described for example in (Micaelli and Samson, 1993) : *the initial position error must be smaller than the smallest radius of curvature present in the path.*

The work reported in this paper lifts this restriction entirely. This is achieved by controlling explicitly the progression rate of a 'virtual target' to be tracked along the path, thus bypassing the problems that arise when the position of the virtual target is simply defined by the projection of the actual vehicle onto that path. See the work of Soetanto *et al.*, (Soetanto *et al.*, 2003) where a similar technique was first proposed for wheeled robots. This design procedure effectively creates an extra degree of freedom, that can then be explored to avoid the *singularities* that occur when the distance to path is not well defined (this

* Corresponding author. Tel.: + 33 4 67 41 85 15; Fax: + 33 4 67 41 85 00. E-mail : lapierre@lirmm.fr . The work of the first author benefited from an EC grant, under project FREESUB. The second author was supported by a post-doctoral grant from the Portuguese Foundation for Science and Technology.

occurs for example when the vehicle is located exactly at the center of curvature of a circular path). Controller design starts at a kinematic level and evolves to a dynamic setting using backstepping techniques. The resulting control strategy yields global convergence of the actual path of the vehicle to the desired path.

As remarked in (Soetanto *et al.*, 2003), the idea of exploring the extra degree of freedom that comes from controlling the motion of a virtual target along a path seems to have appeared for the first time in (Casalino *et al.*, 1995), for the control of wheeled robots. This idea was later extended to the control of marine craft in (Aicardi *et al.*, 2001). However, none of these references addresses the issues of vehicle dynamics. Furthermore, the methodologies adopted for control system design in (Casalino *et al.*, 1995) and (Aicardi *et al.*, 2001) build on an entirely different technique, that requires the introduction of a nonsingular transformation in the original error space. Interestingly enough, a very recent publication explores the same concept of a virtual target for path following in wheeled robots, (Diaz *et al.*, 2002).

The paper is organized as follows. Section II formulates the problem of path-following control for an AUV. Section III develops a nonlinear path-following control law that deals explicitly with vehicle dynamics. The performance of the control system proposed is illustrated in simulation in Section IV. Finally, Section V contains the conclusions, and describes some problems that warrant further research.

II. PROBLEM FORMULATION

This section introduces the simplified dynamic model of an AUV in the horizontal plane, and provides a rigorous formulation of the problem of steering it along a desired path.

The type of AUV considered in this paper is equipped with two identical back thrusters, mounted symmetrically with respect to its longitudinal axis. Thus, the vehicle is underactuated since it lacks a lateral thruster. The common and differential modes of the thrusters generate a force F along the vehicle's longitudinal axis and a torque Γ about its vertical axis, respectively. In this study, a full dynamic model of the INFANTE AUV operated by the Institute for Systems and Robotics (ISR) of Lisbon will be used, see Figure 2 and Table II. It is assumed that only the back thrusters are used to maneuver in the horizontal plane.

A. Vehicle Modeling. Kinematics and Dynamics.

The following notation will be used in the sequel. The symbol $\{A\} := \{\mathbf{x}_A, \mathbf{y}_A, \mathbf{z}_A\}$ denotes a reference frame with origin O_A and unit vectors $\mathbf{x}_A, \mathbf{y}_A$, and $\mathbf{z}_A$. Given two reference frames $\{A\}$ and $\{B\}$, ${}^B_A R$ is the rotation matrix from $\{B\}$ to $\{A\}$. Following standard practice, the general kinematic and dynamics equations of a vehicle can be developed using a global coordinate frame $\{U\}$ and a body-fixed coordinate frame $\{B\}$, as depicted in Figure 1. Let Q denote the center of mass of the vehicle, which we assume is coincident with O_B , and let $\mathbf{q} = [x, y, 0]^T$ be the position of Q in $\{U\}$. Further let ψ_B denote the yaw angle that parametrizes the rotation matrix from $\{B\}$ to $\{U\}$. Let $\mathbf{v}_t = [u, v, 0]^T$ be the velocity of Q in $\{U\}$ expressed in $\{B\}$, where u and v are the longitudinal (surge) and transverse (sway) velocities, respectively.

With this notation, the kinematic equations of the AUV can be written as

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos(\psi_B) - v \sin(\psi_B) \\ \dot{y} &= u \sin(\psi_B) + v \cos(\psi_B) \\ \dot{\psi}_B &= r\end{aligned}\quad (1)$$

where r is the vehicle's angular speed (yaw rate). Assuming u is never equal to zero, define the side-slip angle $\beta = \arctan(v/u)$ and consider the reference frame $\{W\}$ that is obtained from $\{B\}$ by rotating it around the $\mathbf{z}_B$ axis through angle β in the positive direction. The above equations can then be re-written to yield

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v_t \cos(\psi_W) \\ \dot{y} &= v_t \sin(\psi_W) \\ \dot{\psi}_W &= r + \dot{\beta}\end{aligned}\quad (2)$$

where $\psi_W = \psi_B + \beta$ and v_t is the x_W component of the total vehicle velocity expressed in $\{W\}$. Clearly, $v_t = \|\mathbf{v}_t\| = (u^2 + v^2)^{1/2}$. In the aircraft literature $\{W\}$ is called the wind frame and will henceforth be called the flow frame. Notice how the choice of a new frame simplified the first two kinematic equations, and brought out their similarities with those of a wheeled robot. See (Micaelli and Samson 1993), and (Soetanto *et al.*, 2003).

Neglecting the equations in heave, roll and pitch, the simplified equations for surge, sway and yaw can be written as in (Fossen, 1994) and (Silvestre, 2000).

$$\begin{aligned}F &= m_u \dot{u} + d_u \\ 0 &= m_v \dot{v} + m_{ur} ur + d_v \\ \Gamma &= m_r \dot{r} + d_r\end{aligned}\quad (3)$$

where

$$\begin{aligned}m_u &= m - X_{\dot{u}} & d_u &= -X_{uu}u^2 - X_{vv}v^2 \\ m_v &= m - Y_{\dot{v}} & d_v &= -Y_{vv}v^2 - Y_{uv}uv \\ m_r &= I_z - N_{\dot{r}} & d_r &= -N_{vv}v^2 - N_{uv}uv \\ m_{ur} &= m - Y_r & &= -N_{rur}ur\end{aligned}$$

The symbols m and I_z denote the mass and moment of inertia of the AUV respectively, $X_{\{\cdot\}}, Y_{\{\cdot\}}$, and $N_{\{\cdot\}}$ are classical hydrodynamic derivatives, and $[F \ \Gamma]^T$ defines the input vector of force and torque that is applied to the AUV. The model presented in this paper is based on the model of the INFANTE AUV described in (Silvestre, 2000), to which the reader is referred for complete details.

B. Path-following. Error Coordinates.

The solution to the problem of path-following proposed here builds on the following intuitive explanation, see Figure 1): a simple path-following controller should compute i) the distance between the vehicle's center of mass Q and the closest point P on the path, and ii) the angle between the vehicle's total velocity vector $\mathbf{v}_t$ and the tangent to the path at P , and reduce both to zero. This motivates the development of the 'kinematic' model of the vehicle in terms of a Serret-Frenet frame $\{F\}$ that moves along the path; $\{F\}$ plays the role of the body axis of a 'virtual target vehicle' that should be tracked by the 'real vehicle'. Using this set-up, the abovementioned distance and angle become the coordinates of the error space where the control problem is formulated and solved. In this paper, however, a Frenet frame $\{F\}$ that moves along the path to be followed is used with a significant difference: *the Frenet frame is not attached to the point on the path that is closest to the vehicle*. Instead, the origin $O_F = P$ of $\{F\}$ along the path is made to evolve according to a conveniently defined control law, effectively yielding an extra controller design parameter. As will be seen, this seemingly simple procedure is instrumental in lifting the stringent initial condition constraints that are patent in (Micaelli and Samson, 1993), for path-following in wheeled robots and in (Encarnação *et al.*, 2000), for marine vehicles. The notation that follows is by now standard.

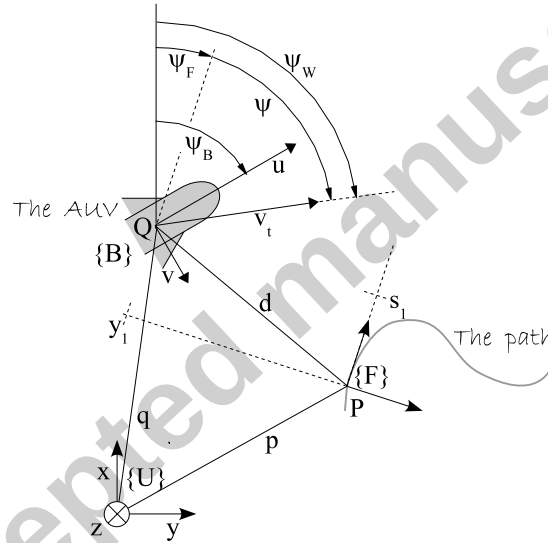


Fig. 1. Path-following: reference frames

Consider Figure 1, where P is an arbitrary point on the path to be followed. Associated with P , consider the corresponding Serret-Frenet frame $\{F\}$. The signed curvilinear abscissa of P along the path is denoted s . Clearly, Q can either be expressed as $\mathbf{q} = [x, y, 0]^T$ in $\{U\}$ or as $[s_1, y_1, 0]^T$ in $\{F\}$. Stated equivalently, Q can be given in $(x, y, 0)$ or $(s_1, y_1, 0)$ coordinates. Let

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi_F & \sin \psi_F & 0 \\ -\sin \psi_F & \cos \psi_F & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

be the rotation matrix from $\{U\}$ to $\{F\}$, parameterized locally by the angle ψ_F . Define $\omega_F = \dot{\psi}_F$. Then,

$$\begin{cases} \omega_F = \dot{\psi}_F = c_c(s)\dot{s} \\ \dot{c}_c(s) = g_c(s)\dot{s} \end{cases} \quad (4)$$

where $c_c(s)$ and $g_c(s) = \frac{dc_c(s)}{ds}$ denote the path curvature and its derivative, respectively. The velocity of P in $\{U\}$ can be expressed in $\{F\}$ to yield

$$\left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F = \begin{bmatrix} \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

It is also straightforward to compute the velocity of Q in $\{U\}$ as

$$\left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_U = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_U + R^{-1} \left(\frac{d\mathbf{d}}{dt}\right)_F + R^{-1}(\omega_F \times \mathbf{d})$$

where $\mathbf{d}$ is the vector from P to Q . Multiplying the above equation on the left by R gives the velocity of Q in $\{U\}$ expressed in $\{F\}$ as

$$R \left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_U = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}\right)_F + \left(\frac{d\mathbf{d}}{dt}\right)_F + \omega_F \times \mathbf{d}. \quad (5)$$

Using the relations

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\mathbf{q}}{dt}\right)_U &= \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \left(\frac{d\mathbf{d}}{dt}\right)_F &= \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{y}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \omega_F \times \mathbf{d} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_F = c_c(s)\dot{s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ y_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -c_c(s)\dot{s}y_1 \\ c_c(s)\dot{s}s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

equation (5) can be rewritten as

$$R \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s}(1 - c_c(s)y_1) + \dot{s}_1 \\ \dot{y}_1 + c_c(s)\dot{s}s_1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Solving for $\dot{s}_1$ and $\dot{y}_1$ yields

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = [\cos \psi_F & \sin \psi_F] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} - \dot{s}(1 - c_c y_1) \\ \dot{y}_1 = [-\sin \psi_F & \cos \psi_F] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} - c_c \dot{s} s_1. \end{cases} \quad (6)$$

Finally, replacing the top two equations of (2) in (6) and introducing the variable $\psi = \psi_W - \psi_F$ gives the 'kinematic' model of the AUV in (s, y) coordinates as

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\dot{s}(1 - c_c y_1) + v_t \cos \psi \\ \dot{y}_1 = -c_c \dot{s} s_1 + v_t \sin \psi \\ \dot{\psi} = \omega_W - c_c \dot{s} \end{cases} \quad (7)$$

where $\omega_W = \dot{\psi}_W = r + \dot{\beta}$.

At this point it is important to notice that in (Micaelli and Samson, 1993) and (Encarnação *et al.*, 2000), the point P is defined by the projection of Q onto the path, assuming the projection is well defined. In other terms, the kinematic model considered in (Micaelli and Samson, 1993) and (Encarnação *et al.*, 2000) is equivalent to the equations (7) with $s_1 = 0$. One is then forced to solve for $\dot{s}$ in the equation above when s_1 is forced to 0. However, by doing so $1 - c_c y_1$ appears in the denominator, thus creating a singularity at $y_1 = \frac{1}{c_c}$. As a result, the control laws derived in (Micaelli and Samson, 1993) and (Encarnação *et al.*, 2000), require that the initial position of Q be restricted to a tube around the path, the radius of which must be less than $\frac{1}{c_{c,max}}$, where $c_{c,max}$ denotes the maximum curvature of the path. Clearly, this constraint is very conservative since the occurrence of a large $c_{c,max}$ in just a small section of the path will impose a rather strict constraint on the vehicle's initial position, even if it happens to start in a region that is far away from the 'problematic' section. By making s_1 not necessarily equal to zero, a virtual target that is not coincident with the projection of the vehicle onto the path is created, thus introducing an extra degree of freedom for controller design. By specifying how fast the newly-defined target moves, the occurrence of a singularity at $y_1 = \frac{1}{c_c}$ is removed.

C. Problem Formulation

With the above notation, the problem under study can be formulated as follows:

Consider the AUV model with kinematic and dynamic equations given by (1) and (3), respectively. Given a path to be followed and a desired profile $u_d > u_{min} > 0$ for the surge speed u , derive feedback control laws for the force F , torque Γ , and rate of evolution $\dot{s}$ of the curvilinear abscissa s of the 'virtual target' point P along the path so that y_1 , s_1 , ψ , and $u - u_d$ tend to zero asymptotically.

III. NONLINEAR PATH-FOLLOWING CONTROLLER DESIGN

This section introduces a nonlinear closed-loop control law to steer the dynamic model of an AUV described by (1)-(3) along a desired path. Controller design builds on previous work in (Micaelli and Samson, 1993) and (Encarnação *et al.*, 2000), on path-following control, and relies heavily on backstepping techniques. The reader will find in (Krstić *et al.*, 1995) a lucid exposition of interesting theoretical and practical issues involved in backstepping. Controller design is done in two steps. The first step yields a kinematic controller by adopting the yaw rate $r = \dot{\psi}_B$ as a 'virtual' control input, and by assuming that the actual surge speed equals the desired speed u_d . The second step addresses the vehicle dynamics, builds on the kinematic controller derived, and uses backstepping techniques to obtain control laws for the input variables F and Γ .

A. Controller Design using the Kinematic Model

This section derives a kinematic controller for the AUV. As in (Micaelli and Samson, 1993), we let

$$\delta(y_1) = -\psi_a \frac{e^{2k_\delta y_1} - 1}{e^{2k_\delta y_1} + 1} \quad (8)$$

be a desired approach angle parameterized by $k_\delta > 0$ and $0 < \psi_a < \pi/2$, satisfying $y_1 \delta(y_1) \leq 0$ for all y_1 . The approach angle is instrumental in shaping transient maneuvers during the path approach phase.

Remark : as mentioned in (Micaelli and Samson, 1993) for wheeled vehicles, the approach angle is generally chosen as $\delta'(y_1, u) = -\text{sign}(u)\delta(y_1)$, where u is the forward velocity of the wheeled robot. Note that the nonholonomic constraint makes the side-slip velocity null, so $v_t = u$ in this situation. This choice does not guarantee the differentiability of δ' around $u = 0$. In the case of an AUV, the condition $u(t) > 0, \forall t$, is necessary for controllability reasons. Effectively this kind of vehicle is generally actuated via control surfaces that generate an action on the body if there is non-null relative fluid-flow velocity. This justifies the choice of the approach angle expression, and the necessary assumptions that will be used in the proof.

Proposition 1: Consider the kinematic model of an AUV described in (1) and the corresponding path-following error model (7). Let the approach angle $\delta(y_1)$ be defined as in (8). Assume that the surge velocity of the vehicle is such that $u = u_d > 0$. Suppose that the path to be followed is parameterized by its curvilinear abscissa s , and assume that for each s the variables ψ , s_1 , y_1 , and c_c are well defined. Then the kinematic control law

$$U_{kin} = \begin{cases} r = \dot{\delta} - \dot{\beta} - k_1(\psi - \delta) + c_c(s)\dot{s} \\ \dot{s} = \cos \psi v_t + k_2 s_1 \end{cases} \quad (9)$$

(where k_1 and k_2 are arbitrary positive constants) drives y_1 , s_1 , and ψ asymptotically to zero.

At this point, one should notice that the equation (9) appears in a non-causal form. Indeed, the term $\dot{\beta}$ is hiding acceleration terms, and through them a dependance on r itself. This is due to the coupling term m_{ur} appearing in the side-slip dynamics ($\dot{v}$).

Nevertheless, the consideration of the dynamic model (3) yields an algebraic solution for the expression of the kinematic control r as described below:

$$r = \frac{1}{1 - \frac{m_{ur}}{m_v}(\cos \beta)^2} \left(\dot{\delta} + \frac{1}{v_t^2}(\dot{u}v + \frac{ud_v}{v_t^2}) - k_1(\psi - \delta) + c_c(s)\dot{s} \right) \quad (10)$$

Note that the above control is causal and well defined if

$$\frac{m_{ur}}{m_v} = \frac{m - Y_r}{m - Y_v} < 1. \quad (11)$$

Close examination of the hydrodynamic parameters of an AUV as in (Lewis, 1989) reveals that

- Y_v is always negative.
- Y_r is positive if stern dominates.
- Y_r is negative if bow dominates.

Thus, in the case of a stern-dominant vehicle such as the one considered in this study, the control computation is well posed. The implementation of this control requires the consideration of the equation (10), where a surge acceleration estimation $\dot{u}$ is necessary. Nevertheless, at this kinematic level, one could restrict the domain of application to the case where the system is

traveling with a constant forward velocity $u = u_d > 0$. This makes the expression (10) simpler since the acceleration terms disappear.

The following proof will extensively use Barbalat's lemma and the LaSalle's invariance principle stated as follows.

Barbalat's lemma : if $f(t)$ is a double differentiable function such that $f(t)$ is finite as t goes to ∞ , and such that $\dot{f}(t)$ is uniformly continuous, then $\dot{f}(t)$ tends to 0 as t tends to ∞

Uniform continuity sufficient condition : $f(t)$ is uniformly continuous if $\ddot{f}(t)$ exists and is bounded.

LaSalle's Invariance Principle : let Ω be a positively invariant set of the system described in (1) and (3). Suppose that every solution starting in Ω converges to a set $E \subset \Omega$ and let M be the largest invariant set contained in E . Then every bounded solution starting in Ω converges to M as t tends to ∞ .

For details of Barbalat's lemma and its application, please refer to (Slotine and Li, 1995). For demonstration and application of LaSalle's theorem, please refer to (Sepulchre *et al.*, 1997) and (Khalil, 2002). Note that the application of LaSalle's theorem is restricted to autonomous systems. In our situation, the fact that the desired forward velocity is a constant allows our system to be considered as autonomous.

Proof: The following proof is made under the assumption that the system is traveling with a constant surge velocity $u = u_d > 0$. This allows us to consider the system as autonomous, and in turn allows for the application of LaSalle's invariance principle. The proof is structured in three parts. First, we show that the system asymptotically follows the reference approach angle δ . Then we show that this reference asymptotically drives the AUV onto the path. And finally, we use LaSalle's invariance principle to concatenate the two previous convergence properties.

- Consider the candidate Lyapunov function $V_1 = \frac{1}{2}(\psi - \delta)^2$. The control law

$$r = \dot{\delta} - \dot{\beta} - k_1(\psi - \delta) + c_c(s)\dot{s}$$

makes $\dot{V}_1 = -k_1(\psi - \delta)^2 \leq 0$. Since V_1 is a positive and monotonically decreasing function, $\lim_{t \rightarrow \infty} V_1(t)$ exists and is finite. Moreover, since $\ddot{V}_1 = -2k_1\dot{V}_1$, $\dot{V}_1$ is bounded and therefore $\dot{V}_1$ is uniformly continuous. Then an application of Barbalat's lemma allows for the conclusion that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1 = 0$. The system is asymptotically converging to a compact set E defined by $\dot{V}_1 = 0$. Therefore, the related variables y_1, s_1, s and ψ are bounded.

- Examine now the motion of the feedback control system restricted to E . To do this, consider the candidate Lyapunov function candidate $V_E = \frac{1}{2}(s_1^2 + y_1^2)$ and compute its derivative $\dot{V}_E = y_1 v_t \sin \delta - k_2 s_1^2 \leq 0$, according to the definition of δ in (8). Considering the previous expression of $\dot{V}_E$ and the equations (7), $\dot{V}_E$ is bounded. Then Barbalat's lemma allows for the conclusion that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_E = 0$. This in turn implies that all trajectories in E satisfy $\lim_{t \rightarrow \infty} y_1 = 0$ and $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 = 0$.
- We now apply LaSalle's invariance principle. Let $\Omega = \mathbb{R}^2$. The first part of the proof showed that every solution starting in Ω asymptotically converges to E . The second step showed that the largest invariant set of E is $M = [(s_1, y_1) = 0^2]$. Then every bounded solution starting in Ω converges to 0 as t tends to ∞ , or in other terms,

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} s_1 &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y_1 &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \psi &= 0. \end{cases} \quad (12)$$

End of proof.

B. The Dynamic controller

The above feedback control law applies to the kinematic model of the AUV only. However, using backstepping techniques, this control law can be extended to deal with the vehicle dynamics. In the kinematic design the total velocity $v_t(t)$ of the vehicle was left free, but implicitly dependent on a desired profile u_d for surge speed $u(t)$. In the dynamic design the variable u will be explicitly brought into the picture and a control law will be derived so that $u(t) - u_d$ tends to zero. Notice also that the robot's angular speed r was assumed to be a control input. This assumption is lifted by taking into account the vehicle dynamics. The following result holds.

Proposition 2: Consider the kinematic and dynamic models of an AUV described in (1) and (3) respectively, and the corresponding path-following error model in (7). Let the approach angle $\delta(y_1)$ be defined as in (8) and let a desired speed profile $u_d > u_{min} > 0$ for $u(t)$ be given. Suppose the path to be followed is parametrized by its curvilinear abscissa s , and assume that for each s the variables ψ, s_1, y_1 , and $c_c \frac{\partial c_c}{\partial s}$ are well defined. Then the dynamic control law

$$U_{dyn} = \begin{cases} \Gamma &= m_r \alpha_r - d_r \\ F &= m_u (\dot{u}_d - k_4(u - u_d)) - d_u \\ \dot{s} = \cos \psi v_t + k_2 s_1 \end{cases} \quad (13)$$

where

$$\begin{aligned} \alpha_r &= \ddot{\delta} - \ddot{\beta} - (k_1 + k_3)(\dot{\psi} - \dot{\delta}) \\ &\quad - (k_5 + k_1 k_3)(\psi - \delta) + c_c \ddot{s} + \frac{\partial c_c}{\partial s} \dot{s}, \end{aligned}$$

k_1 through k_5 are arbitrary positive gains, and d_r and d_u are sums of hydrodynamic coefficients, drives y_1 , s_1 , $u - u_d$, and ψ asymptotically to zero.

The control computation requires further algebraic derivation, as explained in the previous section of the kinematic controller, where the use of the dynamic model is required. The equations (13) contain an evaluation of the side-slip angle acceleration $\ddot{\beta}$. This variable cannot be measured directly, and one must thus resort for its computation to the original dynamic model of the AUV. It is easy to see that

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{v_t^2}(\ddot{v}u - \ddot{u}v) - 2\frac{\dot{v}_t}{v_t}\dot{\beta} \quad (14)$$

and that the dynamic model of the AUV can be differentiated to obtain

$$\begin{cases} \ddot{u} &= \frac{1}{m_u}(\dot{F} - \dot{d}_u) \\ \ddot{v} &= \frac{1}{m_v}(-m_{ur}\dot{u}r - m_{ur}u\dot{r} - \dot{d}_v) \end{cases} \quad (15)$$

Replacing these equations in the control law and simplifying yields

$$\Gamma = m_r\alpha + d_r$$

where

$$\alpha = \frac{f_\alpha - k_3(r - r_d) - k_5(\psi - \delta)}{1 - \frac{m_{ur}}{m_v}(\cos \beta)^2}$$

and

$$f_\alpha = \ddot{\delta} - k_1(\dot{\psi} - \dot{\delta}) + c_c\ddot{s} + g_c\dot{s} + \frac{\ddot{u}v}{v_t^2} + \frac{2\dot{v}_t\dot{\beta}}{v_t} + \frac{u}{v_t^2}\left(\frac{m_{ur}}{m_v}\dot{u}r + \frac{\dot{d}_v}{m_v}\right).$$

This equation can be further expanded into simpler terms using the vehicle model. Notice that we recover the previous condition expressed in the equation (11) for the kinematic case.

Proof: Define the virtual control law for r (desired behaviour of r in (9)) as

$$\zeta = \dot{\delta} - \dot{\beta} - k_1(\psi - \delta) + c_c(s)\dot{s}$$

and let $\epsilon = r - \zeta$ be the difference between actual and desired values of r . Set $r = \epsilon + \zeta$ and consider the total candidate Lyapunov function

$$V_2 = k_5V_1 + \frac{1}{2}\epsilon^2 + \frac{1}{2}(u - u_d)^2 \quad (16)$$

with k_5 positive. Tedious but straightforward computation shows that with the control law proposed

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1k_5(\psi - \delta)^2 - k_3\epsilon^2 \\ &\quad - k_4(u - u_d)^2 \leq 0 \end{aligned}$$

and that $\dot{V}_2$ is bounded. The necessary conditions for the application of Barbalat's lemma are met, and we conclude that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_2 = 0$. The consequence is that the system is asymptotically converging to a set E' defined by $\dot{V}_2 = 0$, or in other terms $E' := ((\psi - \delta, r - \zeta, u - u_d) \in \mathbb{R}^3 | (\psi - \delta = 0, r - \zeta = 0, u - u_d = 0))$. As in the previous section, we now study the system trajectories restricted to the set E' . This study has been carried out for the kinematic case, and the previous results may be used to conclude that onto the set E' , the system properties imply that $\lim_{t \rightarrow \infty} (s_1, y_1) = 0^2$. Since our system is autonomous, we use Lasalle's invariance principle to conclude that

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} u - u_d &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} s_1 &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y_1 &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \psi &= 0 \end{cases} \quad (17)$$

End of proof.

IV. SIMULATION RESULTS

This section illustrates the performance in simulation of the derived path-following control law. Table II summarizes the key parameters of the AUV model used. This is a simple modification of the Infante AUV model described in (Silvestre, 2000), to account for the fact that only thrusters are used to maneuver in the horizontal plane.

The path is designed in Cartesian space (cf. table I) and we assume a parameterization that allows the computation (given s) of:

- $\psi_F(s)$: the global heading of the virtual target,
- $c_c(s)$: the path curvature at the target position,
- $\frac{\partial c_c(s)}{\partial s}$: the curvilinear derivative of the curvature at the target position,

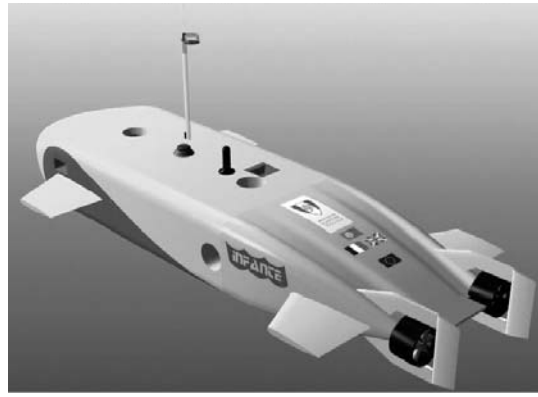


Fig. 2. Infante

- $x_s(s)$ and $y_s(s)$, the absolute location of the virtual target.

We have chosen a polynomial parameterization of the form

$$x_s(\mu) = \sum_{i=0}^n a_i \mu^i ; y_s(\mu) = \sum_{i=0}^n b_i \mu^i.$$

Assuming we have a precise estimation of the function $\mu(s)$, and given s , we compute

$$\begin{aligned} \psi_F(s) &= \arctan \frac{(y_s)'}{(x_s)'} \\ c_c(s) &= \frac{\partial \psi_F(s)}{\partial \mu} \frac{d\mu}{ds} \\ \frac{\partial c_c(s)}{\partial s} &= \frac{\partial c_c(s)}{\partial \mu} \frac{d\mu}{ds} \\ x_s(\mu(s)) &; y_s(\mu(s)) \\ (x_s)' &= \frac{dx_s}{d\mu} ; (y_s)' = \frac{dy_s}{d\mu}. \end{aligned}$$

The estimation of the function $\mu(s)$ is achieved by integration of

$$\frac{d\mu}{ds} = \frac{1}{\sqrt{[(x_s)']^2 + [(y_s)']^2}}.$$

$a_0 = 0$	$a_1 = 0.866$	$a_2 = -0.02$	$a_3 = 10^{-5}$	$a_4 = 1.5 \cdot 10^{-6}$
$b_0 = 0$	$b_1 = 0.5$	$b_2 = -5 \cdot 10^{-4}$	$b_3 = 10^{-5}$	$b_4 = 10^{-7}$

TABLE I
THE PATH PARAMETERS

The reference and actual robot paths are shown in Figure 3. The desired surge speed u_d was set to $1ms^{-1}$. The controller design parameters are displayed in Table III.

Figures 3, 4, 5 and 6 shows the results of the simulation. Notice in Figure 4 how the coordinates s_1 and y_1 tend to zero asymptotically. This is equivalent to stating that: i) the position of the virtual target (origin of frame $\{F\}(s)$ along the path) approaches the projection of the AUV on that path, and ii) the lateral distance of the AUV to the path is driven to zero. Notice also in Figure 5 that the actual surge velocity $u(t)$ converges to $u_d = 1ms^{-1}$.

V. DISCUSSION

The study that resulted in the development previously described, opened some interesting issues, that should be explicitly addressed. This section proposes a brief discussion of these questions.

A. The Virtual Target

The idea of the virtual target was implicit in some previous publications (Aicardi *et al.*, 2001, Skjene *et al.*, 2002, Diaz *et al.*, 2002), where the virtual target control law was 'intuitively chosen' before establishing global robot control. The originality of this present work is to show that the virtual target control law can be extracted during robot control design, guaranteeing a non-singular description of the problem and of system performance. Using this design process, it can be imagined that virtual target control law can permit the addressing of other problematic properties, and in turn solves other kinds of problem.

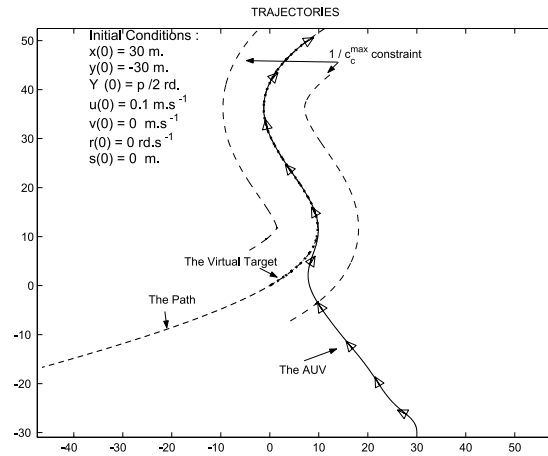


Fig. 3. Robot trajectory

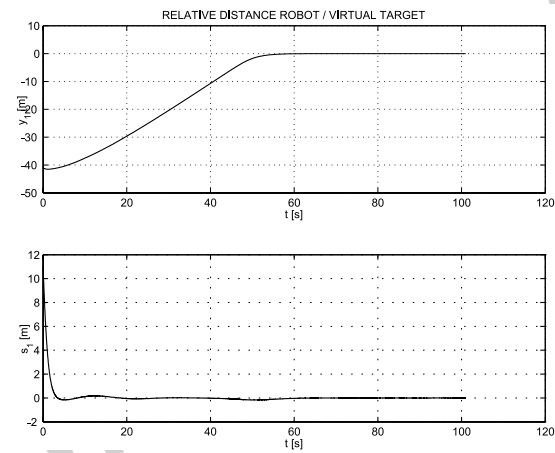


Fig. 4. Relative distance Robot/Virtual Target

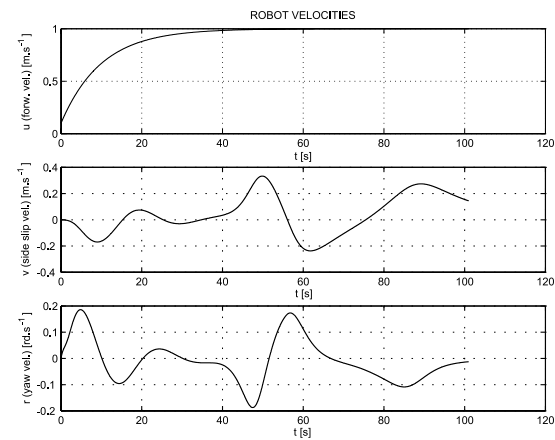


Fig. 5. Robot velocities

$m = 2234.5Kg$	$I_z = 2000N.m^2$
$X_{\dot{u}} = -142Kg.$	$Y_{\dot{v}} = -1715Kg.$
$N_{\dot{r}} = -1350N.m^2$	$X_{uu} = -35.4Kg.m^{-1}$
$X_{vv} = -128.4Kg.m^{-1}$	$Y_r = 435Kg.$
$Y_v = -346Kg.m^{-1}$	$Y_{v v } = -667Kg.m^{-1}$
$N_v = -686Kg.$	$N_{v v } = 443Kg.$
$N_r = -1427Kg.m.$	

TABLE II
THE INFANTE AUV: MODEL PARAMETERS

$k_1 = 1$	$k_2 = 1$	$k_3 = 1$	$k_4 = 1$	$k_5 = 1$
$k_{\delta} = 1$	$\psi_a = \pi/4$	$u_d = 1$	$\dot{u}_d = 0$	$\ddot{u}_d = 0$

TABLE III
CONTROLLER PARAMETERS

- Actuator saturation: in this study, the actuator saturation constraint has not been considered. This implies that our theoretical system is able to perfectly follow the path for any curvature. However, this is not true for a real system. In (Jiang and Nijmeijer, 1999) and (Soetanto *et al.*, 2003) it is shown that a unicycle-type robot can achieve asymptotic convergence in a point-stabilization task, under saturation constraint. In the path-following situation, considering that the robot travels at a constant forward velocity, the problem is far more complex. Indeed, with the robot traveling at constant forward velocity, an asymptotic convergence requirement cannot be met on any path. One can argue that path design should take into account this constraint, thus respecting a 'followability' condition. However, an interesting question is the following : considering any path, what should the robot trajectory be to guarantee that the robot/path distance is minimal during the maneuver? This question can be elegantly posed using the idea of the virtual target, removing the constraint that this target is moving along the path. This adds another degree of freedom of the virtual controller that can be used to solve the problem.

B. Acceleration Measurement vs. Estimation

In this study, the dynamic model of the robot has been used to estimate the system accelerations. Nevertheless, the consideration of a dynamic model implies neglecting the unmodelled dynamics (high order terms, external disturbances, etc.). Measuring the acceleration captures all the phenomena that cause acceleration. But this kind of measurements is subject to noise interference, and the efficiency of their consideration should be proven. This is a tradeoff that should be explicitly studied. Consider the two following situations:

- Minor acceleration: in this situation, 3 solutions are possible:
 - use the dynamic model to estimate acceleration,
 - use acceleration measurements: this implies checking that the signal/noise ratio is sufficiently large to guarantee meaningful measurements,

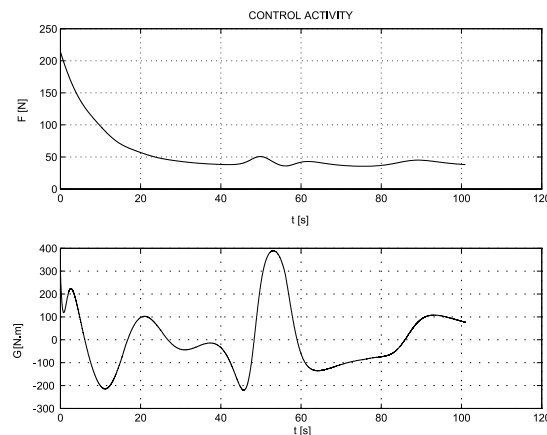


Fig. 6. Control Activity

- ignore the acceleration.
- Major acceleration: in this situation, the acceleration must be explicitly taken into account. The efficiency of the 2 following solutions should therefor be studied:
 - use the dynamic model: this technique is efficient, especially if a robust adaptive scheme has been designed. Nevertheless, the high order term of the dynamic model and the external disturbances might not be negligible,
 - measure the acceleration: since the related variables are large, their measurement would seem appropriate. Moreover, the consideration of this measured variable simplifies the control expression.

C. Simplification of the control expression

These results need to be confirmed in tests under real conditions. A preliminary step consists in simplifying the control expression to obtain an easily implementable version, taking into consideration the sensors that the robot carries.

These questions are important and need to be explicitly studied.

VI. CONCLUSION

A nonlinear control law was developed for accurate path-following in autonomous underwater vehicles (AUVs). The key idea behind the new control law was to explicitly control the rate of progression of a 'virtual target' to be tracked along the path, thus overcoming the 'singularity' problems that arise when the position of the virtual target is simply defined by the projection of the actual vehicle onto that path. Controller design relies on backstepping techniques. The paper offered a formal proof of convergence of the vehicle's trajectory to the path. Simulation results illustrated the performance of the control system proposed.

The derived controller relies heavily on accurate knowledge of vehicle dynamics. Future work will address the problems of reducing controller complexity and evaluating its robustness against parameter uncertainty. The problem of precise path-following in the presence of unknown sea currents also warrants further consideration.

VII. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to warmly thank Prof. Antonio Pascoal, from the Instituto Superior Tecnico of Lisbon, Portugal, for his helpful advises and his constant availability.

VIII. REFERENCES

- Aicardi M., Casalino G., Indiveri G., Aguiar P., Encarnação P. and Pascoal A., 2001. A Planar path-following Controller for Underactuated Marine Vehicles. *Proceedings of the 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2001*. Dubrovnik, Croatia.
- Casalino G, Aicardi M, Bicchi A and Balestrino A., 1995. Closed Loop Steering and path-following for Unicycle-like Vehicles: a Simple Lyapunov Function based Approach. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2(1):27-35.
- Diaz del Rio F., Jimenez G, Sevillano J L, Amaya C and Civit Balcells A., 2002. A New Method for Tracking Memorized Paths: Applications to Unicycle Robots. *Proceedings of the 10th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2002*. Lisbon, Portugal.
- Encarnação P., Pascoal A. and Arcak M., 2000; Path-Following for Marine Vehicles in the Presence of Unknown Currents. *Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Robot Control, SYROCO 2000*. Vienna, Austria.
- Encarnação, P. and Pascoal, A., 2000. 3D path-following for Autonomous Underwater Vehicles. *Proceedings of the, 39th IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2000*. Sydney, Australia.
- Fossen, T., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. *John Willey & Sons Inc.*, New York.
- Jiang, Z and Nijmeijer., 1999. A Recursive Technique for Tracking Control of Nonholonomic Systems in the Chained Form. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 4(2):265-279.
- Khalil H.K., 2002. Nonlinear systems. Third edition, *Prentice Hall*, New Jersey, USA.
- Krstić M.I., Kanellakopoulos and Kokotovic P., 1995. Nonlinear and Adaptive Control Design. *John Willey & Sons, Inc.*, New York, USA.
- Lewis E. V., 1989. Principles of Naval Architecture, Vol III, Motions in waves and Controllability. Published by *The Society of Naval Architects and Marine Engineers - SNAME*, Jersey city, New Jersey, USA.
- Micaelli A. and Samson C., 1992. 3D path-following and Time-Varying Feedback Stabilization of A Wheeled Robot. *Proceedings of the International Conference ICARCV 1992, RO-13.1*. Singapore.
- Micaelli A. and Samson C., 1993. Trajectory Tracking for Unicycle - Type and Two - Steering Wheels Mobile Robots. *Technical Report No. 2097*. INRIA, Sophia-Antipolis, France.
- Sepulchre R., Jankovic W., Kokotovic P., 1997. Applied Nonlinear Control. *Springer-Verlag Ed*.
- Skjene R., Fossen T and Kokotovic P., 2002. Output Manoeuvring for a class of nonlinear systems. *Proceedings of the IFAC World Congress*. Barcelona, Spain.

Silvestre C., 2000. Multi-Objective Optimization Theory with Application to the Integrated Design of Controllers / Plants for Autonomous Vehicles. *PhD Thesis*. Lisbon, Portugal.

Slotine J.J. and Li W., 1995. Applied Nonlinear Control. *Prentice Hall*, New Jersey, USA.

Soetanto D., Lapierre L., and Pascoal, A., 2003. Nonsingular path-following Control of Dynamic Wheeled Robos with Parametric Modeling Uncertainty. *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2003*, Coimbra, Portugal.

Accepted manuscript

A guaranteed obstacle avoidance guidance system

The safe maneuvering zone

Lionel Lapierre · Rene Zapata

Received: 13 January 2011 / Accepted: 2 December 2011 / Published online: 4 January 2012
© Springer Science+Business Media, LLC 2012

Abstract This paper presents a practical solution to the guidance of a unicycle type robot, including path following, obstacle avoidance and the respect of wheeled actuation saturation constraint, without planning procedure. These results are based on an extension of previous results on path following control including actuation saturation constraints. New solution for obstacle avoidance, with guaranteed performance, is proposed.

Keywords Path following · Obstacle avoidance · Saturation constraints

1 Introduction

1.1 Context and objectives

The architecture of an autonomous mobile system can be seen as a collection of software processes, orchestrated within a software architecture and run on an hardware architecture. These processes can be roughly divided in 4 different groups, each of them realizing some basic robotic functions, cf. Fig. 1: Navigation, Guidance and Control, Mission Control and Communication management.

These basic robotic functions are then sequentially or contextually recruited to realize different type of behaviors, in order for the mobile system to efficiently operate in a complex and versatile environment. Some of these behaviors, providing decision making and planning capabilities

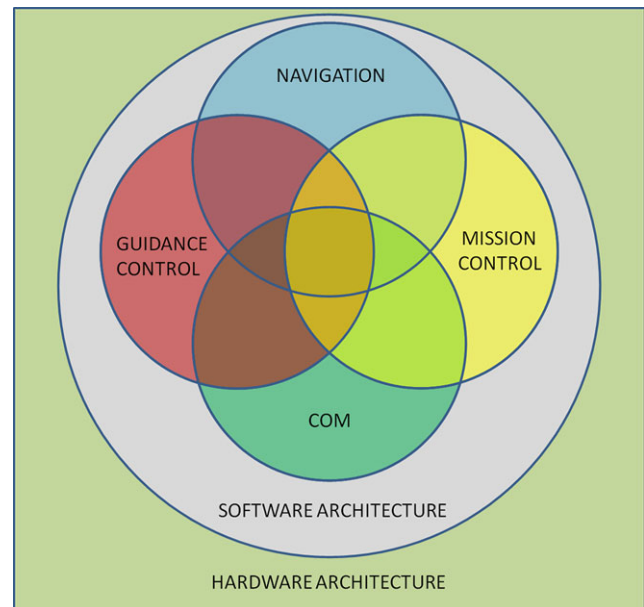


Fig. 1 Architecture of an autonomous mobile system

(Path planning, Mission Control, ...), are implemented at a high level of the architecture. Others, requiring rapid reaction, gain at being implemented at a lower level (Navigation, Guidance and Control, Reactive Obstacle Avoidance ...) and are generally run as periodical processes.

This paper focuses on the *Reactive Guidance and Control* subsystem which has to provide a periodical computation of the system reaction, in order to afford the system with permanent basic capabilities as path following, station keeping, obstacle avoidance, formation keeping. ...

Recent advances in nonlinear control theory (Lyapunov based design, backstepping...) provides the necessary tools to design Guidance and Control algorithms with guarantees of convergence. The Guidance system processes navigation

L. Lapierre (✉) · R. Zapata
LIRMM, 161, rue Ada, 34392 Montpellier, France
e-mail: lapierre@lirmm.fr

R. Zapata
e-mail: zapata@lirmm.fr

data and path parameters in order to provide an *achievable* reference to the control system that drives the actuation. In this context, a guidance system should drive the system towards its current objective, while respecting the actuation saturation constraint, and providing a reference compatible with the system dynamics. This last point is not considered in this paper, and could be tackled using backstepping techniques (Krstić et al. 1995), assuming that the reference is differentiable, and is *Globally, Uniformly and Asymptotically Convergent* (GUAC). Moreover, this property warrants that, in the absence of sensor noise or modeling error, the control system will constantly and perfectly drive the system toward its objective. The effect of sensor noise will be to degrade the convergence property, down to a *practical convergence*, as far as the sensor suite and the navigation system afford an evaluation of the system states with a guaranteed and computable upper bound on the estimation error.

The objective of this paper is to propose a low-level *reactive Guidance and Control* subsystem that aims at preserving the convergence properties as the following functions are considered in the algorithm:

- Path following
- Actuation saturation constraint
- Obstacle avoidance

In Lapierre et al. (2006), we proposed a solution for path following control design of a unicycle type robot, that formally exhibits Global Uniform Asymptotic convergence (GUAC) property. In Lapierre and Indiverri (2007) this solution is extended to consider velocity saturation constraints of the actuators, while preserving the GUAC property. The solution proposed here, includes obstacle avoidance capability, combined with path following behavior. The objective is to propose a global solution to this problem, which formally guarantees:

- a Global Uniform Asymptotic Convergence of the robot to the path, when there is no obstacle, and
- that a minimum distance to the obstacle is respected, explicitly considering actuator velocity constraints, and
- that the system will retrieve its path following behavior when the obstruction has been avoided.

In the sequel, the Navigation system is considered as ideal and provides a perfect estimation of the system states, and the system models are considered as perfectly known.

1.2 Some bibliographic elements

1.2.1 Path-following

Motion control of autonomous vehicles has received considerable attention during the last few years. The solutions proposed in the literature can be roughly classified in three groups:

- *point stabilization*: the goal is to stabilize the vehicle at a given point, with a given orientation;
- *trajectory tracking*: the vehicle is required to track a time parameterized reference;
- *path following*: the vehicle is required to converge to and follow a path, without explicit temporal specifications.

Point stabilization presents a true challenge to control system designers when the vehicle has nonholonomic (or nonintegrable) constraints, since there is no smooth (or even continuous) state-feedback law that will yield stability, as pointed out by Brockett (1983). To overcome this difficulty three main approaches have been proposed: smooth time-varying control laws (Canudas de Wit et al. 1993; Godhavn and Egeland 1997 and Micaelli and Samson 1992) and discontinuous as well as hybrid feedback laws (Aguiar et al. 2000; Astolfi 1999; Hespanha 1996; Canudas de Wit and Sordalen 1992).

The trajectory tracking problem for fully actuated systems is now well understood and satisfactory solutions can be found in advanced nonlinear control textbooks. However, in the case of underactuated vehicles, that is, when the vehicle has less actuators than state variables to be tracked, the problem is still a very interesting topic of research. Linearization and feedback linearization methods (Walsh et al. 1994; Freund and Mayr 1997), as well as Lyapunov-based control laws (Canudas de Wit et al. 1993; Fierro and Lewis 1994) have been proposed.

Path following control has received relatively less attention than the other two problems. See the publications of Samson and Ait-Abderrahim (1991) and Micaelli and Samson (1993) for pioneering work in the area as well as Canudas de Wit et al. (1993) and Jiang and Nijmeijer (1999) and the references therein. Path following systems for marine vehicles have been reported by Encarnacao et al. (1992). The underlying assumption in path following control is that the vehicle's forward speed tracks a desired speed profile, while the controller acts on the vehicle orientation to drive it to the path. Typically, smoother convergence to a path is achieved, in comparison with the performance obtained with trajectory tracking controllers, and the control signals are less likely pushed to saturation. The work presented in this paper is based on the *virtual target* principle (Lapierre et al. 2006), where an added degree of freedom captures the motion of a virtual target on the path, allowing to relax the initial condition constraint exposed in Samson and Ait-Abderrahim (1991). Moreover the introduction of the virtual target will bring some advantages which will be exposed in the sequel.

1.2.2 Inclusion of saturation constraint

The abovementioned solutions of the literature provide controllers which may not be realistic, since they do not explicitly consider the effective actuators capacity, while they

could require large actuator inputs to achieve convergence. An interesting study, applied to Swedish wheeled robot, can be found in Indiveri et al. (2009). The authors show that a saturated situation in the actuator induces an undesired coupling between the longitudinal and rotational velocities controls, loosing the possibility to exploit the advantageous holonomic property of the system. Hence, they propose a modification of the control expression, allowing to prioritize the execution of the basic robotic tasks (position and heading), in order to respect the saturation constraint on the actuators, while the tracking error converges to 0. Following a behavioral approach, this work has been extended to non-holonomic system in Arrichiello et al. (2009). The work presented here is based on Lapierre and Indiveri (2007), where the path following algorithm exposed in Lapierre et al. (2006) is extended to cope with actuation limitation, using saturating functions proposed in Jiang et al. (1998), with the objective of preserving the convergence property of the path following algorithm, while respecting at any time the saturation constraint of the actuators. Basic ideas are exposed in the sequel.

1.2.3 Obstacle avoidance

Obstacle avoidance strategy is another major issue to perform reliable applications. The system reaction can be computed as replanning function (Path replanning) or directly in the controller as a *reflex behavior*.

Planning a new path, free of potential collision, is still a major issue of the field. The reaction quantification is generally made according to an arbitrary positive potential field functions attached on obstacles that repels the robot, and an attractive field located on the goal. The main difficulty of this method is to design an artificial potential function without undesired local minima. Elnagar and Hussein (2002), propose to model the potential field by Maxwell's equations that completely eliminate the local minima problem, with the condition that an *a priori* knowledge of the environment is available. These methods are generally computationally intensive. Iniguez and Rossel (2002), proposes a hierarchical and dynamic method, that works on a non regular grid decomposition, simple and computationally efficient, both in time and memory. Ge and Cui (2000) address the problem of the adaptation of the potential field magnitude, in order to avoid the problematic situation where the goal is too close from an obstacle inducing an inefficient attractive field, called the *Goals Non-Reachable with Obstacles Nearby*. The work of Louste (1999) tackles the problem of coupling a path planning method, based on viscous fluid propagation, with nonholonomic robot kinematics restrictions. All these elegant solutions have clear advantages and the implementation of one of them is mandatory within the architecture, since they can provide a globally feasible

path (if exists) that drives the system toward the objective. Nevertheless, planning a new path in a complex and versatile environment induces on the architecture a computational load that may not be compatible with a periodical recruitment, within a control period.

Another approach, based on a *reflex behavior*, is using the *Deformable Virtual Zone* (DVZ) concept, in which a robot kinematic dependent *risk zone* is located on the robot, surrounding it. The deformation of this zone is due to the intrusion of proximity information (obstacles within the risk zone). The system reaction is made in order to reform the *risk zone* to its nominal shape, implicitly going away from obstacles (Zapata et al. 2004). A combination of this method with the path following algorithm of Lapierre et al. (2006) is proposed in Lapierre et al. (2007). The limitation of this method is due of the virtual and arbitrary dynamics of the risk zone, that brings complexity in the control algorithm, and makes the whole system difficult to tune.

Another approach, classified as *path deformation* proposes to locally modify the shape of the path in order to contour the detected obstacle. Sgorbissa et al. (2010) propose a path deformation based on a Gaussian bell shape that allows for contouring the obstacle. In this present paper, we use a similar principle based on the definition of a *Safe Maneuvering Zone* (SMZ) originally introduced in Lapierre et al. (2010). As it will be exposed later, this solution uses the basic path following controller previously exposed, exploiting the convergence property of the algorithm.

It has to be noticed that the two last methods are local and cannot provide a global solution. On the other hand the planning methods are able to provide a global solution, if exists. This could be advantageously used within a planning process, that could be computationally intensive, and cannot be integrated at the reactive level. The solution is a combination of both types of methods. One is providing a path to be followed, free of obstacles as far as the environment knowledge allows for it, and the other allows for locally adapting the system trajectories in order to reactively avoid uncharted/misplaced/moving obstacles.

2 Notation and basic models

This section introduces the notation which is used in this paper. As a generic model for a nonholonomic mobile system, we consider a unicycle-type vehicle, of width $2L$, equipped with 2 rear wheels of radius R and a passive front wheel (see Fig. 2). The velocity of the center of mass of the robot is orthogonal to the rear wheels axis. Define $\{O\}$ an *inertial (universal) frame* and $\{B\}$ the *body frame*, attached to the vehicle onto the middle point of the rear wheels axis. Let $\mathbf{P}_R = [x, y]^T$ design the absolute coordinate of the origin of $\{B\}$, ψ is the yaw angle of the vehicle. Let u and r denote the forward and rotational velocity of the vehicle, and

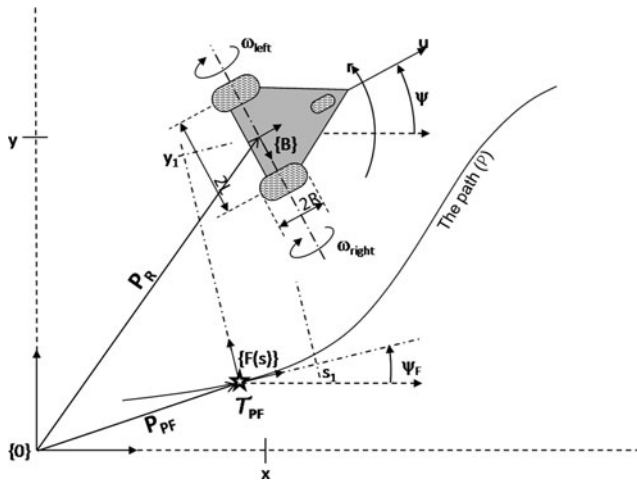


Fig. 2 Unicycle's parameters and frame definition

w_{left} and w_{right} express the wheels angular velocity, and the control inputs. The maximum achievable angular velocity of the wheels is denoted w_{max} . Following this notation, the kinematic model of the unicycle is expressed as:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos \psi, \\ \dot{y} &= u \sin \psi, \\ \dot{\psi} &= r.\end{aligned}\quad (1)$$

The expression of the actuation model is:

$$\begin{aligned}w_{left} &= (u - Lr)/R, \\ w_{right} &= (u + Lr)/R.\end{aligned}\quad (2)$$

Define a path to be followed, denoted $\mathcal{P}$, and a *Serret-Frenet frame* $\{F(s)\}$, attached on a point of the path defined by its curvilinear abscissa s . The orientation of $\{F\}$ with respect to $\{O\}$ is denoted as ψ_F . Assuming that the absolute coordinates of the origin of $\{F(s)\}$ is denoted by $\mathbf{P}_{PF} = [x_F(s), y_F(s)]^T$, $\mathbf{T}_{PF}(s) = [\mathbf{P}_{PF}, \psi_F]$ is defining the posture of $\{F(s)\}$, also called in the sequel *path-following-target*.

Clearly, the robot position $\mathbf{P}_R$ can be expressed as $[x, y]^T$ in $\{O\}$ or $[s_1, y_1]^T$ in $\{F(s)\}$. Let define the path curvature of the point located at s , as $c(s)$. The introduction of the variable $\theta = \psi - \psi_F$, and the combination with (1), yields to the kinematic model of the unicycle in $\{F\}$ as:

$$\begin{aligned}\dot{s}_1 &= -\dot{s}(1 - cy_1) + u \cos \theta, \\ \dot{y}_1 &= -c\dot{s}s_1 + u \sin \theta, \\ \omega &= r - c\dot{s}\end{aligned}\quad (3)$$

where $\omega = \dot{\theta}$.

Equation (3) captures the kinematic behavior of the unicycle system, expressed in the Frenet frame, attached to the path on a point described by its curvilinear coordinate s . (s_1, y_1) are the coordinates of the robot in the Frenet frame $\{F\}$. Note that in this expression, we are using an added virtual degree of freedom, that is the path following

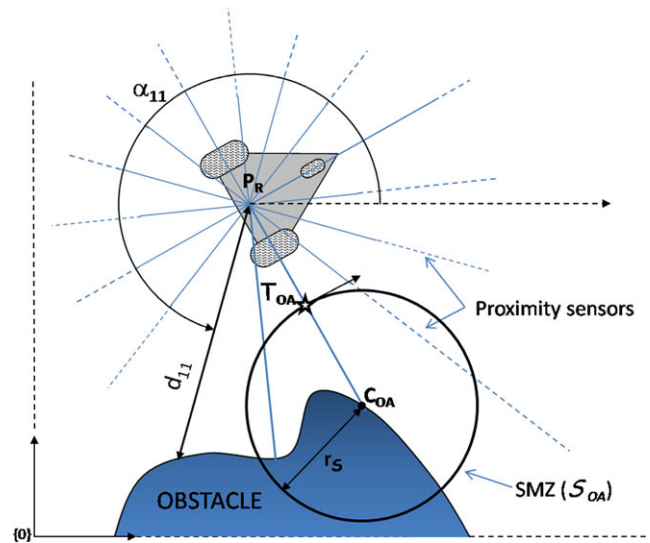


Fig. 3 Proximity sensors and safety maneuvering zone (SMZ) definition

virtual target evolution $\dot{s}$. As we will see in the sequel, and mathematically stated and solved in Lapierre et al. (2006), this procedure permits to solve the path following problem without restriction. Indeed, classically, for path following control design, the point to be reached on the path by the system is chosen as the closest point. This method has the major drawback of constraining the initial position of the robot in function of the maximum curvature of the path. This constraint is relaxed with the virtual target method reported in Lapierre et al. (2006).

In the following we use the subscript $(\cdot)_{OA}$ to design variables related to Obstacle Avoidance. For obstacle avoidance purpose, the robot is equipped with m proximity sensors, pointing in m different directions regularly distributed on the robot, and concurrently crossing onto the middle point of the rear wheels axis. These sensors periodically provide the *distance to obstacle* information as $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_m]^T$ in the absolute direction $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]^T$. Clearly, $\alpha_i = \psi + (2\pi)(i/m)$, for $i = 0, \dots, m-1$. Consider the sensor that provides the smallest d_i , and define $\mathbf{C}_{OA}$ as the absolute position of that closest sensor/obstacle intersection. Define a *safety maneuvering zone* (SMZ), denoted $\mathcal{S}_{OA}(r_S, \mathbf{C}_{OA})$, as a circle of radius r_S centered in $\mathbf{C}_{OA}$, as shown in Fig. 3. Consider the point $\mathbf{P}_{OA} = [x_{OA}, y_{OA}]^T$ as the intersection between $\overline{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}$ and $\mathcal{S}_{OA}$. Define $\mathbf{T}_{OA} = [\mathbf{P}_{OA}, \psi_{OA}]$, called in the sequel *obstacle-avoidance-target*, where ψ_{OA} will be defined later.

3 Control design

This section presents the methodology to design a low-level *reactive Guidance and Control* subsystem, that aims at pre-

serving convergence properties as the following functions are considered in the algorithm:

- Path following
- Actuation saturation constraint
- Obstacle avoidance

3.1 Path-following control design

The solution to the problem of path following admits an intuitive explanation: a path following controller should look at (i) the distance from the vehicle to the path and (ii) the angle between the vehicle velocity vector and the tangent to the path, and reduce both to zero. This motivates the development of the kinematic model of the vehicle in terms of a Serret-Frenet frame $\{F\}$ that moves along the path; $\{F\}$ plays the role of the body axis of a *path following target* that should be tracked by the vehicle. Using this set-up, the abovementioned distance and angle become the coordinates of the error space (s_1, y_1, θ) where the control problem is formulated and solved, as expressed in (3).

Motivated by the work in Micaelli and Samson (1992), the Serret-Frenet frame $\{F\}$ that moves along the path to be followed is used with a significant difference: $\{F\}$ is not attached to the point on the path that is closest to the vehicle. Instead, the origin of $\{F\}$ along the path is made to evolve according to a conveniently defined function of time, effectively yielding an extra controller design parameter. As it will be seen, this seemingly simple procedure allows to lift the stringent initial condition constraints that arise with the path following controller described in Micaelli and Samson (1992), effectively warranting a global solution, i.e. whatever the initial conditions.

Equipped with the previously defined formalism, the problem under study is to design a kinematic control law, in terms of $[w_{left}, w_{right}, \dot{s}]$ that asymptotically drives a single unicycle robot to the path, with a desired arbitrary forward velocity profile u_d . We introduce the approach angle $\delta := -\theta_A \tanh(k_\delta y_1)$, where k_δ is an arbitrary positive gain, and θ_A defines the asymptotic desired approach, which defines the approach angle when $|y_1|$ is huge. Traditionally, $\theta_A = \pi/2$, which implies that the system is driven to the path with a relative incidence of $\pi/2$, i.e. perpendicular to the path. Then, as shown in Lapierre et al. (2006), the following control law solves the path following problem

$$\begin{aligned} w_{left} &= (u_d - Lr_{PF})/R, \\ w_{right} &= (u_d + Lr_{PF})/R, \\ \dot{s} &= u \cos \theta + K_s s_1 \end{aligned} \quad (4)$$

where

$$r_{PF} := \dot{\delta} - K_1(\theta - \delta) + c\dot{s} \quad (5)$$

and K_1 and K_s are arbitrary positive gains.

This solution is Globally Exponentially Convergent (GEC) and provides a useful decoupling between the heading and the forward velocity controllers. The reader is invited to refer to Lapierre et al. (2006) for complete proof, extension to dynamics and robustness.

Note that the guidance objective for path following is achieved when $\theta - \delta = 0$, or equivalently when $\psi = \psi_F + \delta$. We introduce the *global path following heading reference*:

$$\psi_{PF} := \psi_F + \delta. \quad (6)$$

3.2 Inclusion of actuation saturation constraint

The consideration of actuation constraint, within the previous path following strategy, has been treated in Lapierre and Indiverri (2007). It consists in adapting the current forward velocity reference according to the following constraint:

$$\begin{cases} (w_{max}^2 - w_{left}^2) > 0, \\ (w_{max}^2 - w_{right}^2) > 0 \end{cases} \quad \forall t. \quad (7)$$

Proposition 1 *The path following requirement, under actuation saturation constraint, is achieved using the following kinematic control:*

$$r_{PF} = f_r + g_r u_{PF} \quad (8)$$

where

$$\begin{aligned} f_r &= -k_3 \tanh(\theta - \delta) + k_4(\cdot) s_1 c [1 - s_1 \delta'], \\ u_{PF} &= \frac{u_d}{u_{max}} \frac{R w_{max} - L(1/4 + f_r^2)}{1 + L(1/4 + g_r^2)}, \\ g_r &= c \cos \theta (1 - s_1 \delta') + \delta' \sin \theta, \\ \delta' &= \frac{\partial \delta}{\partial y_1} \end{aligned} \quad (9)$$

where $k_4(\cdot) := \frac{k_k}{1 + [s_1 c_c (1 - s_1 \delta')]^2}$, k_3 and k_k are chosen positive, respecting the following conditions:

$$\begin{aligned} k_3 + \frac{k_k}{2} &< \frac{R}{L} w_{max}, \\ u_{max} &:= \frac{R w_{max} - L/4}{1 + L/4}, \\ w_{max} &> L/4R, \\ u_d &\leq u_{max}. \end{aligned} \quad (10)$$

Finally, the wheel velocity control is obtained with:

$$\begin{aligned} w_{left} &= (u_{PF} - Lr_{PF})/R, \\ w_{right} &= (u_{PF} + Lr_{PF})/R, \\ \dot{s} &= u_{PF} \cos \theta + k_s s_1. \end{aligned} \quad (11)$$

Note that $u_{PF} = u_d$ is achieved when the yaw control $r_{PF} = 0$. Moreover, since the surge control u_{PF} can be reduced to zero in case of a strong yaw control ($r_{PF} = \frac{R}{L} w_{max}$), any continuous path is followable, for any value

of the curvature c . This is of course a consequence of the unicycle-type system kinematics. A car-like vehicle does not share this property. This solution is GUAC and respects the constraint (7). The interested reader should refer to Lapierre and Indiverri (2007) for complete proof of convergence.

Proof The proof is organized in two parts. The first one shows that controller (8), where the control gains are chosen according to (10) respects the saturation constraint (7). The second part is showing that this controller also yields GUAC convergence of the robot to the path.

Consider the saturation constraint as expressed in (7). Injecting the control expression (8) in the actuation model (2) provides new expressions for the saturation constraint: $R^2 w_{max}^2 - (-Lf_r + u_{PF}(1 - Lg_r))^2 \geq 0$ and $R^2 w_{max}^2 - (Lf_r + u_{PF}(1 + Lg_r))^2 \geq 0$. Let's assume that $u_{PF} \geq 0$, then both previous conditions are met if $R^2 w_{max}^2 - (L|f_r| + u_{PF}(1 + L|g_r|))^2 \geq 0$. The analysis of the previous second order inequality easily shows that it is respected if $|f_r| < \frac{R}{L} w_{max}$. On the other hand, since the expression of f_r in (8), one can easily state that $|f_r| < k_3 + \frac{k_k}{2}$. It is then straightforward to see that the respect of the conditions expressed in (10) guarantees that $|f_r| < \frac{R}{L} w_{max}$, and, as a consequence, the saturation constraints in (7) are respected also.

The second part of the proof shows that the control choice in (8) provides GUAC convergence of the vehicle to the path. Straightforward computation states that the control (8) can be equivalently rewritten as: $r_{PF} = \dot{\delta} - k_3 \tanh(\theta - \delta) + c_c \dot{s}$. Considering the Lyapunov candidate $V = \frac{1}{2}(\theta - \delta)^2$, in conjunction with the previous expression of the control yields: $\dot{V} = -k_3 \tanh(\theta - \delta)(\theta - \delta) \leq 0$. Since V is positive definite and $\dot{V}$ is strictly negative if $\theta \neq \delta$, we conclude that V is bounded and has a finite limit as t tends to ∞ . Moreover, simple derivation shows that $\ddot{V}$ is bounded, that induces that $\dot{V}$ is uniformly continuous. Hence, the necessary requirements for an application of the Barbalat's lemma are met. Then we conclude that the system trajectories converge uniformly to a positive invariant set $\Omega := \{(s_1, y_1, \theta) : \theta = \delta\}$. At this point, and because the system is autonomous, we restrict the domain of study to the set Ω . Consider now the Lyapunov candidate $V_1 = \frac{1}{2}(s_1^2 + y_1^2)|_{\Omega}$. Clearly the choice for $\dot{s}$ in (11) implies that $\dot{V}_1 = y_1 u_{PF} \sin \delta - k_4(s_1)^2 \leq 0$, since the definition of δ . Simple derivation shows that the uniform continuity is related to some trivial conditions, discussed in Lapierre and Indiverri (2007). Finally, the same argument than previously used is invoked to conclude that $\Omega_1 := (s_1, y_1, \theta) : s_1 = y_1 = 0$ is an invariant set of Ω , and moreover, since the definition of δ , Ω_1 is reduced to the origin. At last, the LaSalle's invariance principle is used in order to show the GUAC convergence of the trajectories to Ω_1 , that is the origin, i.e. $(y_1, s_1, \theta) = 0^3$. $\square$

For a lucid exposition of the control design and the proofs, the reader should refer to Lapierre and Indiverri (2007). The advantages of this solution are:

- The surge velocity is naturally reduced as the heading control increases. As we will see in the sequel, this behavior will be very useful in the obstacle avoidance problems.
- Any continuous path is followable.
- It provides a GUAC convergence of the vehicle to the path.

3.3 Obstacle avoidance: the safe maneuvering zone (SMZ)

The objective here is to afford the robot with obstacle avoidance capability, while preserving the GUAC property of the path following controller. The idea is to treat the problem as a Guidance functionality allowing for switching from the *path-following target* ($\mathcal{T}_{PF}$) to the *obstacle avoidance target* ($\mathcal{T}_{OA}$), when necessary.

3.3.1 The safe maneuvering zone: principle

The closest proximity sensor information is considered, and the absolute position of the impact (intersection between proximity sensor/obstacle) is computed and stored, and denoted $\mathbf{C}_{OA}$. Note that $\mathbf{C}_{OA}$ is updated only if the closest sensor k provides $d_k < |\overline{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}|$. The SMZ is then defined as $\mathcal{S}_{OA}(r_S, \mathbf{C}_{OA})$, where r_S is, for the moment, the arbitrary chosen SMZ's radius.

We introduce a boolean variable σ_{OA} according to:

$$\begin{aligned} \sigma_{OA} &:= 1 \quad \text{if } [(\overline{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}| < 2r_S) \ \& \ (\psi_{PF} \in \mathcal{S}_{OA})], \\ \sigma_{OA} &:= 0 \quad \text{otherwise.} \end{aligned} \quad (12)$$

The condition $(\psi_{PF} \in \mathcal{S}_{OA})$ means that the ray starting from the robot with absolute direction ψ_{PF} crosses the circle $\mathcal{S}_{OA}$. The first condition in (12), expresses the fact that the closest impact $\mathbf{C}_{OA}$ is inside the SMZ circle. The second condition $(\psi_{PF} \in \mathcal{S}_{OA})$ denotes the situation where the *global path following heading reference* is crossing the SMZ, i.e. the path following controller drives the system within the SMZ. When both conditions are met, obstacle avoidance is necessary, $\sigma_{OA} = 1$, and the current reference switches from $\mathcal{T}_{PF}$ to $\mathcal{T}_{OA}$. On the other hand, the system is allowed to disengage from obstacle avoidance strategy when at least one of the condition is not met.

We also introduce another boolean variable Σ_{OA} that records the 'side' (portboard/starboard) where the first impact occurred. This 'side' will be kept until the necessity for obstacle avoidance vanishes (i.e. $\sigma_{OA} = 0$). Consider that the first closest impact has been given by the sensor k , then

$$\begin{aligned} \Sigma_{OA} &:= 1 \quad \text{if } [(\alpha_k \in [0, \pi]) \ \& \ (\sigma_{OA} = 1)], \\ \Sigma_{OA} &:= 2 \quad \text{if } [(\alpha_k \in [\pi, 2\pi]) \ \& \ (\sigma_{OA} = 1)], \\ \Sigma_{OA} &:= 0 \quad \text{otherwise.} \end{aligned} \quad (13)$$

Then, if $\sigma_{OA} = 1$, $\mathcal{T}_{OA}$ exists, and ψ_{OA} is chosen as one of the two directions of the tangent of $\mathcal{S}_{OA}$ on $\mathcal{T}_{OA}$. The direction of $\overrightarrow{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}$ is computed as $\psi_{\overrightarrow{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}} := \text{atan2}((y_{OA} - y), (x_{OA} - x))$, where $\text{atan2}()$ is the four quadrants arctangent computation function. The ψ_{OA} direction is chosen according to

$$\begin{aligned} \psi_{OA} &:= \psi_{\overrightarrow{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}} + \pi/2, & \text{if } [\Sigma_{OA} = 1], \\ \psi_{OA} &:= \psi_{\overrightarrow{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}} - \pi/2, & \text{if } [\Sigma_{OA} = 2]. \end{aligned} \quad (14)$$

This particular choice induces an interesting behavior. When the first detection is made on portboard (obstacle on the left side, $\Sigma_{OA} = 1$), the choice $\psi_{OA} = \psi_{\overrightarrow{\mathbf{P}_R \mathbf{C}_{OA}}} + \pi/2$ the system is contouring the obstacle by the right, and keep this strategy as far as $\sigma_{OA} = 1$. Similar strategy occurs when the initial detection is made on starboard. This is allowing for avoiding the known trap situation, called *corner situation* in Lapierre et al. (2007), where obstacles are present on both sides. This computation of ψ_{OA} induces a U-turn in such a situation. This implies that the ability of the vehicles to enter and maneuver into a narrow corridor, for example, depends on the size of the SMZ, i.e. r_S .

Moreover, an unbounded definition of the angles involved in the computation of the second condition of (12), i.e. $\{\psi, \psi_{PF}, \psi_{OA}\} \in [-\infty, +\infty]$, induces another interesting behavior. Since the vehicles are ‘keeping the contact’ with obstacles on the same side (portboard/starboard), they naturally find an issue from the entrance to the exit of a 2D maze, if the solution exists and, consecutively, contour the obstacles to converge again to the path, when $\sigma_{OA} = 0$. As a consequence a solution exists if there is a continuous region, free of obstacle, with a minimum width of $2r_S$.

Finally, the control is achieved in considering $\mathcal{T}_{OA}$ and $1/r_S$ instead of $\mathcal{T}_{PF}$ and c , within the control expression (11).

Now an interesting question arises: what performances are expected from this obstacle avoidance strategy? In the following, we propose a method to choose the size of the SMZ, r_S , such that the induced maneuver is guaranteed to be performed within a global amplitude less than r_S .

3.3.2 Choice of r_S

The aim of the following propositions is to find a method to choose the control gains and r_S , in order to guarantee that the avoidance is safely performed. This is achieved using a set of conditions, exposed in the following statements. The objective is to find a feasible solution. Optimization comes after.

Some preliminary remarks have to be exposed. Once the obstacle avoidance strategy is engaged, the robot converges to $\mathcal{T}_{OA}$, which lives on the SMZ boundary, i.e. a circle of radius r_S . By construction $\mathbf{C}_{OA}$, $\mathbf{P}_R$ and $\mathcal{T}_{OA}$ are aligned. We conclude that $s_1 = 0$ and $y_1 = \|\mathbf{C}_{OA} \mathbf{P}_R\|$. Let denote the

initial instant when the obstacle avoidance is engaged as t_{OA}^0 , then $y_1(t_{OA}^0) = 0$, and let $\tilde{\theta}^0 = \theta(t_{OA}^0) - \delta(t_{OA}^0)$ denotes the initial angle of incidence of the robot with respect to the SMZ tangent.

Proposition 2 *The controller exposed in (8) induces trajectories that remain within the maneuvers induced by the unsaturated version of the path following controller (5). That is, given a system situation (y_1, s_1, θ) , the resulting saturated control computation (8) induces a trajectory with a higher curvature than with (5), i.e.:*

$$\left| \frac{r_{PF}}{u_{PF}} \right| > \left| \frac{r_{PF}}{u_d} \right|, \quad \forall t > t_{OA}^0. \quad (15)$$

In other words, the use of (8) does not drive the system closer to the obstacle, than using (5). The rationale of this argument is to exploit the GEC property of (5), which induces maneuvers that bound the trajectories induced with (8). Hence, proving that $y_1(t) < r_S - B_S$, $\forall t > t_{OA}^0$, where B_S plays the role of a security margin, with (5) is enough to prove that the system remains at a minimum distance of B_S from obstacle, using (8).

Proof The idea is to find the condition on the choice of the control gains, K_2 and k_3 , such that the curvature of the trajectories induced by (5) is always smaller than the one obtained with (8). This is expressed by condition (15).

Using the expression of (5) and (8), and their respective developments, we can equivalently rewrite Condition (15) as:

$$a \cdot b \cdot k_3 \tanh(|\theta - \delta|) > K_2(|\theta - \delta|) \quad (16)$$

where $a = \frac{1 + \frac{1}{4} + L f_r^2}{1 + \frac{1}{4}}$ and $b = \frac{R w_{\max} - \frac{L}{4}}{R w_{\max} - \frac{L}{4} - L g_r^2}$, which under the conditions (10) are both bigger than 1. When obstacle avoidance is engaged, the maximum value achieved by $\theta - \delta$ is $\pi/2$, hence (16) is true if:

$$k_3 > K_2 \left(1 + \frac{\pi^2}{4} \right). \quad (17)$$

□

Conditions (10) have also to be considered, which with obstacle avoidance particularity ($s_1 = 0$) can be expressed as $k_3 < \frac{R}{L} w_{\max}$. Then global condition on the gain k_3 , expressed as:

$$\frac{R}{L} w_{\max} > k_3 > K_2 \left(1 + \frac{\pi^2}{4} \right), \quad (18)$$

restricts the range of admissible values for k_3 .

Since the previous argument, we can now use the exponential convergence property of the guidance error $(\theta - \delta)$, induced by the control (5),

$$\begin{aligned} (\dot{\theta} - \dot{\delta}) &= -K_2(\theta - \delta) \Rightarrow \\ \theta(t) &= \tilde{\theta}_0 e^{-K_2 t} + \delta(t), \quad \forall t > t_{OA}^0. \end{aligned} \quad (19)$$

Proposition 3 The control (5) induces a bounded behavior of y_1 , for which an upper bound $Y^{max} > |y_1|$ is computable.

Proof Combining (3) and (19) with the following particular definition for the approach angle:

$$\delta = -\arctan(k_\delta y_1) \quad (20)$$

yields to the differential relation:

$$\dot{y}_1 = \frac{u_d}{\sqrt{1 + (k_\delta y_1)^2}} (\sin(\tilde{\theta}_0 e^{-K_2 t}) - \cos(\tilde{\theta}_0 e^{-K_2 t}) k_\delta y_1). \quad (21)$$

Since all the multiplicative terms are bounded, it is clear that y_1 is bounded, as expected. In the absence of other criterion to consider (e.g. energy consumption) the highest rate of convergence is obtained with k_δ big, and K_2 maximum, i.e. $K_2 = \frac{R w_{max}}{L}$. Recall that k_δ defines the slope of the system approach to the path. Hence, a high value for k_δ induces a perpendicular approach to the path for small values of y_1 . In the discretized environment of the processor onto which the algorithm is implemented, this choice may induce an undesired chattering behavior. This point has to be deeper investigated. The computation of the upper bound y_1^{max} is performed using a numerical resolution of $\frac{\dot{y}_1}{u_d}$, for different values of $k_\delta \in [0.1, 10]$ and $K_2 = \frac{R w_{max}}{L}$. Given system parameters, e.g. $R = 0.1$ m, $L = 0.25$ m and $w_{max} = 10\pi$ rad/s, (21) is solved, and the maximum value of $y_1^{max}(k_\delta)/u_d$ is computed and stored. Figure 4 shows the expected maximum penetration of the system within the SMZ, i.e. y_1^{max}/u_d , versus the guidance's gain of the desired approach, i.e. k_δ . Clearly the best behavior is achieved for big k_δ , and admits a lower bound. This lower bound corresponds to the limit situation for $k_\delta \rightarrow \infty$, where the dynamics of the intrusion responds to $\dot{y}_1|_{k_\delta \rightarrow \infty} = -\cos(\tilde{\theta}_0 e^{-K_2 t})$. Hence, given system parameters R , L and w_{max} , the slope of the desired approach k_δ and the desired forward velocity u_d , an upper bound to the maximum intrusion is computable, referring to Fig. 4, and $Y^{max} = [\frac{y_1^{max}}{u_d}](k_\delta)u_d$. $\square$

Hence, given a safety margin B_S , the radius of the SMZ is chosen as:

$$r_s = Y^{max} + B_S. \quad (22)$$

3.3.3 Some illustrative simulations

We illustrate the performances of the solution using the path depicted at Fig. 5. The considered system and control parameters are given at Table 1 considered, where $k_3 < \frac{R w_{max}}{L} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4}}$, according to the previous argument.

The evolution of the system velocities are drawn at Fig. 6 and indicates the respect of the saturation constraint (7).

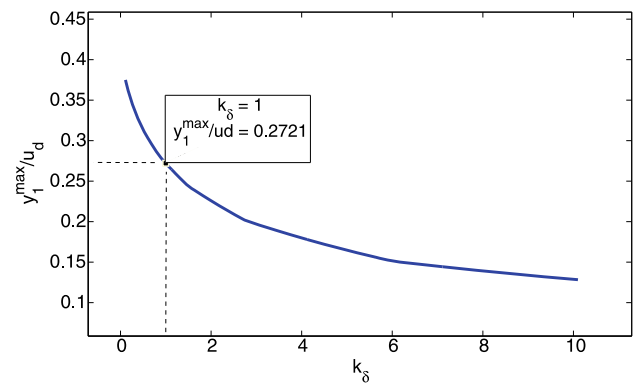


Fig. 4 Maximum penetration within the SMZ, versus the approach parameter k_δ

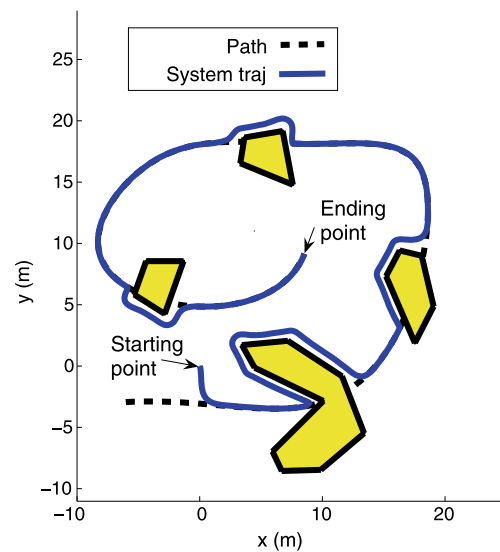


Fig. 5 System trajectory

Table 1 System and control parameters

$R = 0.1$ m	$L = 0.25$ m	$w_{max} = 10 \cdot \pi$
$k_3 = 3.5$	$k_\delta = 1$	$k_1 = 1$

Finally, Fig. 7 shows the evolution of the variables y_1 and the minimum distance to the obstacles, when obstacle avoidance strategy is engaged. Clearly the system does not get closer to the obstacle than $B_S = 0.5$ m, and the maximum penetration within the DVZ does not exceed the expected bound, i.e. $Y_{max} = 0.2721 \cdot u_d = 0.5442$ m.

Figures exposed in Fig. 8 decompose the system trajectory with respect to some particular instants. Figure 8(a) illustrates the system behavior, approaching the desired path and tracking the path following virtual target T_{PF} , far from any obstacle. Figure 8(b) shows the first instant when the proximeters detect an obstacle, at point denoted C_{OA} . The SMZ (S_{OA}), centered in C_{OA} with radius r_s , is built. Next

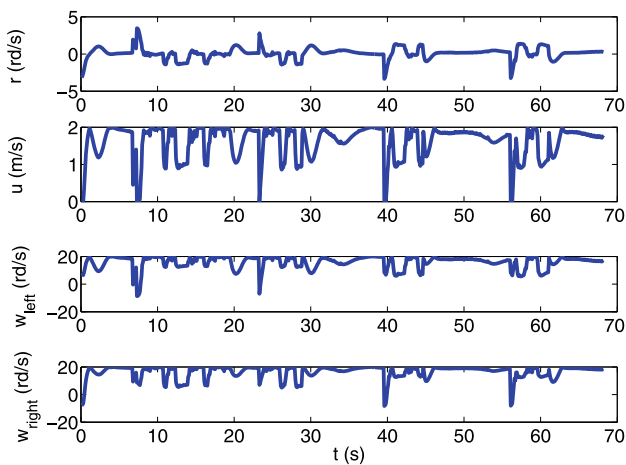


Fig. 6 System velocities

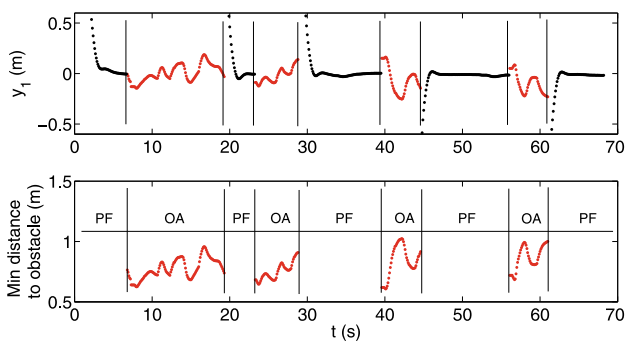


Fig. 7 Evolution of y_1 , and minimum distance to obstacle

Fig. 8(c) shows the evolution of the new virtual target T_{OA} , living on S_{OA} and positioned on the intersection of S_{OA} and $P_R C_{OA}$. Note that the path following virtual target T_{PF} continues its progression on the path, converging to the closest point between the robot and the path, as expected with the path following virtual target controller (11). Figure 8(d) shows a change in C_{OA} , while another part of the obstacle is getting closer. Note the orientation of the absolute path following heading ψ_{PF} that still crosses the S_{OA} , that keeps the obstacle avoidance behavior engaged. The vehicle is then following the obstacle, as shown at Fig. 8(e). In fact, in this situation, the system is memorizing the actual C_{OA} , which is updated only if a closer detection occurs. If for any reason, the obstacle vanishes (e.g. dynamic obstacle) the system will keep considering the actual C_{OA} and turn around it until the condition of disengagement from Obstacle Avoidance to Path Following is filled. This behavior is illustrated Fig. 8(f), where the robot is contouring a salient angle of the obstacle. In this situation, the desired system trajectory is a portion of the circle S_{OA} . Figure 8(g) shows the instant when the orientation of the path following desired heading ψ_{PF} leaves the circle S_{OA} , consequently disengaging the Obstacle Avoidance behavior, and tracking now the path following virtual

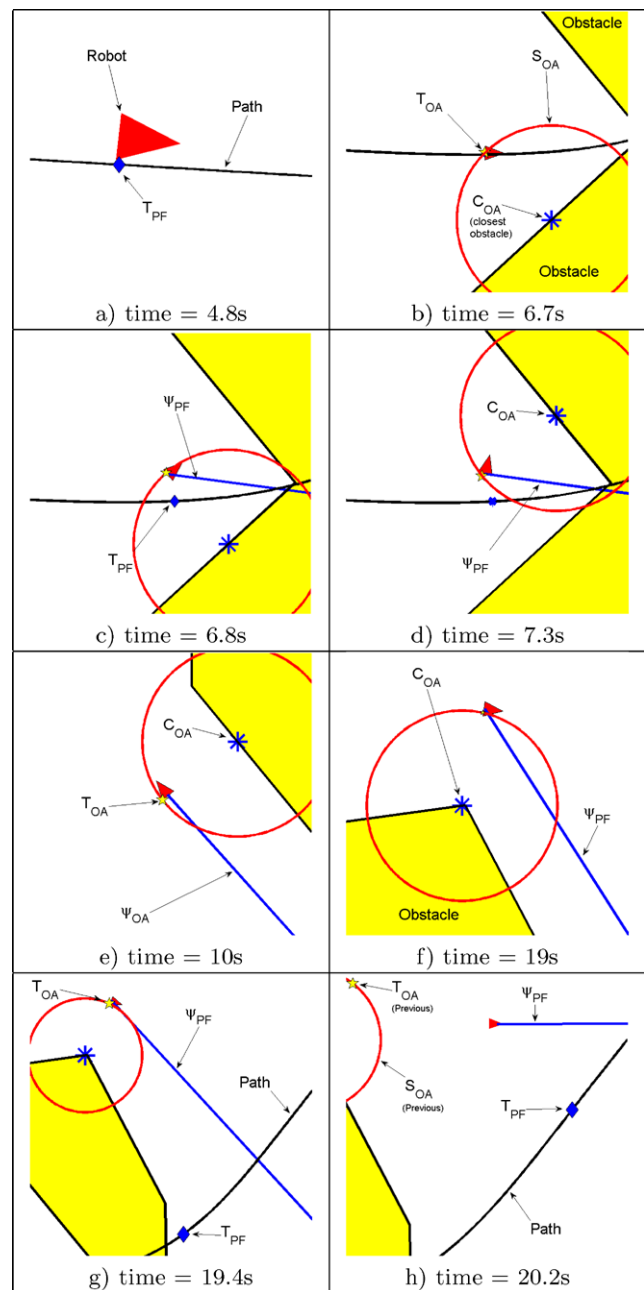


Fig. 8 Snapshots of the simulation

target T_{PF} . Note that during the Obstacle Avoidance behavior, the path following virtual target was still continuing its progression on the path. Then, as described at Fig. 8(h) the robot meets the path following virtual target T_{PF} , after having contoured the obstacle.

4 Conclusion

This paper proposes a solution to the control of movement of a unicycle-type robot, including path-following and obstacle avoidance, while respecting the actuation saturation

constraint. The goal is to provide a solution with guaranteed performances. That is, in our context, to drive the system to globally, uniformly and asymptotically converge to the path, when possible, and contour the unpredicted obstacles, respecting a minimum distance between the robot and the obstacle. This guaranteed minimum distance is a function of the system capability, in terms of actuation saturation constraint. Illustrative simulated examples are given.

An extension of this work will use the virtual target principle to generalize the method to multiple-vehicles system, including collision avoidance capability, in the presence of communication delay in the necessary information to exchange within the formation.

References

- Aguiar, A. P., Atassi, A., & Pascoal, A. M. (2000). Regulation of a non-holonomic dynamic wheeled mobile robot with parametric modeling uncertainty using Lyapunov function. In *The Proceeding of CDC 2000, 39th IEEE conference on decision and control*, Sydney, Australia.
- Arrichiello, F., Chiaverini, S., Pedone, P., Zizzari, A., & Indiveri, G. (2009). The null-space based behavioral control for non-holonomic mobile robots with actuators velocity saturation. In *The proc. of the IEEE international conference on robotics and automation* (pp. 4019–4024), Kobe, Japan.
- Astolfi, A. (1999). Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control. *Journal of Dynamics, Systems, Measurement and Control*, 121, 121–126.
- Brockett, R. W. (1983). Asymptotic stability and feedback stabilization. In R. W. Brockett, R. S. Millman, H. J. Sussman (Eds.), *Differential geometric control theory* (pp. 181–191). Boston: Birkhäuser.
- Canudas de Wit, C., & Sordalen, O. (1992). Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37, 1791–1797.
- Canudas de Wit, C., Khenouf, H., Samson, C., & Sordalen, O. (1993). Nonlinear control design for mobile robots. In Y. F. Zheng (Ed.), *World scientific series in robotics and automated systems: Vol. 11. Recent trend in mobile robots*.
- Elnagar, A., & Hussein, A. (2002). Motion planning using Maxwell's equations. In *The proc. of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, Lausanne, Switzerland.
- Encarnacao, P., Pascoal, A., & Arcaç, M. (1992). Path following for autonomous marine craft. In *Proceedings of the 5th IFAC conference on marine craft maneuvering and control, MCMC'00* (pp. 117–122), Aalborg, Denmark.
- Fierro, R., & Lewis, F. (1994). Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics. In *Proceedings of the 33rd conference on decision and control*, Florida, USA.
- Freund, E., & Mayr, R. (1997). Nonlinear path control in automated vehicle guidance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(1), 49–60.
- Ge, S., & Cui, Y. (2000). Path planning for mobile robots using new potential functions. In *Proc. of the 3rd Asian control conference*, July 4–7, Shanghai, China.
- Godhavn, J. M., & Egeland, O. (1997). A Lyapunov approach to exponential stabilization of nonholonomic systems in power form. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(7), 1028–1032.
- Hespanha, J. P. (1996). Stabilization of nonholonomic integrators via logic based switching. In *The proceedings of the 13th world congress of IFAC* (Vol. E, pp. 467–472), San Francisco, CA, USA.
- Indiveri, G., Paulus, J., & Ploger, P. G. (2009). Motion control of Swedish wheeled mobile robots in the presence of actuator saturation. In *Lecture notes in computer science* (Vol. 4434, pp. 35–46). doi:10.1007/978-3-540-74024-74.
- Iniguez, P., & Rossel, J. (2002). A hierarchical and dynamic method to compute harmonic functions for constrained motion planning. In *The proc. of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, Lausanne, Switzerland.
- Jiang, Z., & Nijmeijer, H. (1999). A recursive technique for tracking control of nonholonomic systems in the chained form. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(2), 265–279.
- Jiang, Z. P., Lefeber, E., & Nijmeijer, H. (1998). Stabilization and tracking of a nonholonomic mobile robot with saturating actuators. In *The proc. the third Portuguese conference on automatic control (CONTROLO'98)*, Coimbra, Portugal.
- Krstić M., Kanellakopoulos I., & Kokotovic P. (1995). *Nonlinear and adaptive control design*. New York: Wiley.
- Lapierre, L., & Indiverri, G. (2007). Path-following control of a wheeled robot under actuation saturation constraints. In *Proceedings of the IAV'07 conference*, Toulouse, France.
- Lapierre, L., Soetanto, D., & Pascoal, A. (2006). Nonsingular path following control of a unicycle in the presence of parametric modeling uncertainties. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 16, 485–503. doi:10.1002/rnc.1075.
- Lapierre, L., Zapata, R., & Lepinay, P. (2007). Combined path following and obstacle avoidance control of a wheeled robot. *The International Journal of Robotics Research*, 26(4), 361–375. doi:10.1177/0278364907076790.
- Lapierre, L., Zapata, R., & Bibuli, M. (2010). Guidance of a flotilla of wheeled robots: a practical solution. In *Proceedings of the IAV'10 conference*, Lecce, Italy.
- Louste, C. (1999). Conception d'une methode de planification pour robot mobile selon la methode des milieux continus appliquee aux fluides visqueux. Ph.D. Thesis nb 6701, LIRMM, Montpellier (1999) (in French).
- Micaelli, A., & Samson, C. (1992). Path following and time-varying feedback stabilization of a wheeled robot. In *The Proceedings of the international conference ICARCV'92*, Singapore.
- Micaelli, A., & Samson, C. (1993). Trajectory tracking for unicycle type and two steering wheels mobile robots (Technical Report No. 2097). Sophia-Antipolis: INRIA.
- Samson, C., & Ait-Abderrahim, K. (1991). Mobile robot control. Part 1: Feedback control of a non-holonomic mobile robots (Technical Report No. 1281). Sophia-Antipolis, France: INRIA.
- Sgorbissa, A., Capezio, F., Zacaria, R., Rebora, A., & Campani, M. (2010). A minimalist approach to path-following among unknown obstacles. In *The proc. of the IEEE international conference on intelligent robots and systems*, Taipei, Taiwan.
- Walsh, G., Tilbury, D., Sastry, S., & Laumond, J. P. (1994). Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(1), 216–222.
- Zapata, R., Cacitti, A., & Lepinay, P. (2004). DVZ-based collision avoidance control of non-holonomic mobile manipulators. *JESA, European Journal of Automated Systems*, 38(5), 559–588.



Lionel Lapierre received his Ph.D. degree in Robotics, from the University of Montpellier 2, Montpellier, France, in 1999. Then, he joined the team of Professor A. Pascoal within the European project FreeSub for three years. Since 2003, he has been with the Underwater Robotics Division, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), Montpellier, France.



Rene Zapata is professor at the University Montpellier II (FRANCE) in the *Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM UMR 5506)* since 1983. He works in the Robotics Department of LIRMM in the fields of Robot Control, Motion Planning and Path Planning, Robot Cooperation and Robot Localization applied to mobile robots (ground robots, flying robots and humanoids). He is interested in the non-linear control of mobiles robots and more especially in the design of algorithms for controlling the reactive behaviors of multi-robots moving in unknown and dynamic environments. He teaches Theory of control, mathematics and robotics at Master level at the university Montpellier II.

Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV

Lionel Lapierre and Bruno Jouvencel

Abstract—This paper develops a robust nonlinear controller that asymptotically drives the dynamic model of an autonomous underwater vehicle (AUV) onto a predefined path at a constant forward speed. A kinematic controller is first derived, and extended to cope with vehicle dynamics by resorting to backstepping and Lyapunov-based techniques. Robustness to vehicle parameter uncertainty is addressed by incorporating a hybrid parameter adaptation scheme. The resulting nonlinear adaptive control system is formally shown and it yields asymptotic convergence of the vehicle to the path. Simulations illustrate the performance of the derived controller.

Index Terms—Adaptive control, nonlinear control, path following, underactuated vehicle.

I. INTRODUCTION

THE design of a nonlinear path-following controller autonomous underwater vehicle (AUV) involves two different problems: the path-following strategy and the control of an underactuated vehicle.

A. Path Following

Path following requires the vehicle to reach and follow a desired path without time constraint. This is done by controlling the forward speed to converge to a desired value (constant in our case), and acting on the vehicle's orientation to drive it onto the path. The problem is considered to be solved when the designed controller guarantees asymptotic convergence to the path. Many papers have addressed the problem of path-following control for a nonholonomic wheeled vehicle, in most cases a unicycle-type robot [25], [33], [34]. The underlying questions to be solved concern the following.

- 1) *Path parameterization.* If the path can be considered as straight lines or circles, classic geometrical description may be used to parameterize the path and in the control design [22], [28], [31]. The most general parameterization considers the curvature of the path as a function of the curvilinear abscissa of the target point [20], [33], [34].
- 2) *Choice of the target point on the path.* The choice of the target point implies different control strategies. In [33], the target point is designed to be the closest point on the path, relative to the current position of the robot. This allows a rapid convergence to the path, since the distance to the path

is minimal. However, this method implies a drastic limitation to the robot's initial conditions. Since the target point is defined with respect to the current position of the robot, it has to be updated at each instant, and problems occur when the robot is located at the center of the path curvature (the target point is no longer unique) or during a movement that potentially passes close to it (the computation of the current reference is not well posed). To solve this problem, a very conservative but necessary condition is used: the initial position of the robot must be such that the initial distance to the path is *smaller than the smallest radius of curvature present on the path*. Another solution [24], [39] consists in considering the target point as a virtual moving target, animated on the path with its own movement laws. To ensure cooperative behavior of the target (slowing down when the vehicle is behind and accelerating when the vehicle is in advance), the movement equations of the target are related to the speed of the robot. This implies that the target exponentially converges to the closest point on the path, with the difference that the target point is now well defined, even if the vehicle crosses the current center of curvature. The previous constraint is relaxed into the following: the initial position of the vehicle should be *far from the center of curvature relative to the initial position of the target point on the path*.

B. Control of an Underactuated Vehicle

An increasing number of papers have addressed the topic of the control of ocean vehicles. Vehicles designed to accomplish long-range missions (AUVs, ships) are generally underactuated, or in the case of fully actuated vehicles, the inefficiency of a side thruster during high-speed forward movement leads them to be considered as underactuated. This implies that transverse movement (sway) is not directly controlled.

In the case of a wheeled robot, the transverse ground friction of the wheels, expressing the nonholonomic constraint, effectively cancels this behavior. Nevertheless, in underwater or terrestrial plane applications, the control inputs are the same: the forward and yaw speeds. This explains the connection between unicycle-type robots and AUV path-following control strategies. For a unicycle-type robot path-following control, please refer to [31], [33], [34], and [23].

The similarity between these two vehicles ends on considering that the resulting total speed of the underwater robot is not aligned with its main direction of movement. This implies that the AUV heading is not permanently tangent to its trajectory, but the strategy of controlling the amplitude and the orientation of the total speed holds, underlying the added necessity of having a measurement, or a satisfactory estimation, of the sway speed [21], [26]. Path-following systems for marine vehicles have been reported by Encarnacao *et al.* in [18] and

Manuscript received January 5, 2006; revised May 31, 2007; accepted March 28, 2008. Current version published October 31, 2008. This work was supported by the European Council under European Project FREESUB.

Associate Editor: D. J. Stilwell.

The authors are with the Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) Institute, Montpellier 34392, France (e-mail: lapierre@lirmm.fr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JOE.2008.923554

[19], where the underlying assumption was that the vehicle's forward speed tracks a desired speed profile, while the controller acts on the vehicle's orientation to drive it to the path. Typically, smoother convergence to a path is achieved, in comparison with performances obtained with a trajectory-tracking controller, and the control signals are less often pushed to saturation [17].

Because the AUV controller relies on a dynamic model of the system, the performances achieved are dependent on the accuracy of the estimation of model parameters. Nevertheless, precise modeling for an AUV is a difficult task, and it results in a set of highly coupled nonlinear equations. For more information on a subject of modeling, the reader should refer to [16] and [15].

Designing a controller to regulate such a nonlinear model is not a simple process, and classic linear approaches do not lead to satisfactory performances [14]. Meanwhile, Silvestre *et al.* [13] propose a gain-scheduled trajectory-tracking controller, based on the fact that the linearization of the system dynamics about trimming trajectory (helices parameterized by the vehicle's linear speed, yaw rate, and flight path angle) results in a time-invariant plant. Then, considering a global trajectory consisting of the piecewise union of trimming trajectories, the problem is solved by designing a family of linear controllers for the linearized plants at each operating point. Interpolating between these controllers guarantees adequate local performance for all linearized plants. Nevertheless, this methodology does not explicitly address the issues of global stability and performance.

Because model estimation accuracy cannot be absolutely guaranteed, the robustness of the control scheme is of major importance. One of the classic control methods relies on the sliding-mode design [12]. In [11], Salgado *et al.* propose a control design applied to the Taipan 2 AUV, based on an high-order sliding mode, that explicitly addresses the classic chattering problem encountered when using the classic sliding mode. This is achieved by controlling high-order derivatives of the sliding surface, thus removing the discontinuity of the control vector. This method exhibits robust behavior, but the equivalent control is designed using a linearized method that does not allow for global stability and performance analysis. In [8], Song *et al.* combine the sliding-mode advantages with a fuzzy approach expressing the switching rules based on the experimental data. The authors say this method is independent of any system model. Nevertheless, global stability and performance are not addressed. Naem *et al.* [10] and [9] propose a control based on model prediction using genetic algorithms, but the performances and stability properties are not addressed.

Considering model nonlinearities, the Lyapunov approach has many advantages. The first step allows for designing a control solution that takes into account the system kinematics and meets uniform asymptotic convergence requirements. As we will see in the sequel, the concurrent use of the virtual target principle allows for expressing the problem in a nonsingular way, thus guaranteeing the respect of the convergence property whatever the initial conditions are, and meeting a global and uniform asymptotic convergence requirement. The second step consists in using the backstepping approach [7], augmenting the system with its dynamic states, and still meeting global performance requirements. For an application of this method to

an underactuated marine system, please refer to [17]. Another backstepping stage allows parameter uncertainty to be taken into account, in designing an adaptive scheme that guarantees robustness. It should be noted that this method is valid if the parameters appear in an affine form in the control expression. An application to a nonholonomic wheeled system can be found in [4]. The particularity of an AUV system is its underactuation, which leads to a Lyapunov-based control expression, with parameters that do not appear in an affine form [6]. Existing solutions are based on a model simplification, reducing the problem to a multivariable linear system [5], [15], [3], or using a McLaurin series expansion of the trigonometric terms around a well-chosen guidance function [2]. Obviously, these existing methods do not allow for establishing the global convergence property of the solution.

C. Paper Description

The problem formulation is described in Section II. Section III describes the design of an asymptotically convergent kinematic control (Section III-A), extended to cope with vehicle dynamics (Section III-B) by resorting to backstepping and Lyapunov-based techniques (for details on this topic, please refer to [30]). The computation of such a control is shown in Section III-C and it provides a limitation of robot design. Robustness to uncertainty in the parameters of vehicle dynamics is addressed by incorporating a hybrid parameter-adaptation scheme (Section III-D). Section IV provides simulation results of the previously described controllers. Section V contains the conclusions and explanation of future work concerning this subject. It should be noted that this paper does not explicitly address the disturbance rejection problem (e.g., ocean current, waves effect, etc.).

II. PROBLEM FORMULATION

This section introduces some basic notation, presents the kinematic equations of motion for an underactuated mobile robot, and formalizes the problem of driving the robot along a desired path, in the horizontal plane. The first part (Section II-A) shows the notations adopted throughout this paper. Section II-B describes the underactuated underwater robot, as depicted in Table II. Section II-C presents the kinematic equations of the system. Section II-D briefly presents the dynamic model of the robot. Finally, Section II-E states the problem of finding a controller that guarantees convergence to a desired path, taking into account the parametric uncertainties.

A. Notation

Throughout this paper, the following notations will be used.

$\{A\}$ $:= \{x_A \ y_A \ z_A\}$. Reference frame with the origin in A . We let $\{0\}$, $\{F\}$, and $\{B\}$ be the inertial, Serret-Frenet, and body axis frames, respectively.

$p_{A/B}$ $= [x_{A/B} \ y_{A/B} \ z_{A/B}]^T$. Position of the frame $\{A\}$ in relation to $\{B\}$. Note that $\dot{p}_{A/B}^C = [\dot{x}_{A/B}^C \ \dot{y}_{A/B}^C \ \dot{z}_{A/B}^C]^T$ represents the speed of the frame $\{A\}$ in relation to $\{B\}$ expressed in $\{C\}$.

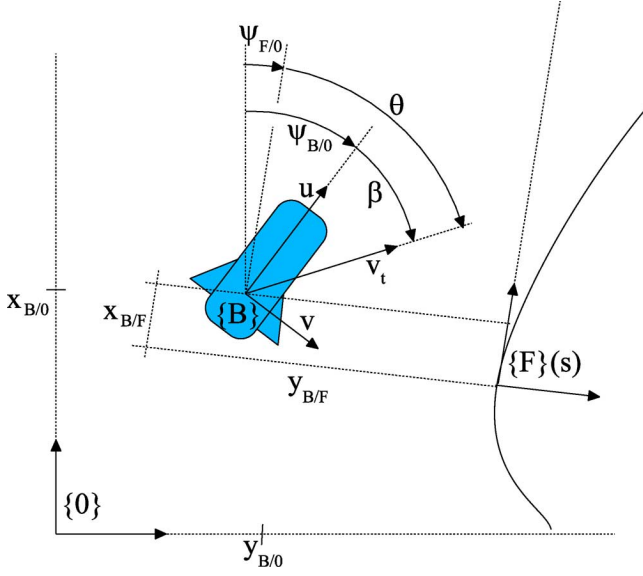


Fig. 1. Frame definition and description of the problem posed.

$\Psi_{A/B}$ Orientation of $\{A\}$ in relation to $\{B\}$, and $\dot{\Psi}_{A/B}$ the angular speed of $\{A\}$ in relation to $\{B\}$.

R_A^B Rotational matrix from $\{A\}$ to $\{B\}$.

Note that because the study takes place in the horizontal plane, $z_{A/B} = \text{constant}$ and $\dot{z}_{A/B}^C = 0, \forall(A, B, C)$.

B. Vehicle Description

The vehicle has two identical rear thrusters, mounted symmetrically with respect to its longitudinal axis of symmetry. Each thruster generates a control force F_i , $i = 1, 2$, and a torque that we consider negligible. The common action mode of the thrusters results in a forward force F , and their differential action mode generates a torque Γ . $[\Gamma F]^T$ defines the dynamic system input.

We assume that the vehicle is neutrally buoyant and that its metacenter coincides with the origin of $\{B\}$. $p_{B/0}$ specifies the absolute position of the origin of $\{B\}$ in $\{0\}$, and $\Psi_{B/0}$ is the parameter that represents the orientation of $\{B\}$ with respect to $\{0\}$, the yaw angle. $\dot{p}_{B/0}^B = [u \ v \ 0]^T$ denotes the absolute speed of $\{B\}$ with respect to $\{0\}$, expressed in the body frame. u and v are the longitudinal (surge) and transverse (sway or sideslip) speeds, respectively. $\dot{\Psi}_{B/0} = r$ represents the heading speed (Fig. 1). We also define the sideslip angle as

$$\beta = \arctan(v/u). \quad (1)$$

Note that the well-posedness of this expression requires the following assumption:

$$|u| + |v| \neq 0 \Leftrightarrow v_t^2 = u^2 + v^2 \neq 0 \quad \forall t$$

where v_t is the AUV's total speed. Note that the control of an AUV system implies considering a permanent positive speed, therefore the previous condition is covered by the following:

$$v_t > 0 \quad \forall t. \quad (2)$$

C. Kinematic Model of the Robot

The kinematic model relates the inertial speed expressed in the body frame $\{B\}$ with the one expressed in the inertial frame $\{0\}$, through the equation $\dot{p}_{B/0}^0 = R_{B/0}^0 \cdot \dot{p}_{B/0}^B$. Extracting the meaningful relations yields

$$\begin{aligned} \dot{x}_{B/0}^0 &= u \cos(\Psi_{B/0}) - v \sin(\Psi_{B/0}) \\ \dot{y}_{B/0}^0 &= u \sin(\Psi_{B/0}) + v \cos(\Psi_{B/0}) \\ \dot{\Psi}_{B/0} &= r. \end{aligned} \quad (3)$$

Note that $[u \ r]^T$ defines the kinematic system inputs.

D. Dynamic Model of the Robot

The dynamic model of the chosen robot is the classical one described in (4). A complete model of the Infante AUV, developed at the DSOR,¹ is described in [36]

$$\begin{aligned} F &= m_u \dot{u} + d_u \\ 0 &= m_v \dot{v} + m_{ur} ur + d_v \\ \Gamma &= m_r \dot{r} + d_r \end{aligned} \quad (4)$$

with

$$\begin{aligned} m_u &= m - X_{\dot{u}}, & d_u &= -X_{uu} u^2 r - X_{vv} v^2 \\ m_v &= m - Y_{\dot{v}}, & d_v &= -Y_{vv} v^2 - Y_{|v|} |v| |v| \\ m_r &= I_z - N_{\dot{r}}, & d_r &= -N_{vv} v^2 - N_{|v|} |v| |v| - N_r ur \\ m_{ur} &= m - Y_r \end{aligned}$$

where m denotes the system mass, I_z is the moment of inertia with respect to the z -axis, and $X_{..}$, $Y_{..}$, and $N_{..}$ are the hydrodynamic derivatives of the system. For more information on the modeling of the Infante vehicle, please refer to [36]. Note that $[F \Gamma]^T$ defines the dynamic system inputs.

E. Problem Formulation

1) *Side-Slipping Vehicle Control*: The laws of mechanics show that the trajectory of a moving object is fully related to the amplitude and the orientation of its total speed. These variables must be driven to a desired value to control the trajectory. The control strategy depends on the type of actuation mounted. From the actuation point of view, there exists a visible similarity between the underactuated underwater robot described in Section II-D and the classic nonholonomic wheeled unicycle-

¹The Dynamical Systems and Ocean Robotics laboratory is located at the Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon, Portugal. Available: <http://dsor.isr.ist.utl.pt/Introduction/index.html>

type robot. The main difference is that the nonholonomic constraint, active in the wheeled robot, is relaxed in the underactuated system. The direct consequence is that the total speed of a unicycle-type robot is permanently equal to its forward speed u , while the total speed of an underactuated vehicle results from both surge and sway components u and v [see (2)].

The path-following problem is solved for the unicycle-type robot by designing a control that drives the vehicle onto the path and then insures that the orientation of the forward speed u stays tangent to the path. In the case of an underactuated vehicle, this is no longer valid. The transverse component of the speed implies that the robot is not aligned with its total speed, so while the unicycle case is solved by controlling the forward speed u , the underactuated case requires the control of the total speed v_t defined in (2). Designing a controller for a sideslipping vehicle implies driving the amplitude and the orientation of the total speed to desired values, defined with respect to the path that the robot must reach and follow. The related variables are $\|v_t\|$ and $\theta = \beta + \Psi_{B/F}$. This implies a design limitation on a submarine robot controlled in this way, which is shown in Section III-C. It is because the kinematic controller involves a computation of $\dot{\beta}$, therefore a computation of $\dot{u}$ and $\dot{v}$, the longitudinal and transverse accelerations of the robot. Relying on the dynamic model injects dynamic parameters at the kinematic level. The backstepping process, used to design the dynamic control from the kinematic solution, reveals the necessary computation of $\ddot{\beta}$, hence $\ddot{u}$ and $\ddot{v}$, the transverse and longitudinal system jerks. Once again, this is achieved using the dynamic model, and it implies deriving longitudinal and transverse acceleration expressions from the dynamical model. This emphasizes the limit of the hypothesis made during the drawing up of the dynamical model, especially the neglected high-order terms. On the other hand, a hybrid adaptation scheme can be designed (Section III-D) that relaxes the necessity for high accuracy in the estimation of the constant model parameters.

2) *Path Following*: To derive a controller for a path-following problem, the equations of the system must be derived relative to a given path, and the goal of the controller is to drive the robot to reach and follow the path, without time constraint. The parameterization of the problem is illustrated in Fig. 1. Referring to Fig. 1, given any point F on the path, a controller that drives θ to 0, as $x_{B/F}$ and $y_{B/F}$ go to 0, solves the path-following problem. The difference in the strategies that can be adopted concerns the definition of point F . In [33], point F is defined as the closest point on the path with respect to the current position of the robot. In this case, the line (BF) is always perpendicular to the path tangent on F . Thus, the parameterization of the problem is simpler, convergence is guaranteed when $\|BF\|$, and θ are driven to 0. However, this method implies a singularity when point B is located at the center of the path curvature, at point F (θ is undefined). Locate point F by its curvilinear abscissa s_F , and name $c_c(s_F)$ the path curvature at this point. Then, the singularity occurs when $\|BF\| = 1/c_c(s_F)$. In addition, the analysis in [34] shows that global convergence is guaranteed only if $\|BF\| < 1/c_c^{\max}$ for all locations of F , and for $c_c^{\max}$ defining the maximum curvature encountered on the path. This is a very restrictive hypothesis that implies a considerable limitation on the initial

condition $\|BF\|_{t=0} < 1/c_c^{\max}$ and a poor disturbance rejection capability. Another solution consists in defining point F as a virtual moving target that describes the path. The movement control of this target introduces a supplementary virtual state into the system, but transforms the previous constraint to $\|BF\|_{t=0} \neq [c_c(s|_{t=0})]^{-1}$. The behavior of the virtual target (captured in the expression of $\dot{s}_F$) is chosen according to the derivation of Lyapunov functions in the backstepping process, and results in a very cooperative target that quickly converges to the closest point on the path. Expressed in the Serret-Frenet frame $\{F\}$, the kinematic equations of the problem are rewritten as

$$\begin{aligned}\dot{x}_{B/F} &= -\dot{s}_F (1 - c_c(s_F) y_{B/F}) + v_t \cos \theta \\ \dot{y}_{B/F} &= -c_c(s_F) \dot{s}_F x_{B/F} + v_t \sin \theta \\ \dot{\theta} &= r + \dot{\beta} - c_c(s_F) \dot{s}_F.\end{aligned}\quad (5)$$

3) *Mathematical Formulation*: Equipped with this formulation, we can now state the kinematic control problem C_1 that is addressed in Section III-A.

C_1 : Given the robot kinematic model (3), the robot dynamic model (4), and a set of available measurements coming from robot sensors, compute $U_{kin} = [u(\cdot) \ r(\cdot) \ s_F']^T$, so that $\theta, x_{B/F}$, and $y_{B/F}$ converge to 0 as t goes to ∞ .

This problem will be extended in Section III-B to explicitly deal with vehicle dynamics. The dynamic control problem C_2 is stated as follows.

C_2 : Given the robot kinematic model (3), the robot dynamic model (4), and a set of available measurements coming from robot sensors, compute $U_{dyn} = [F(\cdot) \ \Gamma(\cdot) \ s_F']^T$, so that $\theta, x_{B/F}$, and $y_{B/F}$ converge to 0 as t goes to ∞ .

Note that the validity of statement C_2 implies that there are no external disturbances, sensor noise, or unmodeled dynamics, and a perfect knowledge of the system parameters. Consider that there are no external disturbances, sensor noise, or unmodeled dynamics, but that the parameters are not perfectly known. Section III-C describes another version of the dynamic controller that guarantees robustness against parameter uncertainty and solves problem C_3 , stated as follows.

C_3 : Given the robot kinematic model (3), the robot dynamic model (4), a set of available measurements coming from robot sensors, and a set of reasonable estimations of the nine parameters of the dynamic model, compute $U_{dyn}^{Rbst} = [F(\cdot) \ \Gamma(\cdot) \ s_F' \ \dot{p}_i]^T$, so that $\theta, x_{B/F}$, and $y_{B/F}$ converge to 0 as t goes to ∞ .

The effects of external disturbance, sensor noise, or unmodeled dynamics are not treated in this paper. The solution consists in proving the boundedness of the system output in the presence of bounded external disturbance and unmodeled dynamics effect, and extracting from the expression of the bounded system output the meaningful information related to the performance of the controlled system.

A proposed solution for problems C_i ($i = 1, 2, 3$) is described in the following section.

III. CONTROLLER DESIGN

This section describes the solutions to problems C_1 , C_2 , and C_3 , stated in the previous section. In the following, we will extensively use a corollary of Barbalat's lemma (CBL), and LaSalle's theorem, stated as follows.

Barbalat's Lemma: If $f(t)$ is a double differentiable function such that $f(t)$ is finite as t goes to ∞ , and such that $\dot{f}(t)$ is uniformly continuous, then $\dot{f}(t)$ tends to 0 as t tends to ∞ .

Uniform Continuity Sufficient Condition: $\dot{f}(t)$ is uniformly continuous if $\ddot{f}(t)$ exists and is bounded.

Corollary of Barbalat's Lemma: If $f(t)$ is a double differentiable function such that $f(t)$ is finite as t goes to ∞ , and such that $\dot{f}(t)$ exists and is bounded, then $\dot{f}(t)$ tends to 0 as t tends to ∞ .

LaSalle's Theorem: Let Ω be a positively invariant set of the system described in (3) and (4). Suppose that every solution starting in Ω converges to a set $E \subset \Omega$ and let M be the largest invariant set contained in E . Then, every bounded solution starting in Ω converges to M as t tends to ∞ .

For details of Barbalat's lemma and its application, please refer to [37]. For demonstration and application of LaSalle's theorem, please refer to [35] and [29]. Note that the application of LaSalle's theorem is restricted to autonomous systems. In our situation, the fact that the desired forward speed is constant allows us to consider our system as autonomous.

A. Kinematic Controller

With the formulation developed previously, we may now state the following theorem.

Proposition 1: Consider the robot models (3) and (4) and let a desired approach angle be defined by

$$\delta(y_{B/F}) = -\theta_a \frac{e^{2k_\delta y_{B/F}} - 1}{e^{2k_\delta y_{B/F}} + 1} \quad (6)$$

where k_δ is a positive gain and $0 < \theta_a < \pi/2$. Further, assume that measurements of $[u \ v]^T$ are available from robot sensors and that a parameterization of the path is available such that given s_F , the curvilinear abscissa of a point on the path, the variables $\theta, x_{B/F}, y_{B/F}$, and $c_c(s_F)$ are well defined and computable. Then, the control law

$$U_{kin} = \begin{cases} r = \dot{\delta} - \dot{\beta} - K_1(\theta - \delta) + c_c(s_F)\dot{s}_F \\ \dot{s}_F = \cos \theta v_t + K_2 x_{B/F} \end{cases} \quad (7)$$

solves problem C_1 , with K_1, K_2 , and k_δ three arbitrary positive gains, the assumption that $v_t > 0, \forall t$, and given the initial relative position $[\theta, x_{B/F}, y_{B/F}]_{t=0}$.

Proof: The proof is structured in three parts. First, we show that the system asymptotically follows the reference angle δ . Then, we show that the reference asymptotically drives the robot onto the path. Finally, we use the LaSalle invariance principle to concatenate the two previous convergence properties.

Consider the following Lyapunov function $V_1 = (1/2)(\theta - \delta)^2$. It is straightforward to show that the choice of the control

$$r = \dot{\delta} - \dot{\beta} - K_1(\theta - \delta) + c_c(s_F)\dot{s}_F$$

yields $\dot{V}_1 = -K_1(\theta - \delta)^2 \leq 0$. That is, V_1 is a positive and monotonically decreasing function up to a well-defined limit

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_1 = l_1. \quad (8)$$

Simple derivation shows that $\ddot{V}_1 = 2K_1^2(\theta - \delta)^2$, which is bounded since (8). Then, using the CBL, we conclude that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1 = 0$. That is

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \delta|_{t \rightarrow \infty}. \quad (9)$$

The system asymptotically follows the reference $\delta(y_{B/F})$ defined in (6), so the trajectories of the system will asymptotically reach the invariant set E defined as

$$E := \left((x_{B/F}, y_{B/F}) \in \mathbb{R}^2, \dot{V}_1 = 0 \right). \quad (10)$$

For the sake of clarity, define $x = x_{B/F}, y = y_{B/F}$, and $s = s_F$, and recall (5). Study the trajectories of the system onto the invariant set E . Consider the Lyapunov candidate $V_E = (1/2)(x^2 + y^2), \forall (x, y) \in E$. It is straightforward to show that the choice

$$\dot{s} = v_t \cos \theta + K_2 x \quad (11)$$

leads to

$$\dot{V}_E = y v_t \sin \delta - K_2 x^2 < 0 \quad \forall ((x, y) \neq 0) \in E \quad (12)$$

since within the set $E : \theta = \delta$, we can state that $\text{sign}(\delta) = -\text{sign}(y)$, $\delta \in [-\theta_a, \theta_a]$, $0 < \theta_a \leq \pi/2$, using the assumption $\lim_{t \rightarrow \infty} v_t > 0$, covered by the necessary assumption for the definition of (2). Therefore, V_E is finite.

Moreover, it is straightforward to show that $\ddot{V}_E$ is bounded, and we use the CBL to prove that $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_E = 0$, which implies $\lim_{t \rightarrow \infty} y = 0$ and $\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0$, since (12). Hence, $(x, y) = (0, 0)$ is the unique stable point of E , and every trajectory of the system starting in E asymptotically converges to the origin.

We now use LaSalle's invariance principle. Let $\Omega = \mathbb{R}^2$. The first part of the proof showed that every solution starting in Ω asymptotically converges to E . The second step showed that the largest invariant set of E is $M = [(x, y) = 0]^2$, so every bounded solution starting in Ω converges to 0 as t tends to ∞ . ■

B. Dynamic Controller

The development of the dynamic control is based on the previous result, considering the kinematic control as a reference, called r_d , for the dynamic control

$$\begin{cases} r_d = \dot{\delta} - K_1(\theta - \delta) - \dot{\beta} + c_c(s)\dot{s} \\ \dot{s} = \cos \theta v_t + K_2 x_{B/F}. \end{cases} \quad (13)$$

Let $\epsilon_r = r - r_d$ and consider the Lyapunov candidate V_2

$$V_2 = K_5 V_1 + \frac{1}{2} \epsilon_r^2 + \frac{1}{2} (u - u_d)^2 \quad (14)$$

with K_5 being a positive gain. Simple computations show that

$$\begin{cases} \dot{r} = \dot{r}_d - K_3(r - r_d) - K_5(\theta - \delta) \\ \dot{u} = \dot{u}_d - K_4(u - u_d) \end{cases} \quad (15)$$

where $\dot{u}_d = 0$ in our study case. Recall that $\dot{\theta} = r - c_c \dot{s} + \dot{\beta}$, then

$$\dot{V}_2 = -K_1 K_5 (\theta - \delta)^2 - K_3 (r - r_d)^2 - K_4 (u - u_d)^2 \leq 0.$$

Note that this condition is more restrictive than necessary. The condition that the desired speed profile be invariant is enough. It is now straightforward to compute the control inputs F and Γ by solving the dynamics (4) to obtain

$$U_{\text{dyn}} = \begin{cases} \Gamma = m_r \left(\ddot{\theta} - \ddot{\beta} - (K_1 + K_3)(\dot{\theta} - \dot{\delta}) - (K_5 + K_1 K_3) \right. \\ \quad \left. \times (\theta - \delta) + c_c \ddot{s} + \frac{\partial c_c}{\partial s} \dot{s}^2 \right) + d_r \\ F = m_u (\dot{u}_d - K_4(u - u_d)) + d_u. \end{cases} \quad (16)$$

We can now state Proposition 2 that solves problem **C**₂.

Proposition 2: Consider the robot models (3) and (4) and the desired approach angle defined in (6), where k_δ is a positive gain and $0 < \theta_a < \pi/2$. Further, assume that measurements of $[u \ v \ r]^T$ are available from robot sensors and that a parameterization of the path is available such that, given s , the curvilinear abscissa of a point on the path, the variables $\theta, x_{B/F}, y_{B/F}, c_c, (\partial c_c / \partial s)$ are well defined and computable. Define u_d as the desired forward speed. Then, control law (16) and expression (7), with K_1, K_2, K_3, K_4 , and K_5 positive gains, the assumption that $v_t > 0, \forall t$, and given the initial relative position $[\theta, x_{B/F}, y_{B/F}]|_{t=0}$, solve problem **C**₂.

Proof: Considering the V_2 (14) Lyapunov function, and using the CBL, as previously, it is straightforward to show that

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \theta &= \delta|_{t \rightarrow \infty} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta} &= \dot{\delta}|_{t \rightarrow \infty} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} u &= u_d. \end{aligned}$$

Thus, the trajectories of the system will reach the invariant set E

$$E := \left((x_{B/F}, y_{B/F}) \in \mathbb{R}^2, \dot{V}_2 = 0 \right).$$

Using the same argument as that used in the previous proof (kinematic case) and the assumption that $v_t > 0$ proves the convergence of the system to the path. ■

C. Computation of the Control

The previous control U_{dyn} guarantees the asymptotic convergence to the path. Nevertheless, the terms appearing in (15)

are not trivially computable. In particular, the computation of $\ddot{\beta}$ refers to the evaluation of jerks $\ddot{u}$ and $\ddot{v}$ through

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{v_t^2} (\ddot{v}u - \ddot{u}v) - 2 \frac{\dot{v}_t}{v_t} \dot{\beta}. \quad (17)$$

Because it is not realistic to have any measurement of these quantities, the only solution is to rely on a derivation of the dynamic model such that

$$\begin{cases} \ddot{u} = \frac{1}{m_u} (\dot{F} - \dot{d}_u) \\ \ddot{v} = \frac{1}{m_v} (-m_{ur} \dot{u}r - m_{vr} \dot{v}r - \dot{d}_v). \end{cases} \quad (18)$$

This emphasizes the assumption made regarding the neglected dynamics of the system. Then, $\dot{r}$ is rewritten

$$\dot{r} = \frac{f_{\dot{r}_d} - K_3(r - r_d) - K_5(\theta - \delta)}{1 - \frac{m_{ur}}{m_v} (\cos \beta)^2}$$

where

$$\begin{aligned} f_{\dot{r}_d} &= \ddot{\delta} - K_1(\dot{\theta} - \dot{\delta}) + c_c \ddot{s} + g_c \dot{s} + \frac{\ddot{u}v}{v_t^2} \\ &+ \frac{2\dot{v}_t \dot{\beta}}{v_t} + \frac{u}{v_t^2} \left(\frac{m_{ur}}{m_v} \dot{u}r + \frac{\dot{d}_v}{m_v} \right). \end{aligned}$$

Then, the control is computed as

$$\Gamma = m_r \dot{r} + d_r.$$

For this expression to be well posed, it must be derived from the robot design parameter

$$\frac{m_{ur}}{m_v} = \frac{m - Y_r}{m - Y_v}.$$

Analyzing the signs of the hydrodynamic parameters as in [1], we know the following:

- Y_v is always negative;
- Y_r is positive if the stern dominates;
- Y_r is negative if the bow dominates.

Thus, in the case of a stern dominant vehicle, the control computation is well posed. For a bow dominant vehicle, the sign of $m - Y_r$ should be taken into account.

D. Robust Control

This section addresses the question of robustness to parameter uncertainties. The previous dynamic control is modified to relax the constraint of having a precise estimation of the dynamic parameters by resorting to backstepping Lyapunov-based techniques.

Recall that the design of the kinematic reference requires an estimation of surge and sway acceleration, relying on the dynamic model, so the errors due to parameters misestimation should explicitly be taken into account in the elaboration of the kinematic reference.

1) *Kinematic Reference*: In Section III-A, we designed a kinematic reference (13) that includes the computation of $\dot{\beta}$, which can be rewritten as

$$\dot{\beta} = -\sum_{i=1}^2 q_i g_i - q_3 g_3 r + \dot{u} \frac{v}{v_t^2}.$$

The expression of functions g_i and parameters q_i is displayed in the Appendix. Because r explicitly appears in the previous relation, a proper expression of the kinematic reference is extracted by solving (13) for r , and naming r as r_d , the kinematic reference

$$r_d = \frac{f_r + \sum_{i=1}^2 q_i g_i - \dot{u} \frac{v}{v_t^2}}{1 - q_3 g_3} \quad (19)$$

with $f_r = \dot{\delta} - K_1(\theta - \delta) + c_c(s)\dot{s}$. It should be explicitly established that the resulting expression is well posed in the function of the value of q_3 , as mentioned for the dynamic case in Section III-B. This question will be addressed at the dynamic level.

The optimal value for r_d is computed with the real value of parameters q_i^{Re} and a perfect estimation of the forward acceleration $\dot{u}^{\text{Opt}}$. Then, the use of estimated values q_i of the dynamic parameters induces an error such that

$$\Delta r = \frac{\sum_{i=1}^2 \Delta q_i g_i - \Delta \dot{u} \frac{v}{v_t^2} + \Delta q_3 g_3 r}{1 - q_3^{\text{Re}} g_3}$$

with $\Delta q_i = q_i^{\text{Re}} - q_i$ ($i = 1, 2, 3$), $\Delta \dot{u} = \dot{u}^{\text{Opt}} - \dot{u}$, and $\Delta r = r^{\text{Opt}} - r$.

Consider the Lyapunov candidate $V_1 = (1/2)(\theta - \delta)^2$. The misestimation of the parameters induces a nonnegative derivative $\dot{V}_1$

$$\dot{V}_1 = -K_1(\theta - \delta)^2 + (\theta - \delta)\Delta r.$$

Because $\dot{V}_1$ is not negative definite, we cannot conclude any convergence property, since the effects of the parameter misestimation still appear in the Lyapunov candidate. Nevertheless, these effects will be canceled at the dynamic level, and asymptotic convergence will be guaranteed. Consider the suboptimal kinematic control (19) as a reference to drive the dynamic controller

$$\tilde{r}_d = \frac{f_r + \sum_{i=1}^2 q_i g_i - \dot{u} \frac{v}{v_t^2}}{1 - q_3 g_3} \quad (20)$$

given q_i , an estimation of q_i^{Re} ($i = 1, 2, 3$).

2) *Robust Dynamic Control*: To deal with robustness to parameter uncertainty, it is necessary to expand the dynamic control expression (16) to make the parameters explicitly appear in the equations, and study the incidence of their misestimation. Considering the previous suboptimal kinematic control as a reference $\tilde{r}_d$ (20), we derive the dynamic control as in Section III-B, explicitly extracting the dynamic parameters

$$\tilde{\Gamma} = m_r (\dot{\tilde{r}}_d - K_3(r - \tilde{r}_d) - K_5(\theta - \delta)) - m_{uv}uv - N_r r - N_{r|r}|r|r + m_r \dot{v} R_v^{\tilde{r}_d}$$

with

$$\dot{\tilde{r}}_d = R_0^{\tilde{r}_d} + \dot{v} R_v^{\tilde{r}_d} + \dot{u} R_u^{\tilde{r}_d} + \ddot{u} R_{\dot{u}}^{\tilde{r}_d} + \dot{u}^2 R_{\dot{u}^2}^{\tilde{r}_d} + \dot{u} \dot{v} R_{\dot{u}\dot{v}}^{\tilde{r}_d}$$

where $R_0^{\tilde{r}_d}, R_v^{\tilde{r}_d}, R_u^{\tilde{r}_d}, R_{\dot{u}}^{\tilde{r}_d}, R_{\dot{u}^2}^{\tilde{r}_d}, R_{\dot{u}\dot{v}}^{\tilde{r}_d}$ are computable functions dependent on the measurements, listed in the Appendix. Then, $\tilde{\Gamma}$ is rewritten as

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma} = & m_r \left(R_0^{\tilde{r}_d} - K_3(r - \tilde{r}_d) - K_5(\theta - \delta) \right) \\ & - m_{uv}uv - N_r r - N_{r|r}|r|r + m_r \dot{v} R_v^{\tilde{r}_d} \\ & + m_r \left(\dot{u} R_u^{\tilde{r}_d} + \ddot{u} R_{\dot{u}}^{\tilde{r}_d} + \dot{u}^2 R_{\dot{u}^2}^{\tilde{r}_d} + \dot{u} \dot{v} R_{\dot{u}\dot{v}}^{\tilde{r}_d} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Consider now the following version of the control $\tilde{\tilde{\Gamma}}$:

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{\Gamma}} = & m_r (R_0^{\tilde{r}_d} - K_3(r - \tilde{r}_d) - K_5(\theta - \delta)) \\ & - m_{uv}uv - N_r r - N_{r|r}|r|r + m_r \dot{v} R_v^{\tilde{r}_d}. \end{aligned} \quad (22)$$

Hence, a misestimation of the robot parameters yields a computed control that differs from its optimal version by

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{\tilde{\Gamma}} = & \Delta[m_r] \left(R_0^{\tilde{r}_d} - K_3(r - \tilde{r}_d) - K_5(\theta - \delta) \right) \\ & - \Delta[m_{uv}]uv - \Delta[N_r]r - \Delta[N_{r|r}]|r|r + \Delta[m_r \dot{v}] R_v^{\tilde{r}_d} \\ & + m_r^{\text{Re}} \dot{u}^{\text{Opt}} \dot{v}^{\text{Opt}} R_{\dot{u}\dot{v}}^{\tilde{r}_d} \\ & + m_r^{\text{Re}} \left(\dot{u}^{\text{Opt}} R_u^{\tilde{r}_d} + \ddot{u}^{\text{Opt}} R_{\dot{u}}^{\tilde{r}_d} + (\dot{u}^{\text{Opt}})^2 R_{\dot{u}^2}^{\tilde{r}_d} \right) \end{aligned}$$

with $\Delta[m_r \dot{v}] = m_r^{\text{Re}} \dot{v}^{\text{Opt}} - m_r \dot{v}$, and so on. Using the expression of $\dot{v}$, extracted from (4), $\Delta \tilde{\tilde{\Gamma}}$ is rewritten as

$$\Delta \tilde{\tilde{\Gamma}} = \sum_{i=1}^7 \Delta p_i f_i + \Phi(\cdot)$$

where $\Phi(\cdot) = m_r^{\text{Re}} \dot{u}^{\text{Opt}} \dot{v}^{\text{Opt}} R_{\dot{u}\dot{v}}^{\tilde{r}_d} + m_r^{\text{Re}} (\dot{u}^{\text{Opt}} R_u^{\tilde{r}_d} + \ddot{u}^{\text{Opt}} R_{\dot{u}}^{\tilde{r}_d} + (\dot{u}^{\text{Opt}})^2 R_{\dot{u}^2}^{\tilde{r}_d})$. The parameters p_i and the functions f_i are listed in the Appendix.

Consider the following Lyapunov candidate that captures the system's property of convergence to the suboptimal reference $\tilde{r}_d$:

$$V_6 = \frac{1}{2}(r - \tilde{r}_d)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^7 \frac{(\Delta p_i)^2}{\lambda_i^p}$$

and, with control (21) and parameter adaptation scheme

$$\dot{p}_i = -\lambda_i^p (r - \tilde{r}_d) f_i, \quad i = 1 \dots 7 \quad (23)$$

yields the following derivative:

$$\dot{V}_6 = -K_3(r - \tilde{r}_d)^2 + (r - \tilde{r}_d)\Phi(\cdot).$$

Consider now the forward control, and expand (16)

$$F = \sum_{i=1}^4 d_i l_i. \quad (24)$$

The parameters d_i and the functions l_i are listed in the Appendix. The misestimation $\Delta d_i = d_i^{\text{Re}} - d_i$, for $i = 1, 2, 3, 4$,

induces a computed forward control different from the optimal one such that

$$\Delta F = F^{\text{Opt}} - F = \sum_{i=1}^4 \Delta d_i l_i.$$

Then, considering the following Lyapunov candidate:

$$V_5 = \frac{1}{2}(u - u_d)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta d_i l_i}{\lambda_i^d}$$

with control (24) and the following parameter adaptation scheme:

$$\dot{d}_i = -\lambda_i^d (u - u_d) l_i, \quad i = 1 \dots 4 \quad (25)$$

leads to a negative-definite derivative

$$\dot{V}_5 = -K_5(u - u_d)^2 \leq 0.$$

Then, noting that $\ddot{V}_5$ is bounded, the use of the CBL proves the asymptotic convergence of u to u_d . Hence, $\dot{u}$ and $\ddot{u}$ vanish with time

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{u} &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{u} &= 0. \end{aligned}$$

The previous argument implies that the system will asymptotically reach the invariant set

$$\Omega^{\dot{u}} = [x, y, \theta, u, v, r, s | \dot{u} = 0, \ddot{u} = 0]. \quad (26)$$

Studying the system trajectories onto the $\Omega^{\dot{u}}$ set, we notice that

$$\Phi(\cdot)|_{\Omega^{\dot{u}}} = 0$$

hence

$$\dot{V}_6|_{\Omega^{\dot{u}}} = -K_3(r - \tilde{r}_d)^2 \leq 0.$$

Noting that $\ddot{V}_6$ is bounded, and using the invariance principle, the previous arguments imply

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r = \tilde{r}_d.$$

Then, the system will asymptotically reach the invariant set $\Omega^{\tilde{r}_d} \subset \Omega^{\dot{u}}$ defined as

$$\Omega^{\tilde{r}_d} = [x, y, \theta, u, v, r, s | r = \tilde{r}_d]. \quad (27)$$

The system trajectories onto this set are described by the $V_1|_{\Omega^{\tilde{r}_d}}$ Lyapunov candidate. In this set, the derivative is written as

$$\dot{V}_1|_{\Omega^{\tilde{r}_d}} = \frac{(\theta - \delta)}{1 - q_3^{\text{Re}} g_3} \left(\sum_{i=1}^2 \Delta q_i g_i + \Delta q_3 g_3 r \right) - K_1(\theta - \delta)^2.$$

The effects of the misestimation of parameter q_i are still present, and we do not consider the previously used solution of adapting its estimation since the knowledge of q_3^{Re} is required to design a classic adaptive scheme.

The proposed solution consists in relying on switching control system theory to guarantee that $\dot{V}_1$ is negative definite. For more information on switching control systems, please refer to [27] and [32]. To insure asymptotic convergence, one should insure that

$$\frac{(\theta - \delta)}{1 - q_3^{\text{Re}} g_3} \left(\sum_{i=1}^2 \Delta q_i g_i + \Delta q_3 g_3 r \right) \leq 0 \quad \forall t.$$

This can be done by choosing two different values q_i^{up} and q_i^{down} , guaranteed to overestimate and underestimate the real value q_i^{Re} ($\Delta q_i^{\text{up}} > 0$ and $\Delta q_i^{\text{down}} < 0$), and use them such that

$$\begin{aligned} q_i &= \begin{cases} q_i^{\text{up}}, & \text{if } (\theta - \delta) g_i < 0 \\ q_i^{\text{down}}, & \text{if } (\theta - \delta) g_i > 0 \end{cases} \\ q_3 &= \begin{cases} q_3^{\text{up}}, & \text{if } (\theta - \delta) r < 0 \\ q_3^{\text{down}}, & \text{if } (\theta - \delta) r > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

using the facts that $g_3 > 0$ and $(1 - q_3 g_3) > 0, \forall t$. Then, using (28) switching conditions, we conclude that $\dot{V}_1|_{\Omega^{\dot{u}}} < 0$.

Because eight possible Lyapunov functions are negative definite, and the switching process does not affect the convergence [27], we can state that

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \delta |_{t \rightarrow \infty}.$$

Using the same argument concerning the imbricated invariant set, it has been shown that the robot asymptotically converges to the path. We are now able to state Proposition 3 that solves problem **C3**.

Proposition 3: Consider the robot models (3) and (4) and the desired approach angle defined in (6), where k_δ is a positive gain and $0 < \theta_a < \pi/2$. Further, assume that measurements of $[u \ v \ r]^T$ are available from robot sensors and that a parameterization of the path is available such that, given s , the curvilinear abscissa of a point on the path, the variables $\theta, x_{B/F}, y_{B/F}, c_c, (\partial c_c / \partial s)$ are well defined and computable. Consider that a reasonable estimation of the model parameters $\tilde{m}_u, \tilde{m}_v, \tilde{m}_r, \tilde{m}_{uv}, \tilde{X}_u, \tilde{X}_{u|u|}, \tilde{Y}_v, \tilde{Y}_{v|v|}, \tilde{N}_r, \tilde{N}_{r|r|}$ was used to compute the 11 initial values p_i^0, d_j^0 ($i = 1 \dots 7, j = 1 \dots 4$) as described in the tables of the Appendix, and q_k^{up} and q_k^{down} such that $q_k^{\text{up}} > q_k^{\text{Re}} > q_k^{\text{down}}, (k = 1 \dots 3)$. Define u_d as the desired forward speed. Then, the control law

$$U_{\text{dyn}}^{\text{Rbst}} = \begin{cases} \Gamma = \sum_{i=1}^7 p_i f_i \\ F = \sum_{j=1}^4 d_j l_j \end{cases} \quad (29)$$

with the kinematic reference

$$\begin{aligned} \tilde{r}_d &= \frac{1}{1 - q_3 g_3} \left(\dot{\delta} - K_1(\theta - \delta) + c_c(s) \dot{s} \right. \\ &\quad \left. - (\dot{u}_d - K_5(u - u_d)) \frac{v}{v_t^2} + \sum_{k=1}^2 q_k g_k \right) \\ \dot{s} &= v_t \cos \theta + K_2 x_{B/F} \end{aligned}$$

the adaptation scheme (23), (25) and the switching scheme (28), with $\lambda_i^p, \lambda_j^d, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ positive gains, the assumption that $v_t > 0, \forall t$, and given the initial relative position $[\theta, x_{B/F}, y_{B/F}]|_{t=0}$, solves problem **C3**.

TABLE I
PATH PARAMETERS

$a_0 = 0$	$a_1 = 0.866$	$a_2 = -0.02$	$a_3 = 10^{-5}$	$a_4 = 1.5 \cdot 10^{-6}$
$b_0 = 0$	$b_1 = 0.5$	$b_2 = -5 \cdot 10^{-4}$	$b_3 = 10^{-5}$	$b_4 = 10^{-7}$



Fig. 2. Infante AUV (IST) during its first sea trial.

Note that the evolution of the parameters is a function of the excitation of the problem. Analyzing the adaptation equations, it is easy to see that the adaptation stops when the reference errors $(r - r_d)$ and $(\theta - \delta)$ are equal to zero. This phenomenon is easily observed for linear systems when the path does not lead to sufficient excitation, and in this case, the estimated value of the parameters does not converge to the real value [31], [38].

Another solution, based on switching system theory, is imaginable. It consists in developing a switching scheme for all parameters, as for the q_i parameters. Further research on this topic is warranted.

IV. SIMULATION RESULTS

The aim of the simulation is to illustrate the efficiency of the previous controllers in driving an AUV onto a desired path. The path is characterized by a curvature c_c on a point F , parameterized by its curvilinear abscissa s . The objective is to regulate the distance to the path and the heading of the total speed of the robot to zero relative to the given path. To test these controllers in a general case, we have chosen to consider the more complex path defined in Section IV-A.

A. Path Parameterization

The path is designed in Cartesian space (cf., Table I) and we assume to have a parameterization that allows the computation of the following items (given s):

- $\Psi_{F/0}(s)$: the global heading of the virtual target;
 - $c_c(s)$: the path curvature at the target position;
 - $\partial c_c(s)/\partial s$: the curvilinear derivative of the curvature at the target position;
 - $x_{F/0}$ and $y_{F/0}$, the absolute location of the virtual target.
- We have chosen a polynomial parameterization of the form

$$x_{F/0}(\mu) = \sum_{i=0}^n a_i \mu^i, \quad y_{F/0}(\mu) = \sum_{i=0}^n b_i \mu^i.$$

TABLE II
PARAMETERS OF THE SIMPLIFIED MODEL OF THE INFANTE AUV (IST)

$m = 2234 \text{ kg}$	$I_z = 2000 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$
$X_{\dot{u}} = -142 \text{ kg}$	$Y_{\dot{v}} = -1715 \text{ kg}$
$N_{\dot{r}} = -1349 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$	$X_u = 0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$
$Y_v = -346 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$	$N_r = -1427 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
$X_{u u} = -35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$	$Y_v v = -667 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$
$N_r r = -310 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	

TABLE III
DYNAMIC CONTROL PARAMETERS

$K_1 = 1$	$K_2 = 1$	$K_3 = 1$	$K_4 = 1$	$K_5 = 1$
$k_\delta = 1$	$\theta_a = \pi/4$	$u_d = 2$	$\dot{u}_d = 0$	$\ddot{u}_d = 0$

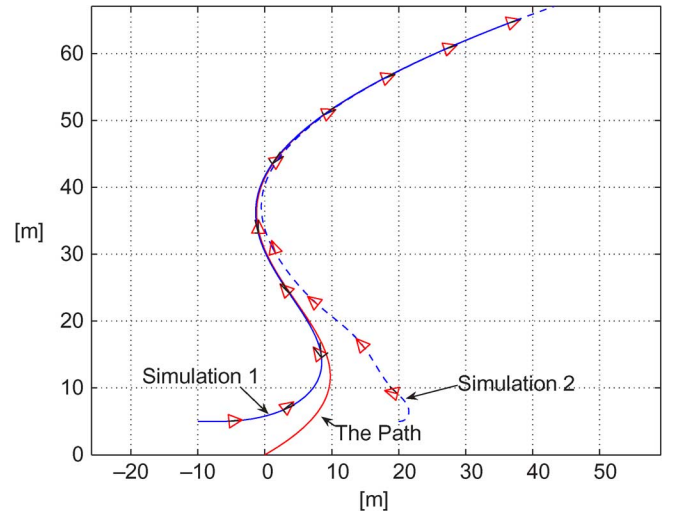


Fig. 3. System trajectories, when considering a perfect knowledge of the parameters (simulation 1: solid line; simulation 2: dashed line).

Assuming we have a precise estimation of function $\mu(s)$, and given s , we compute

$$\begin{aligned} \Psi_{F/0}(s) &= \arctan \frac{(y_{F/0})'}{(x_{F/0})'} \\ c_c(s) &= \frac{\partial \Psi_{F/0}(s)}{\partial \mu} \frac{d\mu}{ds} \\ \frac{\partial c_c(s)}{\partial s} &= \frac{\partial c_c(s)}{\partial \mu} \frac{d\mu}{ds} \\ x_{F/0}(\mu(s)), \quad y_{F/0}(\mu(s)) \\ (x_{F/0})' &= \frac{dx_{F/0}}{d\mu}, \quad (y_{F/0})' = \frac{dy_{F/0}}{d\mu}. \end{aligned}$$

The estimation of function $\mu(s)$ is achieved by integration of

$$\frac{d\mu}{ds} = \frac{1}{\sqrt{[(x_{F/0})']^2 + [(y_{F/0})']^2}}.$$

The model of the robot is a simplified version of Infante [36], the AUV developed at the DSOR (Fig. 2), given in Table II.

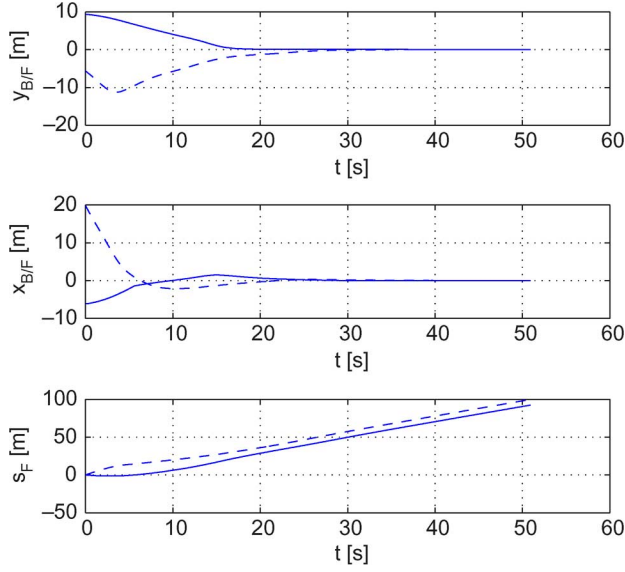


Fig. 4. Relative distance robot/virtual target evolution, when considering a perfect knowledge of the parameters (simulation 1: solid line; simulation 2: dashed line).

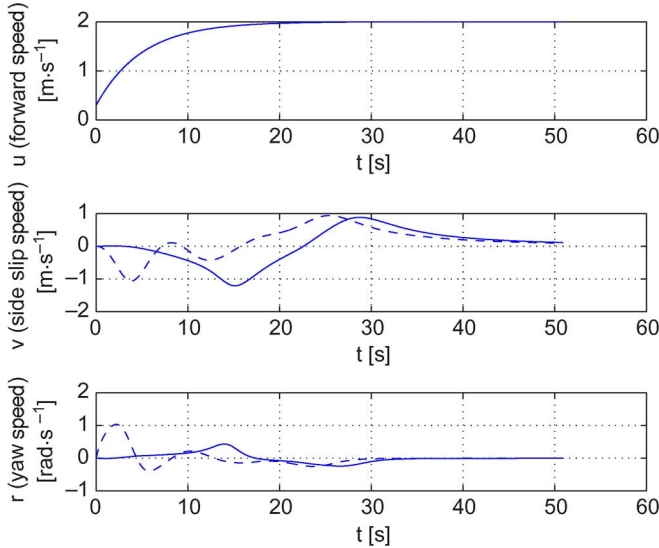


Fig. 5. System speed evolution, when considering a perfect knowledge of the parameters (simulation 1: solid line; simulation 2: dashed line).

B. Dynamic Controller

The simulations are carried out using the robot parameters of Table II, the control parameters of Table III, and the path parameters of Table I.

The simulation results are displayed in Figs. 3–6.

Discussion: Both simulation results of Fig. 3 show a satisfactory behavior of the AUV, clearly driven to reach and stay on the path. Fig. 4 indicates the evolution of the relative distance between the virtual target and the robot, expressed in the Serret–Frenet frame. The concurrent convergence of $x_{B/F}$ and $y_{B/F}$ to zero confirms the desired behavior of the system. Note that since $x_{B/F}$ converges to zero, the virtual target converges to the closest point on the path. Figs. 5 and 6 show the system

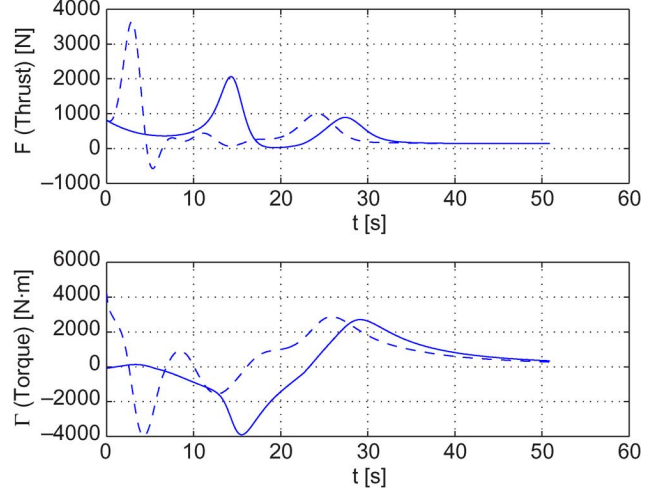


Fig. 6. Control activity, when considering a perfect knowledge of the parameters (simulation 1: solid line; simulation 2: dashed line).

TABLE IV
INITIAL PARAMETERS ESTIMATION

$m = 3000 \text{ kg}$	$I_z = 1000 \text{ N·m·s}^2$
$X_{\dot{u}} = -10 \text{ kg}$	$Y_{\dot{v}} = -2500 \text{ kg}$
$N_{\dot{r}} = -500 \text{ N·m·s}^2$	$X_u = -10 \text{ kg·m}^{-1}$
$Y_v = -500 \text{ kg·m}^{-1}$	$N_r = -500 \text{ N·m·s}$
$X_{u u} = -10 \text{ kg·m}^{-1}$	$Y_v v = -100 \text{ kg·s}^{-1}$
$N_r r = -100 \text{ N·m·s}$	

speeds' evolution and the related control activity. Concerning the amplitude of the control activity, recall that the simulated system is heavy (cf., Table II). Note that the tunable parameters of the proposed control are the control gains K_i , $i = 1, 2, 3, 4$, and the guidance parameters, the asymptotic approach angle, denoted θ_a , and the gain k_δ , designing the smoothness of this approach.

C. Robust Controller

To demonstrate the efficiency of the robust scheme, we first proceed to simulations considering the misestimated parameters of Table IV, without adaptation. The results are given in Figs. 7–10 (dotted lines).

The robust scheme is tested using the path parameters of Table I and the control parameters of Table III. The system parameter estimated values are displayed in Table IV, used to compute the 11 initial values of the parameter groups. The surrounding values for q_1 , q_2 , and q_4 parameter groups are also considered. The expression of the parameter groups is listed in the Appendix

$$\begin{aligned} q_1^{\text{up}} &= -0.1051, & q_1^{\text{down}} &= -0.0526 \\ q_2^{\text{up}} &= -0.2534, & q_2^{\text{down}} &= -0.0676 \\ q_3^{\text{up}} &= 0.5, & q_3^{\text{down}} &= 0.7. \end{aligned}$$

The results are displayed in Figs. 7–10 (solid lines). The adaptation evolution for parameters p_j , $j = 1 \dots 7$, is given in Figs. 11 and 12, q_i , $i = 1, 2, 3$ in Fig. 13, and d_k , $k = 1 \dots 4$, in Fig. 14. The convergence gains have been tuned according to

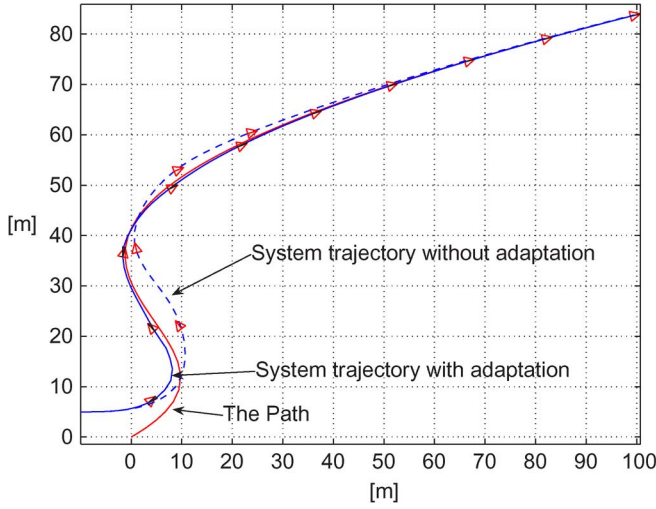


Fig. 7. System trajectories using robust control (solid line) and dynamic control with misestimated parameters (dotted line).

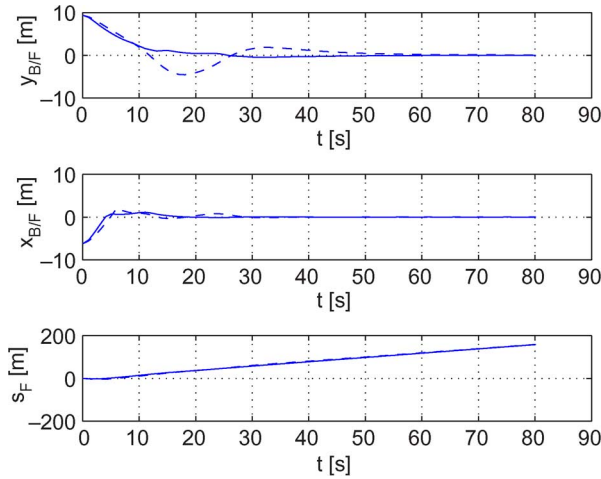


Fig. 8. Relative distance robot/virtual target evolution using robust control (solid line) and dynamic control with misestimated parameters (dashed line).

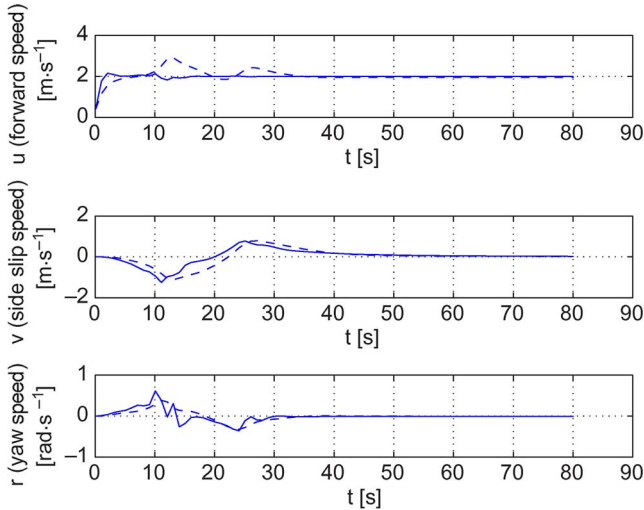


Fig. 9. Speed evolution using robust control (solid line) and dynamic control with misestimated parameters (dashed line).

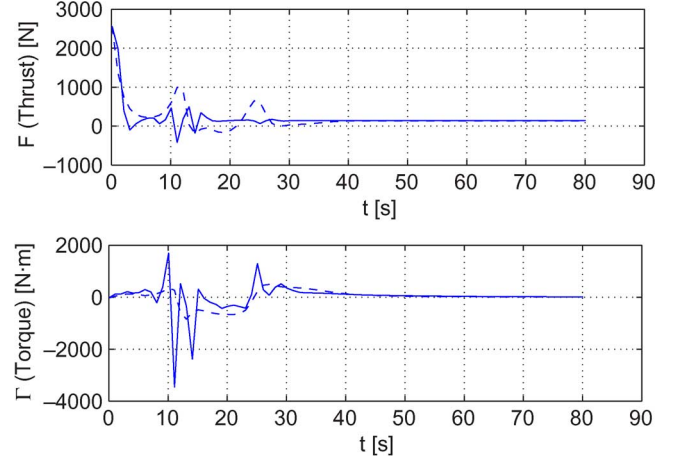


Fig. 10. Control activity, using robust control (solid line) and dynamic control with misestimated parameters (dashed line).

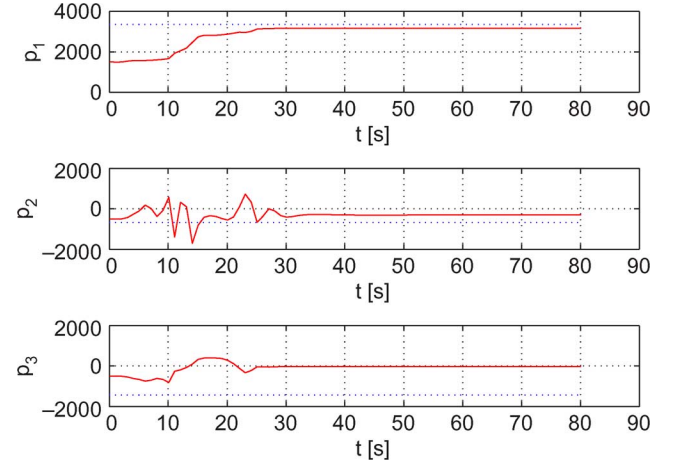


Fig. 11. Evolution of the adaptation of parameters p_i ($i = 1, 2, 3$) involved in the computation of Γ .

Table V, to observe the convergence of the parameters during the simulation.

Discussion: Trajectories of Fig. 7 clearly indicate the improvement of the robust control with respect to the performances of the dynamic control with misestimated parameters. Note that since the desired path is getting flatter the convergence of the dynamic control is achieved much later than the robust control results. This compared analysis is confirmed by the evolution of the relative distance between the virtual target and the robot, displayed in Fig. 8, where the convergence evolution of the $y_{B/F}$ variable is similar to the one in the case of a perfect knowledge of the parameters (cf., Fig. 4), which is clearly not the case of the response considering misestimated parameters, without the robust scheme. Fig. 9 indicates also a better convergence of the forward speed u to the desired one $u_d = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, when using the robust control. Fig. 10 displays the evolution of the control activity evolution with and without the robust scheme. As expected, the control activity is higher with the robust control. Moreover, the control activity profile of the robust control (solid line) presents some important discontinuities, induced by the switching part of the robust scheme, as one could have expected.

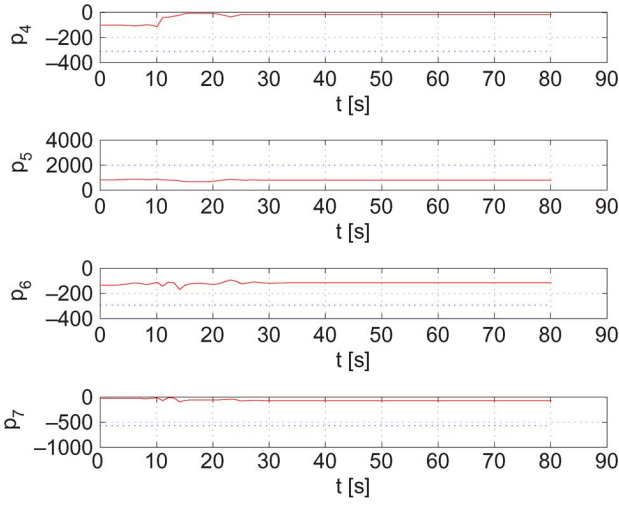


Fig. 12. Evolution of the adaptation of parameters p_i ($i = 4, 5, 6, 7$) involved in the computation of Γ .

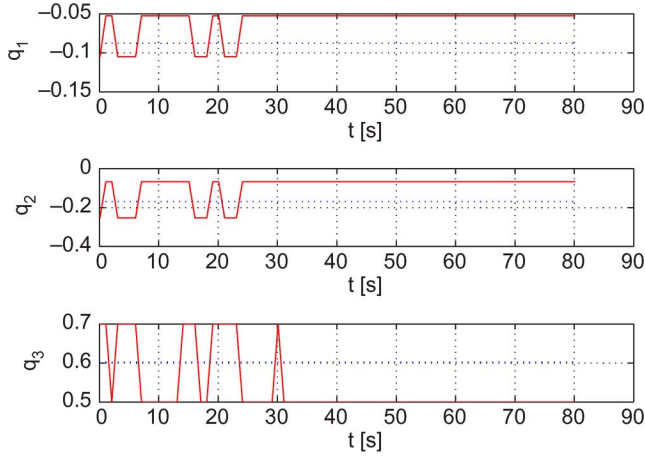


Fig. 13. Evolution of the commutations of parameters involved in the computation of the kinematic reference r_d .

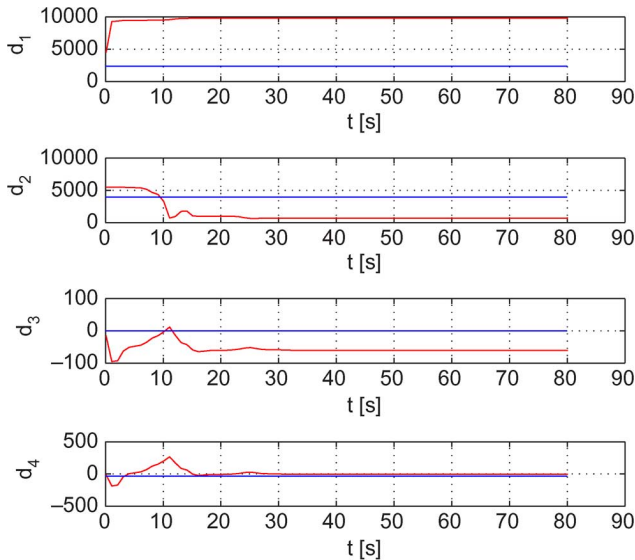


Fig. 14. Evolution of the adaptation of parameters involved in the computation of F .

TABLE V
CONVERGENCE GAINS OF THE ADAPTATION SCHEME

$\lambda_1^p = 30$	$\lambda_2^p = 50$	$\lambda_3^p = 50$	$\lambda_4^p = 10$
$\lambda_5^p = 10$	$\lambda_6^p = 5$	$\lambda_7^p = 8$	$\lambda_1^d = 100$
$\lambda_2^d = 500$	$\lambda_3^d = 1$	$\lambda_4^d = 2$	

The reduction of this chattering effect could be a substantial improvement of the method. Figs. 11 and 12 show the evolution of parameters p_i , $i = 1, \dots, 7$, involved in the computation of Γ . It could be noted that the parameters are not converging to their real value. This is expected since the related Lyapunov functions (cf., Section III-D2) that warrant the convergence guaranties of the tracking variables, do not consider the convergence of the parameters to their actual value. This is a known behavior of adaptive control, that is, for the linear case, a problem of excitation of the system. This robust control is not designed to make the parameters estimation, but to desensitize the system properties to the parameters misestimation. Fig. 13 shows the evolution of the parameters involved in the computation of the kinematic reference r_d , according to the designed switching scheme. Note that one of the assumption of the problem is that the system is able to switch infinitely fast, and further research on this topic will include the dwell time property of the system, to establish the practical convergence performance of the method. Indeed, including a realistic dwell time in the study will make it impossible to meet asymptotic convergence property, and only practical convergence will be reachable.

V. CONCLUSION

We have developed a dynamic robust path-following AUV control that exhibits good performances. The proposed method uses a hybrid robust scheme, relying on classic adaptation scheme design of those dynamic parameters that appear with an affine form, and on switching control for the others. A robot design limitation reduces the application field of this solution to torpedo-shaped vehicles that ensure that the ratio m_u/m_v stays far from 1. The asymptotic convergence of the controlled system is shown in the Lyapunov sense. To complete this study, disturbance rejection and unmodeled dynamic robustness must be explicitly addressed, with the introduction of a dwell time, the shortest switching period of the system. Another approach is now under study, relying exclusively on switching system theory. This warrants further research.

APPENDIX FUNCTIONS AND PARAMETER GROUPS

In the sequel, we present the expression of the functions and parameter group used in Section III-D.

A. Kinematic Reference

The kinematic references, denoted r_d , is rewritten according to (19), where functions g_i and parameter groups q_i , $i = 1, 2, 3$, have the following expression, displayed in Table VI.

B. Forward Control F

The expression of the forward control, denoted F , is rewritten according to (24), where functions l_i and parameter groups d_i , $i = 1, 2, 3, 4$, are expressed in Table VII.

TABLE VI
KINEMATIC REFERENCE PARAMETER GROUPS AND FUNCTIONS

q_1 and g_1	q_2 and g_2	q_3 and g_3
$\frac{Y_v}{m_v}$	$\frac{Y_v v }{m_v}$	$\frac{m_{ur}}{m_v}$
$\frac{uv}{v_t^2}$	$\frac{uv v }{v_t^2}$	$\frac{u^2}{v_t^2}$

TABLE VII
FORWARD CONTROL PARAMETER GROUPS AND FUNCTIONS

d_1 and l_1	d_2 and l_2
m_u	m_{uv}
$\dot{u}_d - K_5(u - u_d)$	$-vr$
d_3 and l_3	d_4 and l_4
X_u	$X_u u $
$-u$	$-u u $

TABLE VIII
HEADING CONTROL PARAMETER GROUPS AND FUNCTIONS

p_1 and f_1	p_2 and f_2	p_3 and f_3
m_r	$\frac{m_{ur}m_r}{m_v}$	$\frac{Y_v m_r}{m_v}$
$R_0^{r,d} - K_3(r - \tilde{r}_d) - K_5(\theta - \delta)$	$-urR_v^{r,d}$	$vR_v^{r,d}$
p_4 and f_4	p_5 and f_5	p_6 and f_6
$\frac{Y_v v m_r}{m_v}$	m_{uv}	N_r
$v v R_v^{r,d}$	$-uv$	$-r$
p_7 and f_7		
$N_r r $		
$-r r $		

TABLE IX
ELEMENTS OF COMPUTATION OF PARAMETER GROUPS AND FUNCTIONS

$R_0^{r,d} = f_0^{r,d}(g_1^0 + g_2^0 + g_3^0)$
$R_{\dot{v}}^{r,d} = g_0^{\dot{v}}f_1^{r,d} + f_0^{r,d}(g_1^{\dot{v}} + g_2^{\dot{v}} + g_3^{\dot{v}} + g_4^{\dot{v}} + g_5^{\dot{v}})$
$R_u^{r,d} = g_0^{\dot{u}}f_1^{r,d} + f_0^{r,d}(g_1^{\dot{u}} + g_2^{\dot{u}} + g_3^{\dot{u}} + g_4^{\dot{u}} + g_5^{\dot{u}})$
$R_{\ddot{u}}^{r,d} = f_0^{r,d}g_1^{\ddot{u}}$
$R_{\ddot{u},\dot{u}}^{r,d} = f_0^{r,d}g_1^{\ddot{u},\dot{u}} + g_0^{\dot{u}}g_1^{\ddot{u}}$
$R_{\ddot{u},\dot{v}}^{r,d} = f_0^{r,d}g_1^{\ddot{u},\dot{v}} + g_0^{\dot{v}}g_1^{\ddot{u}}$

C. Heading Control Γ

The expression of the torque control, denoted Γ , is rewritten according to (29), where functions f_i and parameter groups p_i , $i = 1, \dots, 7$, are expressed in Tables VIII–X.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Prof. A. Pascoal and his team for their helpful comments.

REFERENCES

- [1] E. Lewis, *Principles of Naval Architecture—Volume III: Motions in Waves and Controllability*. New York: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1989, pp. 209–215.
- [2] L. Ji-Hong and L. Pan-Mook, “Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle,” *Ocean Eng.*, vol. 32, no. 17–18, pp. 2165–2181, 2005.
- [3] T. Prestero, “Verification of a six degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle” M.S. thesis, Ocean Mech. Eng., Massachusetts Inst. Technol./Woods Hole Ocean. Inst., Cambridge, MA, Sep. 2001 [Online]. Available: <http://www.mit.edu/tprester/main.pdf>

TABLE X
ELEMENTS OF COMPUTATION OF PARAMETER GROUPS AND FUNCTIONS

$f_0^{r,d} =$	$\frac{1}{1 - q_3 \frac{u^2}{v_t^2}}$
$f_1^{r,d} =$	$f_r + \sum_{i=1}^2 q_i g_i$
$g_1^0 =$	$\frac{\partial^2 \dot{\delta}}{\partial y^2} \dot{y}^2 + \frac{\partial \dot{\delta}}{\partial y} (-\frac{\partial c_c}{\partial s} \dot{s}^2 - c_c \dot{x} \dot{s} + v_t \cos \theta (r - c_c \dot{s}) - c_c x K_2 \dot{x} + c_c x \sin \theta v_t (r - c_c \dot{s}))$
$g_2^0 =$	$K_1 (\dot{\delta} - (r - c_c \dot{s}))$
$g_3^0 =$	$\frac{\partial c_c}{\partial s} \dot{s}^2 + c_c (K_2 \dot{x} - \sin \theta v_t (r - c_c \dot{s}))$
$g_0^{\dot{v}} =$	$\frac{q_3}{(1 - q_3 g_3)^2} (-\frac{2u^2 v}{v_t^4})$
$g_0^{\dot{u}} =$	$\frac{q_3}{(1 - q_3 g_3)^2} (\frac{2uv^2}{v_t^4})$
$g_1^{\dot{v}} =$	$\frac{\partial \dot{\delta}}{\partial y} \frac{1}{v_t} (\sin \theta v + \cos \theta u - c_c x (\cos \theta v - \sin \theta u))$
$g_1^{\dot{u}} =$	$\frac{\partial \dot{\delta}}{\partial y} \frac{1}{v_t} (\sin \theta u - \cos \theta v - c_c x (\cos \theta u + \sin \theta v))$
$g_2^{\dot{v}} =$	$-K_1 \frac{u}{v_t^2}$
$g_2^{\dot{u}} =$	$-K_1 \frac{v}{v_t^2}$
$g_3^{\dot{v}} =$	$\frac{c_c}{v_t} (\cos \theta v - \sin \theta u)$
$g_3^{\dot{u}} =$	$\frac{c_c}{v_t} (\cos \theta u + \sin \theta v)$
$g_4^{\dot{v}} =$	$q_1 \frac{u(u^2 - v^2)}{v_t^4}$
$g_4^{\dot{u}} =$	$q_1 \frac{v(v^2 - u^2)}{v_t^4}$
$g_5^{\dot{v}} =$	$q_2 \frac{2u^3 v }{v_t^4}$
$g_5^{\dot{u}} =$	$q_2 \frac{v v (v^2 - u^2)}{v_t^4}$
$g_1^{\ddot{u}} =$	$\frac{v}{v_t^2}$
$g_1^{\ddot{u},\dot{v}} =$	$\frac{u^2 - v^2}{v_t^4}$
$g_1^{\ddot{u},\dot{u}} =$	$\frac{-2uv}{v_t^4}$

- [4] D. Soetanto, L. Lapierre, and A. Pascoal, “Adaptive, non-singular path following control of a wheeled robot,” in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, Maui, HI, Dec. 9–12, 2003, pp. 1765–1770.
- [5] A. Healey and D. Lienard, “Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 327–339, Jul. 1993.
- [6] L. Lapierre, D. Soetanto, and A. Pascoal, “Non-linear path-following control of an AUV,” in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, Maui, HI, Dec. 9–12, 2003, pp. 1256–1261.
- [7] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York: Wiley, 1995.
- [8] F. Song and S. Smith, “Design of sliding mode fuzzy controllers for an autonomous underwater vehicle without system model,” in *Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf.*, Providence, RI, Sep. 9–14, 2000, pp. 835–840.
- [9] W. Naeem, R. Sutton, and S. Ahmad, “Pure pursuit guidance and model predictive control of an autonomous underwater vehicle for cable/pipeline tracking,” *IMarEST J. Mar. Sci. Environ.*, no. 1, pt. C, pp. 15–25, Mar. 2004.
- [10] W. Naeem, “Model predictive control of an autonomous underwater vehicle,” in *Proc. United Kingdom Autom. Control Council Postgraduate Symp.*, Sheffield, U.K., Sep. 2002, pp. 19–23.
- [11] T. Salgado-Jmenez, J. Spiewak, P. Fraise, and B. Jouvencel, “A robust control algorithm for AUV: Based on a high order sliding mode,” in *Proc. MTS/IEEE Int. OCEANS. Conf.*, Kobe, Japan, Nov. 9–12, 2004, pp. 276–281.
- [12] J. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991, pp. 216–289.
- [13] C. Silvestre, A. Pascoal, and I. Kammer, “On the design of gain-scheduled trajectory tracking controllers,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 12, no. 9, pp. 797–839, Jul. 2002.
- [14] M. Kim, “Nonlinear control and robust observer design for marine vehicles,” Ph.D. dissertation, Dept. Eng. Mech., Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksburg, VA, Nov. 3, 2000.

- [15] T. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. New York: Wiley, 1994, pp. 6–55.
- [16] M. Aucher, “Dynamique des sous-marins,” Paris, France, Internal Rep., science et technique de l’armement, 55, 4 fasc, 1981.
- [17] L. Lapierre, D. Soetanto, and A. Pascoal, “Nonsingular path following control of a unicycle in the presence of parametric modelling uncertainties,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 16, no. 10, pp. 485–503, Apr. 2006.
- [18] P. Encarnacao, A. Pascoal, and M. Arcak, “Path following for autonomous marine craft,” in *Proc. 5th IFAC Conf. Mar. Craft Maneuver. Control*, Aalborg, Denmark, Aug. 2000, pp. 117–122.
- [19] P. Encarnacao, A. Pascoal, and M. Arcak, “Path following for marine vehicle in the presence of unknown currents,” in *Proc. 6th IFAC Symp. Robot Control*, Vienna, Austria, Dec. 2000, vol. II, pp. 469–474.
- [20] A. Aguiar, A. Atassi, and A. Pascoal, “Regulation of a non-holonomic dynamic wheeled mobile robot with parametric modeling uncertainty using Lyapunov function,” in *Proc. 39th IEEE Conf. Decision Control*, Sydney, Australia, Dec. 2000, vol. 3, pp. 2995–3000.
- [21] A. Aguiar, “Non-linear motion control of non-holonomic and under-actuated systems,” Ph.D. dissertation, Robot. Dept., Instituto Superior Tecnico (IST), Lisbon, Portugal, Apr. 2002.
- [22] N. Andreff, B. Espiau, and R. Horaud, “Visual servoing from line,” Tech. Rep. INRIA n4226, Jul. 2001 [Online]. Available: <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4226.html>
- [23] C. Canudas de Wit, H. Khenouf, and C. Samson, “Non-linear control design for mobile robots,” in *Recent Trends in Mobile Robotics*, ser. Robotics and Automated Systems, Y. F. Zheng, Ed. Singapore: World Scientific, vol. 11, pp. 121–156.
- [24] F. Diaz del Rio, G. Jimenez, J. Sevillano, S. Amaya, and A. Balcells, “A new method for tracking memorized paths: Application to unicycle robots,” in *Proc. 10th Mediterranean Conf. Control*, Lisbon, Portugal, Jul. 9–12, 2002 [Online]. Available: <http://med.ee.nd.edu/MED10/pdf/339.pdf>
- [25] W. E. Dixon, D. M. Dawson, E. Zergeroglu, and A. Behal, “Non linear control of wheeled robots,” in *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001, vol. 262, pp. 71–81.
- [26] P. M. Encarnao, “Non linear path following control systems for ocean vehicles,” Ph.D. dissertation, Robot. Dept., Instituto Superior Tecnico (IST), Lisbon, Portugal, Apr. 2002.
- [27] J. Hespanha, D. Liberzon, and A. Morse, “Logic-based switching control of a non-holonomic system with parametric modeling uncertainty,” *Syst. Control Lett.*, vol. 38, Special Issue on Hybrid Systems, no. 3, pp. 167–177, 1999.
- [28] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, “A tutorial on visual servo control,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 12, no. 5, pp. 651–670, Oct. 1996.
- [29] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996, pp. 126–133.
- [30] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Non-Linear and Adaptive Control Design*. New York: Wiley, 1995, pp. 87–123.
- [31] L. Lapierre and D. Soetanto, “Adaptive, non-linear vision-based path following control of a non-holonomic robot,” in *Proc. Eur. Control Conf.*, Cambridge, U.K., Sep. 2002 [Online]. Available: <http://www.lirmm.fr/~lapierre/Documents/PAPERS/Conferences/ECC2003/ECC2003.pdf>
- [32] D. Liberzon, “Control using logic and switching, part 1: Switching in systems and control,” in *Handout Notes of the CDC 01 Workshop*, September 4–7, 2001 [Online]. Available: <http://black.csl.uiuc.edu/liberzon>
- [33] A. Micaelli and C. Samson, “Trajectory tracking for a unicycle-type and two steering wheels mobile robots,” Tech. Rep. INRIA n2097, Nov. 1993 [Online]. Available: <http://www.inria.fr/rrrt/rr-2097.html>
- [34] C. Samson and A. Abderrahim, “Mobile robot control part 1: Feedback control of a non-holonomic mobile robot,” Tech. Rep. INRIA n1281, Jun. 1991 [Online]. Available: <http://www.inria.fr/rrrt/rr-1288.html>
- [35] R. Sepulchre, M. Jankovic, and P. Kokotovic, *Constructive Non-Linear Control*. New York: Springer-Verlag, 1997, pp. 40–56.
- [36] C. Silvestre, “Multi-objective optimization theory with application to the integrated design of controllers/plants for autonomous vehicle,” Ph.D. dissertation, Robot. Dept., Instituto Superior Tecnico (IST), Lisbon, Portugal, Jun. 2000.
- [37] J. J. Slotine and W. Li, *Applied Non-Linear Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995, pp. 125–128.
- [38] D. Soetanto, L. Lapierre, and A. Pascoal, “Adaptive non-singular path following control of a wheeled robot,” in *Proc. Conf. Decision Control*, Maui, HI, Dec. 2003, pp. 1765–1770.
- [39] D. Soetanto, L. Lapierre, and A. Pascoal, “Non-singular path-following control of a unicycle-type vehicle in presence of parametric modeling uncertainties,” in *Proc. Int. Conf. Adv. Robot.*, Coimbra, Portugal, Jun. 30–Jul. 3 2003, pp. 1395–1401.



Lionel Lapierre received the Ph.D. degree robotics from the University of Montpellier 2, Montpellier, France, in 1999.

Then, he joined the team of Prof. A. Pascoal within the European project FreeSub for three years. Since 2003, he has been with the Underwater Robotics Division, Laboratoire d’Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), Montpellier, France.



Bruno Jouvencel was born on February 3, 1955, in Paris, France. He graduated from the Electronical Engineering Department, Ecole Normale Supérieure, Cachan, France, in 1981 (Agrégation de Génie Electrique). He received the Ph.D. degree in perception systems for robotic manipulators in automatic control from Montpellier University, Montpellier, France, in 1984.

Currently, he is a Full Professor at Montpellier University and Researcher at the Laboratoire d’Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), Montpellier, France. In 2004, he was elected member of the National Committee, which evaluates French research laboratories in communication and information technologies (Section 07 of the Comité National de la Recherche Scientifique). For ten years, he has worked on the design, the command, and the perception of autonomous underwater vehicles. A first prototype TAIPAN 1 has been developed in 1998 and a second vehicle “H160” was conceived and realized in partnership with an industrial company.