



Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile

Viviane Cadenat

► To cite this version:

Viviane Cadenat. Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1999. Français. NNT: . tel-00132421

HAL Id: tel-00132421

<https://theses.hal.science/tel-00132421>

Submitted on 21 Feb 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année 1999
N° d'ordre : 3565

THÈSE

présentée au
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

en vue de l'obtention du
Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Spécialité :
Robotique

par
Viviane CADENAT
Maître ès Sciences

Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile

Soutenue le 16 décembre 1999, devant le jury :

Président	Malik	GHALLAB
Rapporteur	François	CHAUMETTE
Rapporteur	Dominique	MEIZEL
Rapporteur	Alessandro	DE LUCA
Examineur	Tarek	HAMEL
Examineur	Michel	COURDESSES
Directeur de thèse	Philippe	SOUERES

Rapport LAAS N° 99549

Table des matières

Avant-propos	7
I Introduction	11
II Commande référencée vision d'un robot mobile muni d'une caméra	17
II.1 Introduction	17
II.2 Modélisation	18
II.2.1 Modèle du robot complet	19
II.2.2 Modèle de la caméra	30
II.2.3 Interaction caméra/environnement	31
II.3 Formalisme des fonctions de tâche et synthèse de la commande .	34
II.3.1 Présentation du formalisme	35
II.3.2 Synthèse de la commande	42
II.4 Application à une tâche de positionnement	43
II.4.1 Synthèse de la commande dans le cas du robot muni de la platine	45
II.4.2 Synthèse de la commande dans le cas du robot équipé du bras	46
II.5 Conclusion	49
III Contribution à l'évitement d'obstacles pendant la phase de transition d'un suivi de chemin	51
III.1 Formalisme du suivi de chemin	52
III.2 Synthèse	55
III.2.1 Synthèse en absence d'obstacles	55
III.2.2 Extension : synthèse en présence d'obstacles	57
III.3 Résultats de simulation	64
III.4 Conclusion	66

IV Commande référencée multi-capteurs d'un robot mobile en environnement encombré	69
IV.1 Introduction	69
IV.2 Cas d'un robot mobile équipé d'une caméra montée sur une platine	71
IV.2.1 Stratégie générale de commande	72
IV.2.2 Tâche de positionnement classique	73
IV.2.3 Relaxation des contraintes de déplacement imposées par la tâche référencée vision de positionnement	106
IV.2.4 Conclusion	122
IV.3 Cas d'un manipulateur mobile équipé d'une caméra	124
IV.3.1 Méthodes reposant sur la définition de deux objectifs primaires	125
IV.3.2 Méthodes exploitant le formalisme des tâches redondantes	142
IV.3.3 Conclusion	157
IV.4 Discussion	158
IV.4.1 Comparaison des différentes approches	158
IV.4.2 Enchaînement de tâches référencées capteur	164
IV.5 Conclusion	166
V CONCLUSION	169
Références bibliographiques	171

Table des figures

II.1	Configuration d'un robot mobile dans un environnement plan . .	20
II.2	Robot mobile muni d'une plateforme commandable en lacet . . .	21
II.3	Configuration de référence du bras manipulateur	24
II.4	Configuration du robot simulant un manipulateur plan redondant à deux degrés de liberté	26
II.5	Robot mobile muni d'un bras manipulateur plan à deux degrés de liberté	28
II.6	Modèle pinhole de la caméra	30
II.7	Deux configurations possibles pour la même position de l'organe terminal	39
II.8	Trajectoire du robot et évolution des indices visuels lors de la réalisation de la tâche globale e_{pos}	46
II.9	Trajectoire du robot et évolution des indices visuels lors de la réalisation de la tâche globale e_{AV}	48
II.10	Trajectoire du robot et évolution des indices visuels lors de la réalisation de la tâche référencée vision de positionnement	49
III.1	Description du problème du suivi de chemin	53
III.2	Evitement d'obstacle pendant le transitoire d'un suivi de chemin	59
III.3	Influence de γ sur la trajectoire du robot dans le repère de la scène	59
III.4	Influence de γ sur la trajectoire du robot dans le plan (y_e, θ_e) . .	59
III.5	Variation de γ pour l'évitement d'obstacle	64
III.6	Suivi de chemin en environnement encombré	66
III.7	Evolution de γ pendant le suivi de chemin	66
III.8	Evolution de la variété de glissement z pendant le suivi de chemin	66
III.9	Suivi de chemin dans l'espace libre	67
III.10	Même tâche en environnement encombré	67
IV.1	Paramètres pour la stratégie générale de contournement	72
IV.2	Evitement d'obstacle avec le potentiel-rotation	75

IV.3	Tâche référencée vision en environnement encombré avec le potentiel IV.2	78
IV.4	Evolution des indices visuels dans l'image	78
IV.5	Puits de potentiel pour un obstacle concave	80
IV.6	Evitement d'obstacle avec un potentiel répulsif rotatif	81
IV.7	Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles convexes - Evolution des indices visuels	90
IV.8	Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles convexes : Vue 3D	90
IV.9	Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles concaves - Evolution des indices visuels	90
IV.10	Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles concaves : Vue 3D	90
IV.11	Evitement d'obstacle par suivi de chemin	91
IV.12	Stratégie de contournement	96
IV.13	Tâche référencée vision en environnement encombré	103
IV.14	Evolution des indices visuels	103
IV.15	Evolution de μ	104
IV.16	Evolution du gain λ	104
IV.17	Vitesse linéaire de la base mobile	104
IV.18	Vitesse angulaire de la base mobile	105
IV.19	Zoom sur la vitesse angulaire de la base mobile pendant l'évitement	105
IV.20	Vitesse angulaire de la platine	105
IV.21	Zoom sur la vitesse angulaire de la platine pendant l'évitement .	105
IV.22	Evolution de e_1 en fonction de la position de la caméra	108
IV.23	Représentation du problème	111
IV.24	Trajectoire du robot pour la première méthode	121
IV.25	Trajectoire du robot pour la deuxième méthode	121
IV.26	Evolution des indices visuels dans le plan image pour la première méthode	121
IV.27	Evolution des indices visuels pour la deuxième méthode	121
IV.28	Evolution temporelle de la vitesses linéaire pour la première méthode	122
IV.29	Evolution temporelle de la vitesse linéaire pour la deuxième méthode	122
IV.30	Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la base pour la première méthode	122
IV.31	Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la base pour la deuxième méthode	122

IV.32	Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la platine pour la première méthode	123
IV.33	Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la platine pour la deuxième méthode	123
IV.34	Définition de la distance d	128
IV.35	Singularité de la matrice jacobienne J_{EV}	129
IV.36	Evolution de μ pour la fusion des objectifs primaires à la tâche .	130
IV.37	Stratégie d'évitement pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	130
IV.38	Trajectoire du robot pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	134
IV.39	Evolution des indices visuels pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	134
IV.40	Evolution de μ pour fusion des objectifs primaires à la tâche . .	134
IV.41	Déterminant de la matrice jacobienne J_T	134
IV.42	Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	135
IV.43	Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	135
IV.44	Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	135
IV.45	Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la tâche	135
IV.46	Incompatibilité de la tâche référencée vision et de l'évitement lorsque d_0 est trop élevée	136
IV.47	Trajectoire du robot pour la fusion des objectifs primaires à la commande	140
IV.48	Evolution des indices visuels pour la fusion des objectifs primaires à la commande	140
IV.49	Evolution de μ pour la fusion des objectifs primaires à la commande	140
IV.50	Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la commande	141
IV.51	Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la commande	141
IV.52	Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la commande	141
IV.53	Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la commande	141
IV.54	Trajectoire du robot pour la fusion de tâches globales	148

IV.55	Evolution des indices visuels pour la fusion de tâches globales . .	148
IV.56	Evolution de μ pour la fusion de tâches globales	148
IV.57	Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion de tâches globales	149
IV.58	Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion de tâches globales	149
IV.59	Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion de tâches globales	149
IV.60	Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion de tâches globales	149
IV.61	Echec de l'exécution de la tâche robotique	150
IV.62	Trajectoire du robot pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche	154
IV.63	Evolution des indices visuels pour la fusion des objectifs secon- daires à la tâche	154
IV.64	Evolution de μ pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche	155
IV.65	Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion des objectifs se- condaires à la tâche	155
IV.66	Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche	155
IV.67	Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche	156
IV.68	Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche	156
IV.69	Réalisation d'une deuxième tâche référencée multi-capteurs par fusion de tâches secondaires	156
IV.70	Echec de l'exécution de la tâche référencée multi-capteurs par fusion de tâches secondaires	156
IV.71	Enchaînement de tâches référencées vision	166
IV.72	Enchaînement de tâches élémentaires référencées multi-capteurs	166

Avant-propos

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS. Je remercie les directeurs successifs du LAAS, Alain Costes et Jean-Claude Laprie, de m'avoir accueillie au sein de leur laboratoire.

Je remercie également Malik Ghallab, Directeur de Recherches au CNRS et responsable du groupe Robotique et Intelligence Artificielle, de m'avoir permis de travailler dans son groupe de recherche et d'avoir accepté de présider ce jury de thèse.

Je tiens à dire toute ma reconnaissance à François Chaumette, Chargé de Recherches à l'IRISA de Rennes, Dominique Meizel, Professeur à l'Université Technologique de Compiègne, et Alessandro De Luca, Professeur à l'Université de Rome "La Sapienza", pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi que pour leur lecture pertinente du manuscrit.

Merci également à Tarek Hamel, Maître de Conférences à l'Université d'Evry-Val d'Essonne pour sa participation à ce jury, ainsi que pour toutes nos collaborations et discussions.

Je voudrais ici exprimer toute ma gratitude à Michel Courdesses, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, pour avoir toujours su trouver un petit moment à me consacrer - chaque fois que je l'ai sollicité - malgré un emploi du temps souvent très chargé. Merci, Michel, de m'avoir fait bénéficier de tes compétences d'automaticien pendant ces trois années de thèse, et même celles qui les ont précédées...

Toute ma gratitude va également à Philippe Souères, Chargé de Recherches au CNRS, qui a accepté d'encadrer ces travaux et à qui cette thèse doit énormément (et bien plus encore). Un grand merci, Philippe, pour ton soutien moral et

scientifique pendant ces trois années de thèse qui resteront pour moi un excellent souvenir.

Je remercie l'ensemble du groupe RIA, permanents et doctorants, et plus particulièrement ceux que j'ai souvent eu l'occasion de cotoyer pendant ma thèse, et dont j'ai pu apprécier les qualités humaines et scientifiques, remerciements à partager avec tous ceux et toutes celles qui ont contribué à rendre mon séjour au LAAS agréable.

Mes remerciements vont également aux enseignants de l'UPS, au personnel de l'AIP, aux chercheurs du DCSD du CERT et à ceux du LBE de l'INRA à Narbonne, ainsi qu'à toutes les personnes qui, à un moment ou à un autre, m'ont apporté leur aide, et dont il est impossible de dresser ici une liste exhaustive. Merci à tous pour votre accueil et votre amitié.

Enfin, je ne saurais conclure sans dire un grand MERCI à ma famille et mes proches qui m'ont supportée pendant les 27 dernières années sans se lasser. . . Sans eux, rien de tout cela n'aurait été possible. . .

A mes parents et ma famille
A mon grand-père

Chapitre I

Introduction

La navigation de robots mobiles en environnement structuré est un thème de recherche central depuis plusieurs années dans le groupe Robotique et Intelligence Artificielle du LAAS/CNRS. Classiquement, le problème est traité en deux temps. Tout d'abord, une étape de planification permet de déterminer un chemin ou une trajectoire de consigne réalisable par le robot, c'est-à-dire dans l'espace libre et vérifiant les contraintes non holonomes de roulement sans glissement caractéristiques des robots mobiles. Dans un deuxième temps, une étape de synthèse définit une loi de commande permettant au véhicule de suivre le chemin ou la trajectoire spécifiée. Le problème de la commande des robots mobiles a suscité l'intérêt des chercheurs en Automatique pendant les dix dernières années. Il recouvre classiquement trois sous-problèmes : le suivi de trajectoire, le suivi de chemin, et la stabilisation en une configuration fixe. Ils sont généralement posés en termes de régulation à zéro d'une erreur entre la configuration courante du véhicule et la consigne définie par la trajectoire, le chemin ou la posture de référence. Les deux premiers problèmes ont été résolus à l'aide des techniques classiques de commande non linéaire. De telles lois de commande sont par exemple proposées dans [Kanayama *et al.* 90], [Samson & Ait-Abderrahim 90], [Samson 92], ou [De Luca *et al.* 98]. Le problème de stabilisation en un point est par contre beaucoup plus complexe, puisqu'il a été montré qu'il ne peut pas exister de retour d'état continu permettant de stabiliser un robot dans une configuration prédéfinie [Brockett 83]. Ce problème ne peut donc être traité comme un cas

particulier du suivi de chemin ou de trajectoire, et d'autres classes de lois de commande doivent être mises en œuvre. Deux approches ont été proposées et consistent à synthétiser des correcteurs instationnaires ou discontinus. Le lecteur intéressé pourra trouver une description précise de ces différentes méthodes dans [Canudas de Wit *et al.* 94] ainsi que dans [Hamel 96].

La résolution de ces différents problèmes de commande requiert la détermination de l'état du robot et donc sa reconstruction par le biais d'une étape de localisation. Celle-ci ne peut être effectuée uniquement sur la base des données fournies par les capteurs proprioceptifs du robot qui ne prennent pas en compte les problèmes dus à l'interaction avec l'environnement comme le glissement des roues sur le sol. On ne peut donc espérer localiser précisément un véhicule en position et orientation uniquement à l'aide de ces données, et il s'avère nécessaire de faire appel aux capteurs extéroceptifs qui renseignent sur la situation du robot dans son environnement. Ainsi, les capteurs de force qui quantifient le contact avec les éléments extérieurs au robot, les capteurs proximétriques ou télémétriques (ultra-sons, lasers, ...) qui détectent des objets situés à plus ou moins grande distance du véhicule, ou bien les caméras qui permettent de percevoir l'environnement sont autant d'exemples de capteurs extéroceptifs. La littérature propose de nombreuses méthodes de localisation basées sur ces capteurs. Ainsi, dans [Kosaka & Kak 92], la vision est utilisée en complément de l'odométrie pour localiser le robot tandis que des ultra-sons permettent de détecter les obstacles. Une extension de cette approche est présentée dans [Ohya *et al.* 98] où seuls les obstacles mobiles sont repérés par les ultra-sons tandis que le signal vidéo est traité pour à la fois localiser le robot et détecter les obstacles statiques. Dans [Durieu *et al.* 96], des algorithmes combinant la localisation relative obtenue par les capteurs proprioceptifs et le recalage absolu par rapport à des balises ou des segments de droites sont proposés. Néanmoins, quel que soit le type de localisation considéré, les lois de commande synthétisées dans ce cas seront en boucle fermée sur l'état estimé du robot, et les tâches à réaliser (suivi de chemin ou de trajectoire, stabilisation dans une configuration) ne seront pas parfaitement exécutées. Il est donc nécessaire de s'assurer que les erreurs de localisation n'induiront pas un échec de la tâche (du fait d'une perte de stabilité ou de performances insuffisantes). Les travaux menés par T. Hamel ont permis d'apporter une première réponse à ces questions en caractérisant des lois de commande robustes vis à vis de ces erreurs de localisation [Hamel 96]. Ces résultats ont été ensuite affinés dans le cadre d'une collaboration avec le LAAS [Hamel *et al.* 97]. D'autres techniques permettent également de prendre en compte ces incertitudes directement au niveau de la planification [Khatib 96] [Bouilly 97].

La commande référencée capteurs permet de s'affranchir de cette étape de localisation. Elle consiste à exprimer les tâches à réaliser, non plus dans l'espace des configurations, mais directement dans l'espace du capteur sous la forme d'une relation locale entre le robot et son environnement. Elle a donc pour objectif de définir des lois de commande en boucle fermée sur les informations extéroceptives et ne nécessite plus la reconstruction de l'état du robot. De ce fait, les lois de commande synthétisées dans le cadre de cette approche sont de type retour de sortie et permettent de réaliser les tâches désirées de manière plus précise. Néanmoins, cette approche requiert l'utilisation de capteurs performants, désormais disponibles, capables de fournir les mesures à une fréquence compatible avec la fréquence d'échantillonnage de l'asservissement. Ainsi, toute tâche pouvant s'exprimer sous la forme d'une relation entre le robot et l'environnement (ou plus précisément entre le capteur et l'environnement lorsque ce dernier est embarqué sur le véhicule) sera réalisable par le biais de la commande référencée capteurs. Il est dès lors possible de commander un bras manipulateur directement à l'aide des informations fournies par un capteur d'effort, de telle sorte que son effecteur suive une surface plane [Espiau *et al.* 90]. De même, dans le domaine de la robotique mobile, le suivi d'un mur à distance constante ou l'évitement d'un obstacle peut être défini sur la base de données provenant de capteurs ultrasoniques ou télémétriques comme dans [Khatib 96]. Parmi les capteurs extéroceptifs existants, la vision apparaît comme un capteur privilégié pour réaliser des tâches robotiques. En effet, du fait de la richesse du signal vidéo, les informations que l'on peut extraire d'une image sont très variées et de plus ou moins haut niveau selon le traitement mis en œuvre. Néanmoins, comme nous l'avons mentionné précédemment, les informations choisies pour effectuer une tâche doivent pouvoir être extraites en temps réel. Seules des primitives simples seront donc exploitables en commande. Il existe deux structures de commande référencée vision [Sanderson & Weiss 80] : l'une repose sur un asservissement en situation de la caméra par rapport à l'environnement, tandis que l'autre est basée sur la régulation à zéro d'une erreur dans l'image. Ainsi, dans le premier cas, la tâche est décrite en termes d'une situation à atteindre entre la caméra et l'environnement (en général, un objet face auquel la caméra doit être positionnée). Il est alors nécessaire d'effectuer une interprétation de l'image de manière à reconstruire la situation courante de la caméra. La littérature met en exergue deux approches distinctes selon le niveau de contrôle. Ainsi, lorsque la commande du robot est gérée par un asservissement classique en position, on parle de "static look and move" si les étapes d'acquisition d'image et de mouvement se font séquentiellement, ou de "dynamic look and move" si ces deux phases sont réalisées simultanément. Dans le cas contraire où l'asservissement en position n'intervient pas, on parlera plutôt de "position-based visual

servoing”. Dans l’asservissement visuel 2D, par contre, la tâche n’est plus décrite en termes d’une situation entre la caméra et l’environnement, mais d’un motif à atteindre dans l’image. La commande est alors synthétisée uniquement sur la base des informations visuelles. Cette dernière approche permet donc de s’affranchir de l’étape d’interprétation et des problèmes qui y sont liés. Ceux-ci sont tout à fait similaires à ceux induits par la localisation du robot puisqu’ils sont inhérents, d’une part, au temps de calcul, et d’autre part, aux erreurs d’estimation. Ce résultat est logique dans la mesure où, pour l’asservissement en situation, la tâche est spécifiée dans l’espace des configurations du robot sous la forme d’une situation à atteindre pour la caméra. Une description complète de ces techniques est donnée dans [Hutchinson *et al.* 96] et un historique de la commande référencée vision est proposé dans [Corke 96]. Outre l’asservissement visuel 2D que nous venons de mentionner, deux autres structures de commandes référencées vision sont envisageables : l’asservissement visuel 2D1/2 [Malis 98] et d2D/dt [Crétual 98]. Nous ne considérerons dans le cadre de ces travaux que l’asservissement visuel 2D. Nous ne détaillerons donc pas les deux dernières approches mentionnées. Différentes techniques de commande reposant sur le principe de l’asservissement visuel 2D ont été appliquées à la conduite de véhicules. Dans [Martinet *et al.* 97], le modèle cinématique du robot est linéarisé aux petits angles puis exprimé dans l’espace capteur. Une loi de commande de type retour d’état¹ est alors synthétisée sur la base des résultats de l’automatique classique, et permet au robot de suivre une route. Une extension de cette méthode est proposée dans [Martinet *et al.* 98] où les techniques de commande $\mathcal{H}_\infty$ développées dans [Doyle *et al.* 89] sont exploitées pour synthétiser une commande robuste aux erreurs de modélisation.

Le formalisme des fonctions de tâches exposé dans [Samson *et al.* 91] offre un cadre rigoureux pour la synthèse de lois de commande référencées capteur. Cette approche, initialement conçue pour des bras manipulateurs, consiste à modéliser la tâche considérée sous la forme d’une *fonction de tâche* (notion que nous définirons dans le chapitre II), puis à synthétiser un correcteur permettant de la réguler à zéro. Elle a été appliquée au cas particulier de la commande référencée vision d’un bras manipulateur par F. Chaumette [Chaumette 90] [Espiau *et al.* 92]. Cependant, cette technique ne peut être directement étendue au cas des robots mobiles du fait de la contrainte non holonome de roulement sans glissement. En effet, cette contrainte entrave les mouvements de la caméra et les tâches ne peuvent être réalisées que par le biais de manœuvres. C’est pourquoi, la solution préco-

1. Cette loi de commande est aussi un retour de sortie puisque l’équation d’état est exprimée directement en fonction des mesures. Cette modélisation requiert l’inversibilité de la matrice de sortie de telle sorte que l’état puisse être déterminé de manière unique à partir de l’équation de mesure. Cette propriété est à rapprocher de la ρ -admissibilité sur laquelle nous reviendrons.

nisée par R. Pissard-Gibollet [Pissard-Gibollet & Rives 91] [Pissard-Gibollet 93] consiste à introduire des degrés de liberté supplémentaires permettant à la caméra de se déplacer indépendamment de la base. Ainsi, en considérant le mouvement de la caméra (et non plus celui de la plateforme mobile comme dans les approches classiques de commande dans l'espace d'état), il est possible de s'affranchir des contraintes non holonomes et donc d'appliquer le formalisme des fonctions de tâche. Naturellement, le robot mobile lui-même reste non holonome; c'est le mouvement de la caméra qui est devenu holonome et qui peut donc être commandé par les techniques classiques de l'asservissement visuel. Outre les travaux développés par R. Pissard-Gibollet [Pissard-Gibollet 93] [Pissard-Gibollet *et al.* 95] [Pissard-Gibollet & Rives 95], on peut citer, dans le domaine de la commande référencée vision d'un robot mobile, ceux de P. Rives [Rives *et al.* 93] ainsi que ceux de R. Swain [Swain 99]. D.P. Tsakiris s'intéresse également à ce thème et propose une approche hybride permettant de stabiliser la base mobile dans une configuration prédéfinie, tandis que la caméra embarquée sur une platine ou un bras manipulateur est commandée sur la base du formalisme des fonctions de tâche [Tsakiris *et al.* 96] [Tsakiris *et al.* 97a] [Tsakiris *et al.* 97b]. Naturellement, les techniques de commande référencée vision ne s'adressent pas qu'aux robots mobiles ou aux bras manipulateurs. Elles peuvent également être adaptées pour contrôler d'autres systèmes mécaniques tels que des sous-marins par exemple [Santos *et al.* 95] [Rives & Borrelly 97].

Cependant, une tâche robotique complexe ne peut s'exprimer exclusivement en termes de données visuelles. En effet, pour une tâche simple de navigation guidée par asservissement visuel, un robot mobile doit pouvoir éviter des obstacles imprévus. Or, l'asservissement visuel est basé sur la seule régulation à zéro de l'erreur entre ce que le robot voit réellement et ce qu'il doit voir lorsque la tâche est parfaitement réalisée. Il s'avère donc mal adapté pour traiter le problème des obstacles, et il est nécessaire de prendre en compte d'autres types de mesures permettant de caractériser le risque de collision.

C'est précisément ce problème que nous avons voulu étudier dans le cadre de cette thèse. Nous nous sommes intéressés à la synthèse de lois de commande référencées multi-capteurs, i.e., intégrant à la fois les données visuelles nécessaires à l'exécution de la tâche référencée vision et les informations proximétriques requises pour l'évitement d'obstacle. Notre objectif a été de développer - à partir des techniques de commande référencée vision existantes - un ensemble de lois de commande référencées multi-capteurs permettant à un robot mobile de réaliser une tâche référencée vision prédéfinie dans un environnement encombré. Nous avons ensuite comparé les diverses lois obtenues en termes de stabilité et per-

formances afin de sélectionner la (ou les) approches les mieux adaptées à nos besoins. Dans le cadre de ces travaux, nous avons considéré un robot mobile non holonome de la famille Hilare équipé d'une caméra et d'un laser SICK 2D rapide. Ce dernier fournit la distance et l'orientation relative entre le robot et l'obstacle, et, sur la base de ces mesures, un module fonctionnel produit une estimation de sa courbure locale. En outre, pour des raisons de simplicité, nous nous sommes volontairement restreints à l'exécution d'une tâche référencée vision canonique. Nous nous sommes intéressés uniquement au positionnement de la caméra embarquée face à une cible. Celle-ci est composée de quatre points et située à la même hauteur que le centre optique de la caméra de telle sorte que des mouvements plans suffisent pour réaliser cette tâche. Enfin, nous avons supposé que les obstacles rencontrés sont statiques, de forme simple (polyèdres curvilignes, quadriques, ...), et de hauteur inférieure à celle de la caméra afin d'éviter les phénomènes d'occultation.

Notre manuscrit est structuré de la manière suivante. Dans le chapitre II, nous introduisons les résultats de l'asservissement visuel 2D classique et présentons le formalisme des fonctions de tâches. Nous exploitons alors ce formalisme pour réaliser une tâche référencée vision de positionnement pour les deux types de robots considérés, une base mobile munie d'une caméra montée d'abord sur une platine commandable en lacet, puis sur un bras manipulateur. Nous présentons ensuite dans le chapitre III des travaux préliminaires sur l'évitement d'obstacles pendant le transitoire d'un suivi de chemin avant d'introduire dans le chapitre IV nos principaux résultats concernant la commande référencée multi-capteurs d'un robot mobile en environnement encombré. Nous comparons alors les différentes approches proposées et concluons quant à leur intérêt. Enfin, sur la base de ces résultats, nous proposons quelques pistes de modélisation d'une tâche robotique complexe sous la forme d'un enchaînement de tâches élémentaires et définissons cette dernière notion. Finalement, nous concluons sur l'ensemble des travaux réalisés et présentons les différentes perspectives qui peuvent être envisagées.

Chapitre II

Commande référencée vision d'un robot mobile muni d'une caméra

II.1 Introduction

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'application des techniques de commande référencée vision à la robotique mobile se heurte au problème de la non holonomie. En effet, le robot que nous considérons est de type char et est soumis à une contrainte non holonome de roulement sans glissement. De ce fait, il existe des directions (dans notre cas, celles données par l'axe des roues non orientables) selon lesquelles le robot ne peut se déplacer *instantanément*. Notons que cette contrainte n'empêche absolument pas un véhicule d'atteindre une configuration spécifiée, la convergence vers cette dernière étant alors réalisée par le biais de manœuvres. Donc, si la caméra est rigidement liée à la base mobile, l'exécution d'une tâche référencée vision quelconque ne pourra s'envisager qu'à travers un certain nombre de manœuvres, limitant ainsi les possibilités d'évolution de la caméra et par conséquent les tâches réalisables. De plus, dans un tel cas, il est impossible de définir un difféomorphisme entre l'espace d'état et l'espace des sorties, définition sur laquelle sont basées les techniques classiques de commande référencée vision [Samson *et al.* 91] [Chaumette 90]. C'est pourquoi, l'extension de ces techniques à la commande de robots mobiles requiert l'introduction de

degrés de liberté supplémentaires permettant à la caméra de se déplacer indépendamment de la base. Ces degrés de liberté peuvent être obtenus mécaniquement en embarquant sur cette dernière une platine ou encore un bras manipulateur. Nous chercherons dès lors à contrôler non plus le mouvement de la base comme dans les techniques classiques de l'espace d'état [Canudas de Wit *et al.* 94], mais au contraire celui de la caméra¹, et considérerons donc le modèle du système mécanique complet plutôt que celui de la plateforme seule. De cette manière, le mouvement de la caméra ne sera plus entravé par les contraintes de non holonomie, et il sera possible d'exploiter directement le formalisme des fonctions de tâches, développé initialement pour des robots holonomes [Pissard-Gibollet 93]. Naturellement, la modélisation proposée dans cette méthode ne permet plus de contrôler indépendamment le mouvement de la base puisqu'il sera conditionné par le déplacement de la caméra nécessaire pour réaliser la tâche référencée vision. La configuration finale de la plateforme mobile ne pourra donc être prévue, et dépendra fortement des conditions initiales et de la trajectoire suivie par la caméra. Un tel comportement peut par exemple être gênant en environnement encombré.

Nous considérerons ici une base mobile de type char équipée successivement d'une platine commandable en lacet puis d'un bras manipulateur à six degrés de liberté. Ces deux systèmes mécaniques étant commandables en vitesse, nous déterminerons le modèle cinématique global décrivant le comportement de chacun d'entre eux. Nous présenterons ensuite de manière relativement détaillée le formalisme des fonctions de tâche développé et montrerons comment il peut être appliqué pour réaliser une tâche référencée vision de positionnement.

II.2 Modélisation

Dans cette section, nous nous intéressons exclusivement aux aspects modélisation, la synthèse de la commande étant traitée par la suite. Nous établirons donc successivement les modèles des différents robots et de la caméra, et terminerons en définissant la notion de torseur d'interaction.

1. L'idée de commander un point déporté par rapport à l'axe des roues pour se dégager des contraintes de non holonomie a été initialement proposée dans [Samson & Ait-Abderrahim 90]. Elle est également exploitée dans [De Luca *et al.* 98].

II.2.1 Modèle du robot complet

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous considérons une base mobile équipée successivement d'une simple platine commandable en lacet, puis d'un bras manipulateur à six degrés de liberté, et cherchons à déterminer le modèle cinématique global de ces deux systèmes mécaniques. Il s'agit donc ici de calculer le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère de la scène, que nous noterons R , en fonction des vitesses disponibles sur le robot considéré. Pour cela, nous exploitons l'approche développée dans [Pissard-Gibollet & Rives 91] et [Pissard-Gibollet 93]. Celle-ci s'appuie sur les relations suivantes, bien connues en mécanique classique, pour exprimer le torseur vitesse de la caméra :

$$T_{C/R} = \begin{pmatrix} V_{C/R_M} & + & V_{M/R} & + & \Omega_{R_M/R} \wedge MC \\ \Omega_{R_C/R_M} & + & \Omega_{R_M/R} & & \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

où C et M désignent respectivement le centre optique de la caméra et le point de référence du robot, R_C et R_M représentant les repères associés. Un schéma récapitulatif de ces différentes notions est présenté dans la suite de ce manuscrit pour chacun des deux types de robots considérés (cf. figures II.2 et II.5). V_{C/R_M} et Ω_{R_C/R_M} désignent les vitesses linéaire et angulaire de la caméra relativement à R_M , tandis que $V_{M/R}$ et $\Omega_{R_M/R}$ représentent celles du point de référence M par rapport à R , définissant le modèle cinématique du véhicule. Enfin, $T_{C/R} = [V_{C/R}^T \ \Omega_{R_C/R}^T]^T$ définit le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère de la scène R . La détermination de ce torseur requiert naturellement la projection de la relation II.1 dans un repère choisi au préalable. La commande référencée vision consistant à définir le torseur cinématique de la caméra de manière à satisfaire un motif image prédéfini, $T_{C/R}$ devra être exprimé dans le repère R_C [Pissard-Gibollet & Rives 91]. L'approche proposée consiste donc à déterminer $T_{C/R}$ et à l'exprimer dans le repère R_C . Elle se déroule en trois phases distinctes :

- le calcul du modèle cinématique de la base mobile,
- le calcul du torseur cinématique de la caméra par rapport au repère lié à la base mobile,
- la fusion de ces deux modèles à travers l'équation II.1.

Nous nous attacherons donc dans un premier temps à déterminer le modèle cinématique de la base mobile, commun aux deux systèmes mécaniques considérés, avant de traiter séparément les deux dernières étapes mentionnées puisqu'elles sont étroitement liées au type de robot étudié.

II.2.1.1 Modèle cinématique de la base mobile

La configuration d'une base mobile est décrite par un vecteur $P = [x \ y \ \theta]^T$ où le couple (x, y) désigne les coordonnées du point de référence M du robot par rapport au repère lié à la scène $R (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ et l'angle θ représente l'orientation du véhicule par rapport à l'axe (O, x) de ce même repère (cf. figure II.1). Ces trois variables sont nécessaires et suffisantes pour définir une situation quelconque du robot dans R . Enfin, $R_M (M, \vec{x}_M, \vec{y}_M, \vec{z}_M)$ désigne le repère lié au robot mobile.

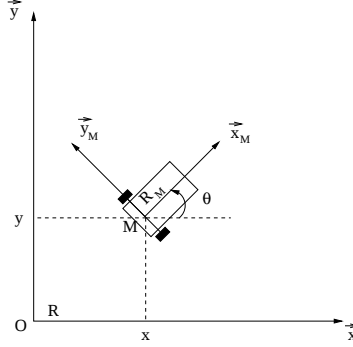


FIG. II.1 – Configuration d'un robot mobile dans un environnement plan

Le modèle cinématique du robot est alors classiquement défini par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

où v et ω désignent respectivement les vitesses linéaire et angulaire de la base mobile. Les vitesses $V_{M/R}$ et $\Omega_{R_M/R}$ définissant le torseur cinématique du point représentatif M du robot sont donc données par :

$$\begin{cases} V_{M/R}^R = [v \cos \theta \ v \sin \theta \ 0]^T \\ \Omega_{R_M/R}^R = [0 \ 0 \ \omega]^T \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

où l'exposant permet de préciser le repère dans lequel sont exprimés les différents vecteurs considérés. L'expression de ces vitesses est plus simple dans le repère R_M puisque nous obtenons naturellement :

$$\begin{cases} V_{M/R}^{R_M} = [v \ 0 \ 0]^T \\ \Omega_{R_M/R}^{R_M} = \Omega_{R_M/R}^R \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Il reste maintenant à déterminer le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère R_M pour définir complètement la relation II.1. Celui-ci dépendant

du système mécanique considéré, nous détaillons les calculs pour chaque type de robot.

II.2.1.2 Robot mobile muni d'une simple platine

Nous considérons ici un robot mobile muni d'une caméra montée sur une platine commandable en lacet (figure II.2). Le point P désigne le centre de

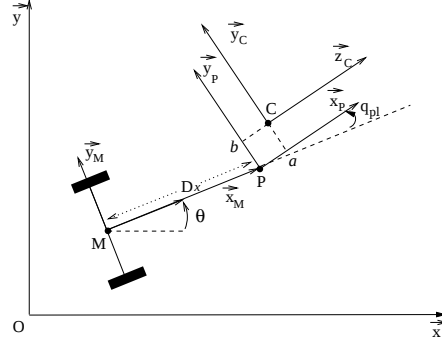


FIG. II.2 – Robot mobile muni d'une plateforme commandable en lacet

rotation de la platine et D_x la distance entre M et P . R_P ($P, \vec{x}_P, \vec{y}_P, \vec{z}_P$) et R_C ($C, \vec{x}_C, \vec{y}_C, \vec{z}_C$) représentent respectivement les repères liés à la platine et à la caméra. Enfin, q_{pl} définit l'orientation de R_P par rapport à R_M . Le torseur cinématique de la caméra relativement à ce repère s'exprime alors comme suit :

$$T_{C/R_M} = \begin{pmatrix} V_{C/R_M} \\ \Omega_{R_C/R_M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{C/R_P} + V_{P/R_M} + \Omega_{R_P/R_M} \wedge PC \\ \Omega_{R_C/R_P} + \Omega_{R_P/R_M} \end{pmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Or, $V_{C/R_P} = dPC/dt$ et $V_{P/R_M} = dMP/dt$ sont nulles puisque les points P et C ne se déplacent pas par rapport à ces repères. De plus, R_C restant fixe par rapport à R_P , $\Omega_{R_C/R_P} = 0$. L'équation II.5 se réduit donc à :

$$T_{C/R_M} = \begin{pmatrix} \Omega_{R_P/R_M} \wedge PC \\ \Omega_{R_P/R_M} \end{pmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Le vecteur PC est défini par les coordonnées du centre optique de la caméra dans le repère R_P . Celles-ci sont obtenues par un calibrage *hand-eye* et seront notées ici a, b, c . Donc, dans le repère R_P , PC est directement donné par le vecteur $[a \ b \ c]^T$. Pour des raisons de simplicité, nous projetons l'équation II.6 dans le repère R_M , plutôt que de l'exprimer directement dans R_C . La matrice de passage

entre R_M et R_P étant définie comme suit :

$$\mathcal{C}_{R_M R_P} = \begin{pmatrix} \cos q_{pl} & -\sin q_{pl} & 0 \\ \sin q_{pl} & \cos q_{pl} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.7})$$

le vecteur PC exprimé dans R_M est donné par :

$$PC^{R_M} = \mathcal{C}_{R_M R_P} PC^{R_P} \quad (\text{II.8})$$

Il reste alors à déterminer la vitesse de rotation de R_P par rapport à R_M pour définir complètement T_{C/R_M} . Compte tenu de la géométrie du robot représenté sur la figure II.2, Ω_{R_P/R_M} est définie par le vecteur $[0 \ 0 \ \dot{q}_{pl}]^T$. Finalement, à l'aide de cette dernière équation et des relations II.6 et II.8, nous déduisons l'expression du torseur cinématique de la caméra relativement à R_M :

$$T_{C/R_M}^{R_M} = \begin{pmatrix} V_{C/R_M}^{R_M} \\ \Omega_{R_C/R_M}^{R_M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a \sin q_{pl} - b \cos q_{pl} \\ a \cos q_{pl} - b \sin q_{pl} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{q}_{pl} \quad (\text{II.9})$$

Rappelons que notre objectif est d'établir l'expression du torseur cinématique de la caméra par rapport au repère de la scène sur la base de l'équation II.1. Pour cela, il reste à déterminer le vecteur MC . D'après la relation de Chasles, $MC = MP + PC$, et, en projetant dans le repère R_M , nous obtenons :

$$MC^{R_M} = \begin{pmatrix} D_x + a \cos q_{pl} - b \sin q_{pl} \\ a \sin q_{pl} + b \cos q_{pl} \\ h + c \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

où h désigne la hauteur de la platine par rapport à la plateforme mobile. Finalement, à l'aide des équations II.1, II.4, II.9, et II.10, et en définissant un vecteur $q = [s_c \ \theta \ q_{pl}]^T$ où s_c désigne l'abscisse curviligne du point M , le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère de la scène s'exprime dans le repère R_M de la manière suivante :

$$T_{C/R}^{R_M} = \begin{pmatrix} 1 & -(a \sin q_{pl} + b \cos q_{pl}) & -(a \sin q_{pl} + b \cos q_{pl}) \\ 0 & D_x + a \cos q_{pl} - b \sin q_{pl} & a \cos q_{pl} - b \sin q_{pl} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \dot{q} \quad (\text{II.11})$$

où $\dot{q} = [v \ \omega \ \dot{q}_{pl}]^T$. Il reste maintenant à projeter ce vecteur dans le repère de la caméra. La matrice de passage entre R_M et R_C est classiquement définie par la relation suivante :

$$\mathcal{C}_{R_M R_C} = \mathcal{C}_{R_M R_P} \mathcal{C}_{R_P R_C} \quad (\text{II.12})$$

où $\mathcal{C}_{R_M R_P}$ est donné par la relation II.7, tandis que $\mathcal{C}_{R_P R_C}$ est déterminée par la calibration hand-eye et s'exprime comme suit :

$$\mathcal{C}_{R_P R_C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Finalement, le torseur cinématique de la caméra par rapport à R et exprimé dans son propre repère R_C est défini par :

$$T_{C/R}^{R_C} = \begin{pmatrix} \mathcal{C}_{R_M R_C}^T & 0 \\ 0 & \mathcal{C}_{R_M R_C}^T \end{pmatrix} T_{C/R}^{R_M} \quad (\text{II.14})$$

Soit tous calculs faits :

$$T_{C/R}^{R_C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\sin q_{pl} & a + D_x \cos q_{pl} & a \\ \cos q_{pl} & -b + D_x \sin q_{pl} & -b \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dot{q} \quad (\text{II.15})$$

La matrice jacobienne précédente permet de décrire le mouvement de la caméra par rapport au repère de la scène. Les lignes de zéros qu'elle comporte définissent donc les mouvements impossibles pour la caméra. Ainsi, celle-ci ne peut se déplacer linéairement selon l'axe $\vec{x}_C$, ni tourner autour de $\vec{y}_C$ et $\vec{z}_C$. Ces résultats sont conformes à la géométrie du robot représenté sur la figure II.2, et valident notre modèle. Ces lignes de zéro n'apportant aucune information, nous pouvons purement et simplement les supprimer. Nous définissons ainsi un "torseur cinématique réduit" T_{red} qui ne comporte que les degrés de liberté de la caméra réellement commandables. Nous obtenons finalement :

$$T_{red} = \begin{pmatrix} -\sin q_{pl} & a + D_x \cos q_{pl} & a \\ \cos q_{pl} & -b + D_x \sin q_{pl} & -b \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \dot{q} = J_{platine} \dot{q} \quad (\text{II.16})$$

Le déterminant de $J_{platine}$ est égal à D_x et est non nul d'après le modèle du robot (cf. figure II.2). Cette matrice est donc régulière, démontrant qu'un difféomorphisme local existe entre la configuration du robot et celle de la caméra et que la contrainte de non holonomie n'intervient plus.

II.2.1.3 Robot mobile équipé d'un bras à six degrés de liberté

Nous considérons maintenant la même base mobile munie d'une caméra montée sur un bras manipulateur à six degrés de liberté. Notre objectif est encore d'établir le modèle cinématique global de ce système mécanique sur la base de l'équation II.1. Pour cela, comme nous l'avons mentionné précédemment, il est nécessaire de déterminer les vitesses linéaire et angulaire de la caméra relativement au repère R_M . Celles-ci étant définies par le modèle cinématique du bras manipulateur, nous nous attacherons dans un premier temps à modéliser ce dernier géométriquement puis cinématiquement.

Modèle géométrique direct du bras manipulateur

Le modèle géométrique direct d'un bras manipulateur (MGD) permet d'exprimer la situation de l'effecteur (dans notre cas, une caméra embarquée) en fonction de la configuration du bras [Gorla & Renaud 84]. Cette situation est définie par des coordonnées appelées classiquement coordonnées opérationnelles, tandis que la configuration du bras est caractérisée par des coordonnées dites généralisées. Si $X_{caméra}$ et $q_{bras} = [q_1 \dots q_6]^T$ désignent respectivement le vecteur des coordonnées opérationnelles et généralisées, le MGD est une fonction (généralement non linéaire) du type $X_{caméra} = f(q_{bras})$. Afin de préciser davantage cette notion de situation, nous introduisons deux repères orthonormés, l'un lié au bâti du bras manipulateur noté R_0 (O_0 , $\vec{x}_0$, $\vec{y}_0$, $\vec{z}_0$), l'autre lié à la caméra noté R_C (C , $\vec{x}_C$, $\vec{y}_C$, $\vec{z}_C$) (cf. figure II.3). Désormais, par situation de l'effecteur (ou de la caméra), nous entendrons la position et l'orientation de R_C par rapport à R_0 . En général, six paramètres suffisent pour la caractériser, trois en position et trois en orientation.

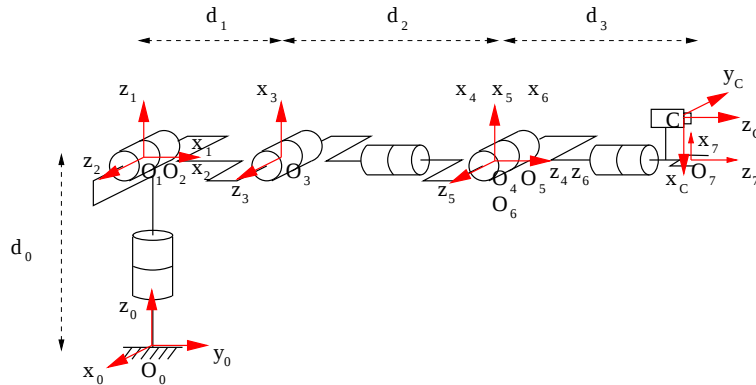


FIG. II.3 – Configuration de référence du bras manipulateur

La détermination du MGD consiste donc à calculer la matrice de passage homogène entre les repères R_0 et R_C notée $\mathcal{T}_{R_0 R_C}$. Pour cela, nous appliquons la méthode développée dans [Gorla & Renaud 84]. Nous lions à chacun des corps du robot un repère R_i (O_i , $\vec{x}_i$, $\vec{y}_i$, $\vec{z}_i$) ($i = 1$ à 6), le repère R_7 (O_7 , $\vec{x}_7$, $\vec{y}_7$, $\vec{z}_7$) étant attaché au centre de la pince (cf. figure II.3). La matrice de passage homogène $\mathcal{T}_{R_0 R_C}$ est alors classiquement définie par :

$$\mathcal{T}_{R_0 R_C} = \prod_{i=0}^6 \mathcal{T}_{R_i R_{i+1}} \mathcal{T}_{R_7 R_C} \quad (\text{II.17})$$

La matrice $\mathcal{T}_{R_7 R_C}$ est obtenue par calibration hand-eye et s'exprime comme suit :

$$\mathcal{T}_{R_7 R_C} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & a \\ 0 & -1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.18})$$

où les scalaires a , b , c conservent leur signification antérieure. Les matrices $\mathcal{T}_{R_i R_{i+1}}$ s'obtiennent quant à elles classiquement par la détermination des paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés. Ces paramètres permettent de caractériser la situation du repère R_i par rapport au repère R_{i-1} . Il sont définis de la manière suivante :

- a_{i-1} : Distance entre O_{i-1} et O_i selon l'axe x_{i-1} ,
- α_{i-1} : Angle algébrique entre z_{i-1} et z_i mesuré autour de x_{i-1} ,
- r_i : Distance entre O_{i-1} et O_i selon l'axe z_i ,
- $\theta_i = q_i$: Angle algébrique entre x_{i-1} et x_i mesuré autour de z_i .

La matrice de passage homogène entre R_{i-1} et R_i s'écrit alors :

$$\mathcal{T}_{R_{i-1} R_i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -r_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & r_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Le MGD du bras manipulateur défini par l'équation II.17 peut alors être établi en calculant les paramètres de Denavit-Hartenberg pour chaque liaison et en déterminant les matrices de passage associées. L'expression du MGD s'avérant relativement complexe, nous ne la présentons pas dans ce mémoire. Néanmoins, le lecteur intéressé pourra retrouver le détail des calculs dans [Renaud 86].

Cependant, comme nous ne considérons dans le cadre de nos travaux que des mouvements plans avec une cible située à la même hauteur que le centre

optique de la caméra, nous bloquons le bras dans une configuration simulant un manipulateur plan redondant à deux liaisons (cf. figure II.4). Seuls les axes 1 et 5 seront donc commandés.

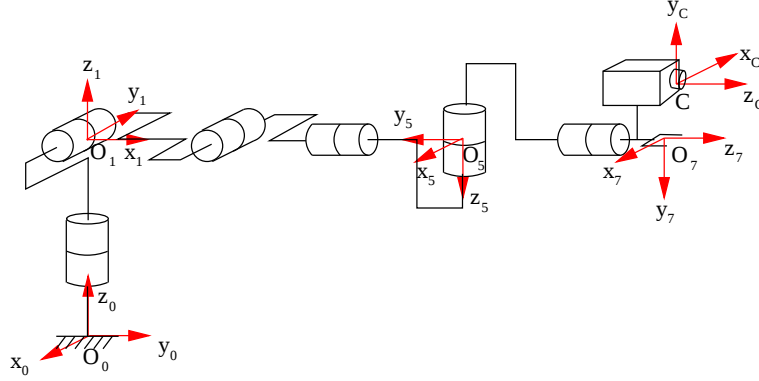


FIG. II.4 – Configuration du robot simulant un manipulateur plan redondant à deux degrés de liberté

Dans ce cas, le MGD se simplifie et se réduit à :

$$\mathcal{T}_{R_0 R_C} = \begin{pmatrix} -\sin(q_1 - q_5) & 0 & \cos(q_1 - q_5) & \alpha_1 \\ \cos(q_1 - q_5) & 0 & \sin(q_1 - q_5) & \alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_0 - b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.20})$$

où $\alpha_1 = \alpha + (d_1 + d_2) \cos q_1$, et $\alpha_2 = \beta + (d_1 + d_2) \sin q_1$ avec $\alpha = a \sin(q_1 - q_5) + (c + d_3) \cos(q_1 - q_5)$ et $\beta = -a \cos(q_1 - q_5) + (c + d_3) \sin(q_1 - q_5)$. α et β représentent en fait respectivement les coordonnées du vecteur $O_6 C$ selon les axes $\vec{x}_0$ et $\vec{y}_0$ du repère R_0 . Les distances d_i sont définies sur la figure II.3.

Modèle cinématique direct du bras manipulateur

Le modèle cinématique direct (MCD) permet d'établir l'expression des vitesses opérationnelles en fonction des vitesses généralisées. Il est de la forme $\dot{X}_{\text{caméra}} = J_b(q_{\text{bras}}) \dot{q}_{\text{bras}}$. Il permet donc d'exprimer le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère de base R_0 . Notons que le calcul de ce modèle se ramène à celui de la matrice jacobienne J_b .

Il existe deux méthodes de calcul du MCD : soit on dérive le modèle géométrique direct du robot défini par la relation II.17, soit on exprime le torseur cinématique de la caméra en fonction de la dérivée des coordonnées généralisées. Nous avons employé cette dernière technique, puisqu'elle s'avère généralement la

plus simple dans le cas d'un robot à six degrés de liberté. La méthodologie adoptée étant largement détaillée dans [Gorla & Renaud 84], nous nous contenterons de la rappeler très brièvement ici. Elle consiste à exprimer d'abord le torseur cinématique du poignet caractérisé par le point O_6 sur la figure II.3, puis à déduire celui de la caméra à l'aide de relations bien connues en mécanique classique. La matrice jacobienne $J_{poignet}$ reliant les vitesses linéaire et angulaire du point O_6 aux vitesses généralisées s'exprime de la manière suivante dans le cas d'un robot manipulateur comportant n liaisons rotoïdes :

$$J_{poignet} = \begin{pmatrix} z_1 \wedge O_1 O_n & \dots & z_n \wedge O_n O_n \\ z_1 & \dots & z_n \end{pmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les calculs concernant le bras complet sont détaillés dans [Renaud 86]. Nous ne présenterons donc ici que les résultats obtenus dans le cas du manipulateur plan représenté sur la figure II.4. Ainsi, en réduisant q_{bras} au vecteur composé uniquement des angles commandables q_1 et q_5 , le torseur cinématique du poignet relativement au repère de base R_0 noté T_{O_6/R_0} s'exprime comme suit :

$$T_{O_6/R_0}^{R_0} = \begin{pmatrix} V_{O_6/R_0}^{R_0} \\ \Omega_{R_6/R_0}^{R_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(d_1 + d_2) \sin q_1 & 0 \\ (d_1 + d_2) \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \dot{q}_{bras} \quad (\text{II.22})$$

où $\dot{q}_{bras} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_5]^T$. Il reste alors à déduire le torseur cinématique de la caméra T_{C/R_0} . Pour cela, nous exploitons la relation suivante, classiquement employée en mécanique :

$$T_{C/R_0} = T_{O_6/R_0} + \begin{pmatrix} \Omega_{R_6/R_0} \wedge O_6 C \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.23})$$

où $O_6 C = O_6 O_7 + O_7 C$ est déterminé à partir du MGD et est défini dans le repère de base R_0 par le vecteur $[\alpha \ \beta \ -b]^T$. Finalement, tous calculs faits, le torseur cinématique de la caméra relativement à R_0 s'exprime comme suit :

$$T_{C/R_0}^{R_0} = \begin{pmatrix} -(d_1 + d_2) \sin q_1 - \beta & \beta \\ (d_1 + d_2) \cos q_1 + \alpha & -\alpha \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \dot{q}_{bras} = J_b \dot{q}_{bras} \quad (\text{II.24})$$

Ce modèle montre que la caméra ne peut se déplacer que selon les axes $\vec{x}_0$ et $\vec{y}_0$ du repère R_0 ou bien tourner autour de $\vec{z}_0$. Ce résultat correspond tout à fait au comportement attendu d'un bras manipulateur plan comme celui représenté sur la figure II.4.

Il reste maintenant à déduire de cette expression le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère R_M lié au robot. R_0 et R_M étant physiquement liés, l'application des lois de la mécanique classique montre que $T_{C/R_0} = T_{C/R_M}$. $T_{C/R_M} = [V_{C/R_M}^T \ \Omega_{R_C/R_M}^T]^T$ est donc directement donné par la relation II.24.

Modèle global de l'ensemble

Nous considérons maintenant l'ensemble mécanique constitué de la base mobile muni du bras manipulateur représenté sur la figure II.5. Les notations apparais-

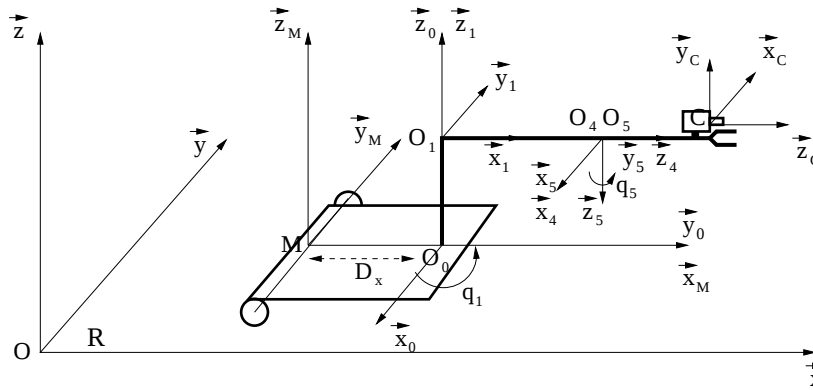


FIG. II.5 – Robot mobile muni d'un bras manipulateur plan à deux degrés de liberté

sant sur cette figure sont rigoureusement identiques à celles employées dans l'élaboration des différents modèles. Ainsi, les différents repères et variables considérés conservent leurs significations antérieures.

Notre objectif est toujours d'établir l'expression du modèle cinématique global de cet ensemble mécanique. Pour cela, il reste encore à déterminer le vecteur MC . D'après la relation de Chasles, $MC = MO_0 + O_0C$ où $MO_0^{R_0} = [0 \ D_x \ 0]^T$ et $O_0C^{R_0}$ est donné par la quatrième colonne de la matrice de passage homogène II.20 définissant le MGD.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le torseur cinématique de la caméra doit être exprimé dans R_C . C'est pourquoi, nous projetons l'équation II.1 dans ce repère. Les modèles cinématiques du bras et de la base étant exprimés respectivement dans R_0 et R_C (cf. équations II.24 et II.3), nous cherchons

maintenant à déterminer les matrices de passage $\mathcal{C}_{R_C R_0}$ et $\mathcal{C}_{R_C R}$. Le MGD décrivant la transformation entre R_0 et R_C , la matrice de rotation incluse dans $\mathcal{T}_{R_0 R_C}$ (cf. équation II.20) définit $\mathcal{C}_{R_0 R_C}$. $\mathcal{C}_{R_C R_0}$ représente donc le changement de base inverse et s'écrit :

$$\mathcal{C}_{R_C R_0} = \mathcal{C}_{R_0 R_C}^T = \begin{pmatrix} -\sin(q_1 - q_5) & 0 & \cos(q_1 - q_5) \\ \cos(q_1 - q_5) & 0 & \sin(q_1 - q_5) \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (\text{II.25})$$

$\mathcal{C}_{R_C R}$ caractérise quant à elle la transformation entre les repères R_C et R . Elle s'exprime donc comme suit :

$$\mathcal{C}_{R_C R} = \mathcal{C}_{RR_C}^T = (\mathcal{C}_{RR_M} \mathcal{C}_{R_M R_0} \mathcal{C}_{R_0 R_C})^T \quad (\text{II.26})$$

où $\mathcal{C}_{RR_M}$ et $\mathcal{C}_{R_M R_0}$ sont définies par :

$$\mathcal{C}_{RR_M} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathcal{C}_{R_M R_0} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Ainsi, l'équation II.1 projetée dans le repère R_C s'écrit :

$$T_{C/R}^{R_C} = \begin{pmatrix} \mathcal{C}_{R_C R_0} V_{C/R_M}^{R_0} + \mathcal{C}_{R_C R} V_{M/R}^R + (\mathcal{C}_{R_C R} \Omega_{R_M/R}^R) \wedge (\mathcal{C}_{R_C R_0} M C^{R_0}) \\ \mathcal{C}_{R_C R_0} \Omega_{R_C/R_M}^{R_0} + \mathcal{C}_{R_C R} \Omega_{R_M/R}^R \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$

où $V_{C/R_M}^{R_0}$ et $\Omega_{R_C/R_M}^{R_0}$ sont donnés par la relation II.24, tandis que $V_{M/R}^R$ et $\Omega_{R_M/R}^R$ sont définis par l'équation II.3. Tous calculs faits, nous obtenons :

$$T_{C/R}^{R_C} = \begin{pmatrix} \cos(q_1 - q_5) & \alpha_4 & \alpha_5 & \alpha_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(q_1 - q_5) & \alpha_7 & \alpha_8 & \alpha_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dot{q} \quad (\text{II.29})$$

où $\dot{q} = [v \ \omega \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_5]^T$ si le vecteur d'état du robot noté q est défini par $[s_c \ \theta \ q_1 \ q_5]^T$ (s_c représentant l'abscisse curviligne du point de référence M du robot comme dans le cas précédent). Enfin, les α_i sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= (D_x + \beta) \sin(q_1 - q_5) + \alpha \cos(q_1 - q_5) + (d_1 + d_2) \cos q_5, \\ \alpha_5 &= (d_1 + d_2) \cos q_5 + \alpha \cos(q_1 - q_5) + \beta \sin(q_1 - q_5), \\ \alpha_6 &= -\beta \sin(q_1 - q_5) - \alpha \cos(q_1 - q_5), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_7 &= -(D_x + \beta) \cos(q_1 - q_5) + \alpha \sin(q_1 - q_5) - (d_1 + d_2) \sin q_5, \\ \alpha_8 &= -(d_1 + d_2) \sin q_5 + \alpha \sin(q_1 - q_5) - \beta \cos(q_1 - q_5), \\ \alpha_9 &= \beta \cos(q_1 - q_5) - \alpha \sin(q_1 - q_5).\end{aligned}$$

La jacobienne précédente comporte encore une fois trois lignes de zéros qui définissent les mouvements interdits à la caméra. Celle-ci ne peut donc se déplacer selon l'axe $\vec{y}_C$ ni tourner autour de $\vec{x}_C$ et $\vec{z}_C$. Ces lignes de zéros n'apportant aucune information peuvent être supprimées. Comme dans le cas de la base munie d'une simple platine commandable en lacet, nous définissons un "torseur réduit" qui s'exprime comme suit :

$$T_{\text{red}} = \begin{pmatrix} \cos(q_1 - q_5) & \alpha_4 & \alpha_5 & \alpha_6 \\ \sin(q_1 - q_5) & \alpha_7 & \alpha_8 & \alpha_9 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \dot{q} = J_{bras} \dot{q} \quad (\text{II.30})$$

Ainsi, seuls trois degrés de liberté de la caméra peuvent être commandés à l'aide des quatre actionneurs à disposition. Le robot considéré est donc redondant. L'ensemble de ces résultats est conforme à la géométrie du robot représenté sur la figure II.4, et valide le modèle II.30.

II.2.2 Modèle de la caméra

Nous considérerons dans l'ensemble de ces travaux le modèle *pinhole* de la caméra. Les points de la scène sont donc projetés sur le plan image par une projection perspective (cf. figure II.6). Ainsi, si $\underline{x}_p = [x \ y \ z]^T$ représente les

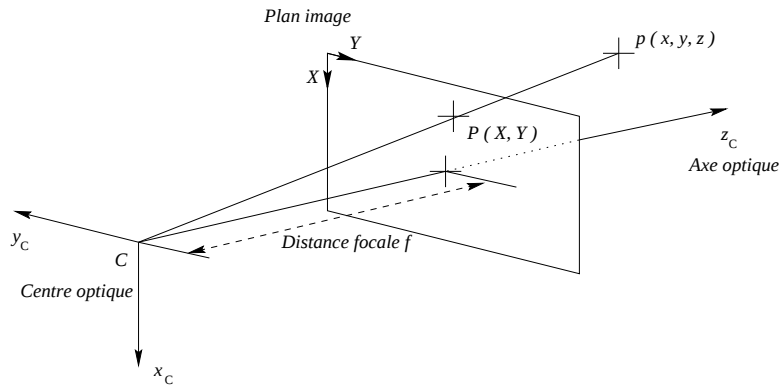


FIG. II.6 – Modèle *pinhole* de la caméra

coordonnées d'un point de la scène p exprimées dans le repère caméra R_C , alors sa projection P sur le plan image a pour coordonnées :

$$\underline{X}_P = \frac{f}{z} \underline{x}_p \quad (\text{II.31})$$

où f représente la distance focale de la caméra. $\underline{X}_P$ définit les coordonnées métriques du point projeté P dans l'image. En introduisant la matrice des paramètres intrinsèques, il est possible d'exprimer ses coordonnées pixels (u, v) de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} zu \\ zv \\ z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_{\text{Matrice des paramètres intrinsèques}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.32})$$

où $(u_0, v_0, \alpha_u, \alpha_v)$ représentent les paramètres intrinsèques de la caméra. (u_0, v_0) désignent les coordonnées pixels de la projection orthogonale du centre optique C de la caméra sur le plan image, tandis que les scalaires α_u et α_v sont définis comme suit :

$$\alpha_u = \frac{f}{d_x} \quad \alpha_v = \frac{f}{d_y} \quad (\text{II.33})$$

où d_x et d_y désignent respectivement la dimension d'un pixel selon les lignes et les colonnes de l'image.

II.2.3 Interaction caméra/environnement

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la commande référencée vision repose sur la régulation à zéro d'une erreur entre le motif visuel courant considéré et la consigne à atteindre. Il est donc nécessaire de déterminer la manière dont l'information visuelle évolue lorsque la caméra se déplace. Pour cela, nous introduisons la notion de matrice d'interaction [Samson *et al.* 91] [Espiau *et al.* 92]. Celle-ci relie la variation du signal capteur, noté ici s , au torseur cinématique de la caméra $T_{C/R}^{R_C}$ exprimé dans son propre repère. Dans le cadre de ces travaux, nous nous plaçons dans un environnement statique, et considérons que s ne dépend que de la situation entre la caméra et la scène, c'est-à-dire en fait de l'état du robot. Ainsi, s sera indépendant du temps pris en tant que paramètre explicite, et seul un mouvement du robot porteur sera susceptible de faire évoluer la valeur du signal capteur. Sous ces hypothèses, la variation de ce signal $\dot{s}$ est définie de la manière suivante :

$$\dot{s} = L T_{C/R}^{R_C} \quad (\text{II.34})$$

où L représente la matrice d'interaction. Elle dépend non seulement des indices visuels considérés (points, droites, ...) mais aussi de l'information de profondeur. Aussi, s'avère-t-elle souvent difficile à estimer en ligne.

Dans l'ensemble de ces travaux, nous considérerons une cible carrée composée de quatre points. Le signal visuel s sera donc défini par un vecteur de dimension 8, comprenant les coordonnées (X_i, Y_i) de ces quatre points projetés dans le plan image à l'aide de la relation II.31. Dans ce cas, la matrice d'interaction est définie par [Chaumette 90] :

$$L = \begin{pmatrix} -1/z_1 & 0 & X_1/z_1 & X_1Y_1 & -(1 + X_1^2) & Y_1 \\ 0 & -1/z_1 & Y_1/z_1 & 1 + Y_1^2 & -X_1Y_1 & -X_1 \\ -1/z_2 & 0 & X_2/z_2 & X_2Y_2 & -(1 + X_2^2) & Y_2 \\ 0 & -1/z_2 & Y_2/z_2 & 1 + Y_2^2 & -X_2Y_2 & -X_2 \\ -1/z_3 & 0 & X_3/z_3 & X_3Y_3 & -(1 + X_3^2) & Y_3 \\ 0 & -1/z_3 & Y_3/z_3 & 1 + Y_3^2 & -X_3Y_3 & -X_3 \\ -1/z_4 & 0 & X_4/z_4 & X_4Y_4 & -(1 + X_4^2) & Y_4 \\ 0 & -1/z_4 & Y_4/z_4 & 1 + Y_4^2 & -X_4Y_4 & -X_4 \end{pmatrix} \quad (\text{II.35})$$

où z_i ($i = 1$ à 4) désigne la profondeur de chaque point de la cible. Une telle définition de L suppose que le torseur cinématique de la caméra est de dimension $(6, 1)$. Or, lors de l'étape de modélisation précédente, nous avons montré qu'il était possible, pour chacun des ensembles mécaniques considérés, de définir un torseur cinématique réduit T_{red} de dimension $(3, 1)$ n'intégrant que les degrés de liberté réellement commandables de la caméra. Aussi, afin de rendre compatibles les dimensions de L et T_{red} , nous supprimons les colonnes de la matrice d'interaction correspondant aux mouvements interdits de la caméra. Ainsi, dans le cas du robot muni de la platine commandable en lacet, la matrice d'interaction se réduit à :

$$L_{\text{platine}} = \begin{pmatrix} 0 & X_1/z_1 & X_1Y_1 \\ -1/z_1 & Y_1/z_1 & 1 + Y_1^2 \\ 0 & X_2/z_2 & X_2Y_2 \\ -1/z_2 & Y_2/z_2 & 1 + Y_2^2 \\ 0 & X_3/z_3 & X_3Y_3 \\ -1/z_3 & Y_3/z_3 & 1 + Y_3^2 \\ 0 & X_4/z_4 & X_4Y_4 \\ -1/z_4 & Y_4/z_4 & 1 + Y_4^2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Tandis qu'en ce qui concerne la base équipée du bras manipulateur, elle se simplifie

en :

$$L_{bras} = \begin{pmatrix} -1/z_1 & X_1/z_1 & -(1 + X_1^2) \\ 0 & Y_1/z_1 & -X_1Y_1 \\ -1/z_2 & X_2/z_2 & -(1 + X_2^2) \\ 0 & Y_2/z_2 & -X_2Y_2 \\ -1/z_3 & X_3/z_3 & -(1 + X_3^2) \\ 0 & Y_3/z_3 & -X_3Y_3 \\ -1/z_4 & X_4/z_4 & -(1 + X_4^2) \\ 0 & Y_4/z_4 & -X_4Y_4 \end{pmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Ainsi, selon le type de véhicule considéré, la variation des informations visuelles peut être directement reliée aux vitesses du robot de la manière suivante :

$$\dot{s} = L_{platine} J_{platine} \begin{pmatrix} v \\ \omega \\ \dot{q}_{pl} \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \dot{s} = L_{bras} J_{bras} \begin{pmatrix} v \\ \omega \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix} \quad (\text{II.38})$$

où $J_{platine}$ et J_{bras} représentent les matrices jacobienues déterminées précédemment et définies par les équations II.16 et II.30.

Enfin, nous terminons cette sous-section en introduisant la notion clé de liaison virtuelle [Samson *et al.* 91] [Espiau *et al.* 92]. La commande référencée vision consistant à faire converger les indices visuels vers un motif prédéfini, l'obtention de ce motif dans le plan image doit caractériser parfaitement la tâche robotique à réaliser. Il doit donc définir un ensemble de contraintes compatibles que l'on souhaite voir satisfaites entre la caméra et l'environnement, autrement dit, une liaison virtuelle. De manière plus mathématique, la liaison virtuelle est caractérisée par l'ensemble des mouvements permis à la caméra lorsque la position d'équilibre est atteinte c'est-à-dire lorsque le signal capteur s a rejoint sa consigne s^* . Dans ce cas, la dérivée $\dot{s}$ est nulle, et la liaison virtuelle est définie par l'ensemble des torseurs cinématiques T^* satisfaisant la contrainte $\dot{s} = 0$. A l'aide de l'équation II.34, il vient :

$$T^* = \text{Ker}(L) \quad (\text{II.39})$$

où $\text{Ker}(L)$ désigne le noyau de la matrice d'interaction. Le rang de cette matrice permet donc de déterminer le nombre de mouvements permis à la caméra lorsque le régime permanent est atteint. Plusieurs types de liaisons virtuelles peuvent alors être définis selon la tâche référencée vision à réaliser. Ainsi, par exemple, le positionnement de la caméra face à une cible sera décrit par une liaison dite "rigide" puisque dans ce cas aucun mouvement n'est permis à la position d'équilibre.

Les indices visuels devront donc être choisis de telle sorte que la matrice d'interaction soit de rang plein. De même, le suivi d'une plinthe référencée vision sera réalisé par une liaison virtuelle dite prismatique. Cette liaison libère un degré de liberté permettant à la caméra - une fois qu'elle a atteint sa position d'équilibre - de se déplacer parallèlement à la plinthe, conservant ainsi le motif image désiré. Là encore, le choix des indices visuels devra être pertinent et garantir que la matrice d'interaction aura le rang adéquat. Le lecteur intéressé pourra retrouver dans [Chaumette 90] et [Pissard-Gibollet 93] un classement des différentes liaisons virtuelles envisageables pour un robot manipulateur et une base mobile équipée d'un bras. Pour notre part, comme nous l'avons mentionné précédemment, notre objectif est de positionner la caméra face à une cible. Nous cherchons donc à établir une liaison virtuelle rigide. Pour cela, nous avons choisi de considérer quatre points décrits par leurs coordonnées (X_i, Y_i) dans l'image, et avons obtenu pour les deux ensembles mécaniques considérés les matrices d'interaction définies par les équations II.36 et II.37. Ces matrices sont généralement de rang plein, mais il est difficile de s'assurer qu'aucune singularité ne sera rencontrée pendant l'exécution de la tâche. De plus, elles dépendent de la profondeur, information tridimensionnelle difficile à estimer en ligne. Pour l'ensemble de ces raisons, tout comme dans [Chaumette 90], [Pissard-Gibollet 93] ou [Swain 99], nous ne considérerons dans la suite de ces travaux que des estimées des matrices d'interaction $L_{platine}$ et L_{bras} calculées à la position finale de la caméra (i.e., lorsque $s = s^*$). Un calcul de leur rang montre que ces estimées sont effectivement de rang plein, garantissant ainsi la réalisation de la liaison virtuelle spécifiée au voisinage de la solution.

Dans cette section, nous nous sommes intéressés exclusivement à modéliser notre problème. Dans la suite de ce manuscrit, nous nous proposons d'aborder la synthèse de la commande en décrivant le formalisme des fonctions de tâche.

II.3 Formalisme des fonctions de tâche et synthèse de la commande

Nous présentons brièvement ici le formalisme des fonctions de tâche développé par C. Samson, M. Le Borgne, et B. Espiau [Samson *et al.* 91]. Nous rappellerons d'abord les principaux résultats obtenus, et montrerons, sur la base des travaux développés par F. Chaumette [Chaumette 90], comment les appliquer pour synthétiser une loi de commande cinématique permettant de réaliser la tâche robotique désirée.

II.3.1 Présentation du formalisme

Ce formalisme a été initialement élaboré pour définir un cadre général à la commande de robots manipulateurs. Il consiste à décrire une application robotique en termes de sorties à réguler. Ainsi, dans le cadre de ce formalisme, la tâche robotique sera définie par une fonction de sortie et une consigne, la première dépendant des signaux capteur pertinents pour la réalisation de la tâche, la seconde modélisant l'objectif à atteindre. Plus précisément, nous nous restreindrons à des fonctions de sortie particulières dites *fonctions de tâche* dépendant uniquement de la configuration du robot q et du temps t (pris en tant que paramètre indépendant) et prenant leur valeur dans $\mathbb{R}^n$ où n représente la dimension du vecteur q . Dans le cadre de nos travaux, seules des fonctions de tâches dépendant de q seront considérées puisque nous n'envisagerons que des tâches référencées vision de positionnement face à une cible fixe dans un environnement statique. L'introduction de la variable temporelle s'avère néanmoins indispensable lorsque l'on souhaite modéliser des tâches plus évoluées (telles que suivis de cibles mobiles, de trajectoires prédéfinies, ...). Ces fonctions de tâches peuvent s'exprimer en termes de données proprioceptives ou extéroceptives selon l'application considérée et les capteurs disponibles sur le robot. Ainsi, dans le cas d'un bras manipulateur, le suivi d'une trajectoire dans l'espace articulaire est uniquement décrit par des informations proprioceptives, et la fonction de tâche associée s'écrit alors comme une erreur entre la configuration courante du robot et la trajectoire désirée. De même, la tâche référencée vision de positionnement que nous considérerons dans l'ensemble de ces travaux s'exprime à partir des indices visuels fournis par la caméra, donc à partir de données extéroceptives. La définition de la fonction de tâche correspondante est alors basée sur la différence entre les informations visuelles courantes et leurs consignes. D'autres exemples sont proposés dans [Samson *et al.* 91].

Ainsi, le problème de commande correspondant à la réalisation d'une application robotique peut généralement être ramené à la régulation à zéro d'une fonction de tâche sur un certain intervalle de temps $[0, T]$. De ce fait, le robot est contrôlé par une loi de commande exprimée non plus dans l'espace d'état, mais dans l'espace de sortie (ou encore l'espace du capteur), donnant ainsi naissance à la notion de commande référencée capteur². Néanmoins, pour que ce problème de commande soit bien posé, on comprend qu'il est nécessaire d'assurer un lien régulier entre l'espace d'état et l'espace de sortie de telle sorte qu'une

2. Bien qu'en automatique classique toute commande en boucle fermée soit référencée capteur, on emploie généralement ce terme en robotique pour désigner une loi de commande de type retour de sortie définie à partir d'informations extéroceptives.

petite variation autour de la trajectoire de référence dans le premier se traduise par une petite variation autour de zéro dans le second. Cependant, toute fonction de tâche ne permet pas de garantir l'existence d'un tel lien. Aussi, la notion de ρ -admissibilité a-t-elle été introduite pour permettre de réunir les conditions suffisantes de régularité que doit vérifier la fonction de tâche [Samson *et al.* 91].

II.3.1.1 Notion de ρ -admissibilité

Le formalisme des fonctions de tâches consiste à exprimer le problème de commande correspondant à la réalisation d'une application robotique sous la forme d'un problème de régulation à zéro d'une fonction de tâche. Pour que ce problème de régulation soit bien posé, il est nécessaire de définir un passage régulier entre l'espace d'état et l'espace de sortie dans lequel s'exprime la commande. La propriété de ρ -admissibilité permet de déterminer les conditions suffisantes que doivent vérifier les fonctions de tâche pour que le problème de commande soit bien posé [Samson *et al.* 91].

Soit $e(q, t)$ une fonction de tâche décrivant l'application robotique à réaliser. Celle-ci sera donc parfaitement exécutée sur un intervalle de temps $[0, T]$ si $e(q, t) = 0 \forall t \in [0, T]$. Une trajectoire vérifiant cette équation pour tout $t \in [0, T]$ est dite trajectoire solution, et sera notée $q_r(t)$ dans toute la suite de ce manuscrit. De plus, pour que $q_r(t)$ puisse effectivement être réalisée par le robot, il est nécessaire qu'elle soit de classe $\mathcal{C}^{1,3}$ sur $[0, T]$. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le bon conditionnement du problème de commande requiert la définition d'un lien régulier entre l'espace d'état et l'espace de sortie. Cela signifie entre autres que la trajectoire solution doit être unique. Or, la résolution de l'équation $e(q, t) = 0$ peut naturellement conduire à la définition de plusieurs trajectoires solutions réalisables distinctes. Un choix doit alors être effectué pour en privilégier une au détriment des autres. Nous introduisons donc une condition initiale supplémentaire q_0 telle que $q_r(0) = q_0$ et vérifiant $e(q_0, 0) = 0$. Une trajectoire solution q_r vérifiant cette dernière propriété est dite trajectoire idéale [Samson *et al.* 91]. Notons que q_0 représente la position à laquelle le robot devrait se trouver à l'instant initial si la tâche était parfaitement réalisée. Elle ne désigne donc pas nécessairement sa position initiale. Ainsi, une tâche bien définie doit nécessairement intégrer une condition initiale permettant de sélectionner, parmi toutes les trajectoires idéales réalisables distinctes, celle que l'on souhaite effectuer. Néanmoins, l'introduction de q_0 ne suffit pas pour assurer l'unicité de q_r . En effet, la non régularité de la jacobienne de la tâche $\partial e / \partial q^T$ au voisinage de

3. Dans le cas où le robot est commandé en couple [Samson *et al.* 91], la trajectoire de référence doit être de classe $\mathcal{C}^2$.

la trajectoire solution, peut entraîner que l'équation $e(q, t) = 0$ n'ait aucune solution excepté la condition initiale ou bien en admette au contraire une infinité. Le problème de commande serait alors mal posé puisque, dans le premier cas, la tâche ne pourra être parfaitement réalisée, et dans le second, une infinité de trajectoires dans l'espace d'état correspondront à l'annulation de $e(q, t)$. C'est le cas des tâches redondantes sur lequel nous reviendrons plus loin. Notons d'ores et déjà qu'il ne faut pas confondre ce dernier cas avec le problème de l'existence de plusieurs solutions distinctes, problème que nous avons résolu en introduisant la condition initiale q_0 . Pour cette raison, la condition de régularité du jacobien de la tâche sera essentielle dans la définition de la ρ -admissibilité de la fonction de tâche. Outre l'unicité de la trajectoire, le bon conditionnement du problème de commande requiert d'une part que la convergence de e vers 0 assure celle de q vers q_r , et d'autre part, qu'une petite variation de e n'induisse pas une grande variation de q . La propriété de ρ -admissibilité de la fonction de tâche permet de répondre à l'ensemble de ces questions puisqu'elle permet d'établir l'existence d'un difféomorphisme⁴ F entre l'ensemble des couples (q, t) incluant la condition initiale q_0 et l'ensemble des couples (e, t) . Elle définit donc le lien régulier nécessaire pour que le problème de régulation soit bien posé. Plus précisément, la ρ -admissibilité est définie formellement comme suit [Samson *et al.* 91] :

Définition 1 Soit $C_{\rho, T}$ l'ensemble des couples (q, t) et B_ρ une boule fermée de centre 0 et de rayon ρ . Si $T < +\infty$, la propriété de ρ -admissibilité est équivalente aux trois assertions suivantes :

1. $C_{\rho, T}$ est une composante connexe par arc non vide de $F^{-1}(B_\rho \times [0, T])$,
2. $C_{\rho, T}$ est une partie fermée de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$,
3. Pour tout couple (q, t) appartenant à $C_{\rho, T}$:
 - (a) $\det \left(\frac{\partial e}{\partial q^T}(q, t) \right) \neq 0$,
 - (b) $\left\| \left(\frac{\partial e}{\partial q^T} \right)^{-1} \right\| < m_{\rho, T} < \infty$,
 - (c) $\left\| \frac{\partial e}{\partial t} \right\| < m'_{\rho, T} < \infty$,

où $\|\cdot\|$ représente la norme euclidienne ou la norme spectrale associée. Si $T = +\infty$, ces conditions sont seulement suffisantes.

4. Un difféomorphisme est une application bijective continûment différentiable dont la réciproque est également continûment différentiable.

La détermination de la composante connexe $C_{\rho,T}$ définie par la première propriété correspond au choix de la condition initiale $q_0 \in C_{\rho,T}$. La propriété (3-a) assure l'existence du difféomorphisme F , les conditions (1) et (2) indiquant que F est défini entre deux ensembles fermés. Enfin, les constantes $m_{\rho,T}$ et $m'_{\rho,T}$ garantissent que l'inverse de la jacobienne de la tâche et la dérivée de e par rapport au temps restent bornées. Elles assurent donc qu'une petite variation autour de la position de référence dans l'un des deux espaces se traduira par une petite variation dans l'autre, garantissant ainsi que, même en cas d'erreurs de modélisation ou de bruits sur la mesure, la fonction de tâche restera au voisinage de zéro et la trajectoire réelle du robot au voisinage de la trajectoire idéale. Notons néanmoins que les singularités de la matrice jacobienne $\partial e / \partial q^T$ sont les principaux obstacles à l'obtention de la propriété de ρ -admissibilité. Aussi, revêt-elle une importance capitale dans la définition d'une tâche ρ -admissible comme le souligne le théorème suivant [Samson *et al.* 91] :

Théorème 1 *Soit $\{e(q,t); q_0\}$ une tâche admettant une trajectoire idéale $q_r(t)$ définie sur l'intervalle de temps $[0, T]$. Si $e(q,t)$ est de classe $\mathcal{C}^2$, si la matrice jacobienne de la tâche $\partial e / \partial q^T$ est inversible au voisinage de $q_r(t)$, et enfin si l'horizon de temps reste fini ($T < +\infty$), il existe un $\rho > 0$ tel que la tâche considérée est ρ -admissible.*

Ainsi, la condition essentielle permettant d'établir la ρ -admissibilité est de définir la fonction de tâche de telle sorte que sa jacobienne soit inversible au voisinage de la trajectoire solution. Il suffit donc de la choisir de manière à contraindre autant de degrés de liberté que d'actionneurs disponibles. L'obtention de la propriété de ρ -admissibilité est donc purement un problème de modélisation de la tâche à réaliser.

Finalement, en établissant un difféomorphisme entre l'espace d'état et l'espace de la tâche, la propriété de ρ -admissibilité garantit d'une part que la trajectoire de référence sera unique, et d'autre part, qu'à toute variation dans l'espace d'état correspondra une variation équivalente dans l'espace de sortie (et inversement). Ce résultat est extrêmement important puisqu'en fait il montre que synthétiser la loi de commande dans l'espace d'état ou dans l'espace de sortie est strictement équivalent. La ρ -admissibilité semble donc se rapprocher de la notion d'observabilité, bien connue en automatique classique, cette dernière étant liée à la possibilité de déterminer de manière unique l'état initial d'un système dynamique quelconque à partir des mesures disponibles. Notons que la convergence des signaux capteurs considérés vers leurs consignes dépendra du choix de la fonction de tâche. Nous

reviendrons sur ce point lorsque nous modéliserons la tâche référencée vision de positionnement.

II.3.1.2 Formalisme des tâches redondantes

Le formalisme des fonctions de tâche consiste donc à spécifier l'application à réaliser sous la forme de la régulation à zéro d'une fonction de tâche. Une manière de s'assurer que ce problème de commande est bien posé est que la fonction de tâche soit ρ -admissible, ce qui nécessite que tous les actionneurs du robot soient contraints. Cependant, toute tâche robotique ne satisfait pas naturellement cette condition, certaines applications ne nécessitant pas l'utilisation de toutes les ressources physiques du robot. Dans un tel cas, une infinité de trajectoires idéales correspondent à l'annulation de la fonction de tâche, et on parle alors de tâche redondante. Une tâche redondante se définit donc en fait comme une tâche $\{e(q, t); q_0\}$ telle qu'il existe une infinité de solutions $q_r(t)$ formant un ensemble dense dans l'espace d'état : on peut alors passer d'une solution à une autre de manière continue [Samson *et al.* 91]. Cependant, il ne faut pas confondre la redondance avec l'existence de plusieurs solutions. En effet, considérons le robot manipulateur plan représenté sur la figure II.7 :

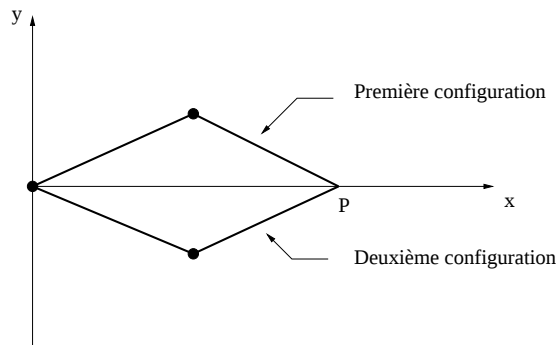


FIG. II.7 – Deux configurations possibles pour la même position de l'organe terminal

Il existe deux configurations permettant de positionner l'organe terminal au point P , et le choix entre ces deux configurations sera effectué à travers la définition de la condition initiale q_0 . Il n'y a donc pas redondance dans ce cas, et d'ailleurs, le robot manipulateur ne peut passer de manière continue d'une configuration vers l'autre. Par contre, si maintenant la tâche considérée s'exprime comme la régulation à zéro de l'erreur $x - x_P$ où x et x_P désignent respectivement les abscisses de l'organe terminal et du point P , il existe une infinité de solutions

permettant de la réaliser, et il y a alors redondance. *La notion de redondance est donc toujours définie par rapport à la tâche considérée* [Samson et al. 91].

Une tâche redondante ne contraignant pas tous les actionneurs du robot, la jacobienne associée ne peut être carrée. L'équation $e(q, t) = 0$ admet alors une infinité de solutions, démontrant ainsi que le problème de commande caractérisé par une fonction de tâche redondante est *sous-contraint* et qu'il n'est pas possible de définir un difféomorphisme entre les espaces d'état et de sortie avec une telle tâche. Une tâche redondante n'est donc pas ρ -admissible, et ne permet pas de poser correctement le problème de commande. Aussi, est-il nécessaire de la modifier de telle sorte qu'elle satisfasse cette propriété. Pour cela, il suffit d'introduire l'information manquante sous la forme d'une tâche supplémentaire à exécuter. Une première solution peut consister à modéliser cette deuxième tâche sous la forme d'une fonction de tâche contraignant les degrés de liberté restants. Il suffit alors de la concaténer à la première pour définir une fonction de tâche bien conditionnée. Cependant, une telle solution suppose l'indépendance et la compatibilité des deux tâches considérées, celles-ci devant pouvoir être *parfaitement réalisées simultanément*. Il n'est donc pas toujours possible de définir une fonction de tâche ρ -admissible avec une telle méthode. C'est pourquoi, nous présentons maintenant une approche plus générale où ces deux propriétés seront satisfaites "par construction".

Considérons un vecteur e_1 de dimension m définissant une tâche redondante. La jacobienne de e_1 est notée J_1 et est supposée de rang plein m . Ainsi, si n représente le nombre total de degrés de liberté du robot, $m < n$ définit le nombre de degrés de liberté contraints par la tâche e_1 . L'approche présentée ici est connue sous le nom de formalisme des tâches redondantes, et consiste à exprimer la seconde tâche introduite sous la forme d'un coût h à minimiser sous la contrainte que la tâche e_1 soit parfaitement réalisée. Le problème de commande est donc posé sous la forme d'un problème d'optimisation avec contraintes égalité, et a pour but de déterminer le vecteur $q(t)$ qui minimise un critère $h(q, t)$ de classe $\mathcal{C}^2$ sous la contrainte que $e_1(q, t) = 0$ pour tout $t \in [0, T]$ [Samson et al. 91]. Nous cherchons donc à minimiser à *chaque instant* un coût variant en fonction du temps *en supposant la contrainte vérifiée dès l'instant initial*. Les conditions nécessaires d'optimalité de ce problème sont définies par l'annulation de la dérivée du Lagrangien par rapport à q et aux paramètres de Lagrange [Luenberger 84]. Ces conditions d'optimalité du premier ordre peuvent être reformulées en termes de projection sur l'espace noyau de la matrice jacobienne J_1 , et sont alors équivalentes à l'annulation d'une fonction de tâche "globale" s'exprimant comme suit

[Samson *et al.* 91] :

$$e = W^+ e_1 + \beta(I - W^+ W)g \quad (\text{II.40})$$

où g représente le gradient de h par rapport à q , β est un réel non nul, W est une matrice telle que $\text{Ker}(W) = \text{Ker}(J_1)$, et I définit la matrice identité de dimension n . $W^+ = W^T(WW^T)^{-1}$ désigne la pseudo-inverse à droite de W . $(I - W^+ W)$ représente alors l'opérateur de projection sur le noyau de J_1 qui caractérise l'espace des mouvements laissés libres par la réalisation de la tâche e_1 . Ainsi, un déplacement sur cet espace laisse e_1 invariante et égale à zéro, et permet donc de réaliser une tâche secondaire tout en garantissant la parfaite exécution de e_1 . On comprend dès lors que la tâche secondaire caractérisée par le critère h ne pourra être réalisée qu'au mieux, compte tenu des degrés de liberté laissés vacants par la tâche primaire e_1 .

L'équation II.40 définit donc une fonction de tâche dont la régulation à zéro assure la minimisation d'un coût sous la contrainte que la tâche principale e_1 soit vérifiée à tout instant du temps. Afin de garantir le bon conditionnement de ce problème de régulation, il est nécessaire d'établir les conditions sous lesquelles $e(q, t)$ est ρ -admissible. Pour cela, nous introduisons le lemme suivant [Samson *et al.* 91] :

Lemme 1 *Soit q_r une solution de $e(q, t) = 0$ pour $t \in [0, T]$.*

Si, autour de q_r :

1. *la matrice jacobienne J_1 est de rang plein m ,*
2. *la matrice W est telle que $\text{Ker}(W) = \text{Ker}(J_1)$ et $J_1 W^T > 0$,*
3. *le Hessien du critère h est défini positif sur le noyau de J_1 (condition de minimum du problème d'optimisation),*
4. *le scalaire β est choisi positif et suffisamment petit au sens défini dans [Samson *et al.* 91],*

alors la jacobienne de la tâche $e(q, t)$ notée J_T est définie positive autour de cette solution.

Ce lemme assure la positivité de J_T autour de la trajectoire solution q_r , et la ρ -admissibilité peut alors être établie à l'aide de la définition 1. Comme nous le verrons plus loin, ce résultat permettra de simplifier la synthèse de la commande en nous affranchissant du calcul relativement complexe de cette matrice.

Nous avons rappelé les principaux résultats du formalisme des fonctions de tâche développé dans [Samson *et al.* 91], et montré comment cette approche permettait de modéliser une tâche robotique sous la forme d'un problème de régulation à zéro d'une fonction de tâche. Dans la sous-section suivante, sur la base de ces différents résultats, nous nous attacherons à la synthèse de la commande.

II.3.2 Synthèse de la commande

Rappelons que notre objectif de commande est de réguler à zéro la fonction de tâche $e(q, t)$. Cette régulation peut être réalisée par le biais de lois de commande dynamiques comme dans [Samson *et al.* 91]. Néanmoins, comme la dérivée seconde de e par rapport au temps peut s'avérer difficile à estimer en ligne, nous ne synthétiserons ici que des lois de commande cinématiques. Ainsi, dans le cadre de ces travaux, tout comme dans [Chaumette 90], nous imposerons une décroissance exponentielle pour réguler à zéro $e(q, t)$. Comme nous nous restreignons à des fonctions de tâche dépendant uniquement de q (seuls des environnements statiques sont considérés), le comportement désiré du système est décrit par l'équation suivante :

$$\dot{e} = J_T \dot{q} = -\lambda e \quad \text{où} \quad J_T = \frac{\partial e}{\partial q^T} \quad (\text{II.41})$$

où λ est un scalaire positif définissant la vitesse de la décroissance exponentielle de la fonction de tâche. Cependant, lorsque $e(q, t)$ est définie comme dans la relation II.40, la détermination de J_T s'avère difficile, et la synthèse de la commande requiert une estimation de cette matrice. Le lemme 1 démontrant la positivité de J_T est alors de quelque utilité. Si $\hat{J}_T$ est une estimée de J_T , la loi de commande précédente devient :

$$\dot{q} = -\lambda \hat{J}_T^{-1} e \quad (\text{II.42})$$

Dans ce cas, $\dot{e} = -\lambda J_T \hat{J}_T^{-1} e$, et la stabilité de la loi de commande II.42 est liée à la positivité du produit de matrices $J_T \hat{J}_T^{-1}$ ⁵. Or, le lemme 1 permet d'établir la positivité de J_T autour de la trajectoire solution q_r . Une solution permettant de satisfaire la condition précédente consiste à prendre $\hat{J}_T$ égale à la matrice identité. Ainsi, dans le cas où e s'écrit sous la forme II.40, et où les différentes matrices mises en jeu sont choisies de manière à vérifier les hypothèses du lemme 1, la loi de commande sera définie par :

$$\dot{q} = -\lambda e \quad (\text{II.43})$$

5. Certains auteurs proposent l'utilisation de J^T à la place de J^{-1} [Sciavicco & Siciliano 88] [Chiacchio *et al.* 91].

Notons que, d'après le lemme 1, la matrice jacobienne J_T n'est définie positive qu'autour de la trajectoire idéale. Il est donc difficile de garantir la stabilité lorsque le robot se trouve initialement loin de cette trajectoire. Cependant, il ne s'agit que de conditions suffisantes et l'expérience montre que le domaine de convergence est en général plus étendu.

Remarque 1 *Dans cette approche, la décroissance exponentielle de la fonction de tâche e est perdue puisque $\dot{e} = -\lambda J_T \hat{J}_T^{-1} e$. Ce phénomène est d'autant plus accentué que le produit de matrices $J_T \hat{J}_T^{-1}$ est différent de la matrice identité.*

Dans cette section, nous avons présenté les résultats principaux concernant le formalisme des fonctions de tâche [Samson *et al.* 91], et montré comment synthétiser une loi de commande cinématique permettant de réguler à zéro une fonction de tâche. Dans la section suivante, nous nous proposons d'exploiter ces résultats pour réaliser une tâche référencée vision de positionnement.

II.4 Application à une tâche de positionnement

Nous nous intéressons donc ici à la réalisation d'une tâche référencée vision de positionnement face à une cible. Pour cela, nous exploitons les résultats obtenus par F. Chaumette et R. Pissard-Gibollet [Chaumette 90] [Pissard-Gibollet 93] qui ont appliqué le formalisme précédent à ce cas particulier. Rappelons que, dans l'ensemble de ces travaux, nous considérons une cible composée de quatre points. Le signal visuel s sera donc défini par un vecteur de dimension 8, comprenant les coordonnées (X_i, Y_i) de ces quatre points projetés dans le plan image à l'aide de la relation II.31. D'autre part, l'application robotique considérée, consistant à positionner la caméra face à cette cible, peut être décrite en termes d'indices visuels de consigne notés s^* . La fonction de tâche modélisant cette application est donc de dimension $(8, 1)$ et s'exprime comme suit :

$$\epsilon(q(t)) = s(q(t)) - s^* \quad (\text{II.44})$$

La jacobienne de cette fonction de tâche est alors définie par :

$$J_\epsilon = \frac{\partial \epsilon}{\partial q^T} = L_{robot} J_{robot} \quad (\text{II.45})$$

où L_{robot} et J_{robot} désignent respectivement la matrice d'interaction et la jacobienne du robot associées à chacun des deux ensembles mécaniques considérés.

J_{robot} sera donc définie par la relation II.16 ou II.30, tandis que L_{robot} sera donnée par l'équation II.36 ou II.37. J_ϵ est donc de dimension $(8, 3)$ lorsque la base mobile est munie d'une platine commandable en lacet et $(8, 4)$ lorsqu'elle est équipée d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté. Ainsi, dans les deux cas, la fonction de tâche II.44 n'est pas ρ -admissible, mais elle n'est pas non plus redondante puisque $\epsilon(q(t))$ comprend plus d'informations visuelles que de degrés de liberté disponibles. Une solution consiste alors à projeter $\epsilon(q(t))$ dans $\mathbb{R}^3$ en introduisant une matrice de combinaison C [Chaumette 90]. La fonction de tâche ainsi obtenue est notée e_{pos} et s'écrit :

$$e_{pos}(q(t)) = C\epsilon(q(t)) = C(s(q(t)) - s^*) \quad (\text{II.46})$$

où C doit être de rang plein 3 et telle que $CL_{robot}J_{robot}$ soit aussi de rang plein 3. De cette manière, e_{pos} contraint les trois degrés de liberté de la caméra et il n'y a pas redondance (du moins du point de vue de la tâche référencée vision). La propriété de ρ -admissibilité est alors satisfaite pour le robot muni de la platine commandable en lacet, mais pas pour la base mobile équipée du bras puisqu'elle dispose d'un actionneur supplémentaire. Dans ce dernier cas, il y a redondance, mais cette redondance provient non pas de la définition de la tâche référencée vision (qui, du point de vue du nombre de degrés de liberté de la caméra, est bien conditionnée) mais de la structure mécanique du robot considéré. D'autre part, il est essentiel de noter que l'introduction de la matrice de combinaison C peut perturber la convergence des indices visuels vers leur consigne. En effet, la régulation de e_{pos} à zéro n'assure que la convergence de Cs vers Cs^* , et pas nécessairement celle de s vers s^* puisque C n'est pas carrée. Il n'y a donc pas équivalence entre l'annulation de e_{pos} et celle de $s - s^*$. Notons enfin que le choix de C est laissé à la discrétion de l'opérateur, avec néanmoins deux prérequis : d'une part, cette matrice doit absolument avoir pour rang le nombre de degrés de liberté défini par la tâche référencée vision à réaliser et être telle que $CL_{robot}J_{robot}$ soit de rang plein; d'autre part, bien qu'elle puisse être fonction du temps, elle doit rester indépendante de q [Samson *et al.* 91]. Dans le cadre de ces travaux, nous avons choisi une expression similaire à celle proposée dans [Chaumette 90] où C est constante et définie par la pseudo-inverse à gauche⁶ de la matrice d'interaction à la position d'équilibre (i.e., lorsque $s = s^*$). Ainsi, C s'exprime comme suit :

$$\left| \begin{array}{ll} C = L_{platine}^+|_{s=s^*} & \text{dans le cas de la base mobile munie de la platine,} \\ C = L_{bras}^+|_{s=s^*} & \text{dans le cas de la base mobile équipée du bras.} \end{array} \right. \quad (\text{II.47})$$

6. La pseudo-inverse à gauche d'une matrice A de dimension (m, n) et de rang plein $n < m$ est définie par $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$.

où $L_{platine}$ et L_{bras} sont respectivement définies par les équations II.36 et II.37. Ainsi, l'introduction d'une matrice de combinaison permet de pouvoir prendre en compte un nombre d'informations capteur supérieur au nombre de degrés de liberté de la caméra contraints par la tâche référencée vision. De cette manière, la fonction de tâche associée sera bien conditionnée de ce point de vue. La propriété de ρ -admissibilité ne dépend plus alors que de la structure mécanique du robot. Il est également essentiel de noter que, si e_{pos} ne contraignait pas tous les degrés de liberté de la caméra, il y aurait redondance quel que soit le type de robot considéré, cette redondance provenant alors de la définition même de la fonction de tâche. Nous exploiterons cette propriété dans la section IV.2.3 pour réaliser simultanément une tâche référencée vision et un évitement d'obstacle. Nous avons donc modélisé la tâche référencée vision de positionnement par une fonction de tâche, ρ -admissible lorsque la base mobile est munie de la platine, redondante lorsqu'elle est équipée du bras manipulateur à deux degrés de liberté. Nous nous proposons donc maintenant, sur la base des résultats rappelés dans la section précédente, de synthétiser un correcteur permettant d'assurer le positionnement de la caméra pour chacun des deux types de robots considérés.

II.4.1 Synthèse de la commande dans le cas du robot muni de la platine

Nous considérons ici le système mécanique composé d'une base mobile munie d'une platine commandable en lacet représenté sur la figure II.2. Nous cherchons à déterminer la commande $\dot{q}$ permettant de réguler à zéro la fonction de tâche e_{pos} défini par l'équation II.46. Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette fonction de tâche est ρ -admissible puisque sa jacobienne, définie par le produit de matrices $CL_{platine}J_{platine}$, est carrée et de rang plein d'après le choix de C . Rappelant que nous imposons une décroissance exponentielle de vitesse λ , la loi de commande est directement donnée par l'équation générale II.41 et s'exprime dans notre cas de la manière suivante :

$$\dot{q} = -\lambda(CL_{platine}J_{platine})^{-1}e_{pos} \quad (II.48)$$

où C est défini par la première ligne de l'équation II.47. Notons que la matrice d'interaction $L_{platine}$ est prise constante et égale à sa valeur lorsque la caméra est correctement positionnée face à la cible. La commande précédente se réduit alors à :

$$\dot{q} = -\lambda J_{platine}^{-1}e_{pos} \quad (II.49)$$

où $J_{platine}$ ne possède aucune singularité comme nous l'avons montré dans la section II.2.1.2. La propriété de ρ -admissibilité est donc satisfaite. Notons ici qu'il

est également possible de synthétiser la loi de commande sans prendre en compte la propriété de ρ -admissibilité et donc sans introduire de matrice de combinaison. Il suffit pour cela de considérer que l'équation générale II.41 définit un système linéaire en $\dot{q}$. Compte tenu que, dans notre cas, le système est sur-contraint, une solution approchée est obtenue au sens des moindres carrés en calculant la pseudo-inverse à gauche de $L_{platine}J_{platine}$. Cette approche - qui sort du formalisme des fonctions de tâche - a notamment été appliquée dans [Swain 99].

Enfin, nous présentons ci-après un exemple de simulation où la tâche référencée vision de positionnement est parfaitement réalisée. La trajectoire du robot obtenue et l'évolution correspondante des indices visuels sont représentées sur la figure II.8. D'autres résultats de simulation pour des tâches référencées vision variées sont présentés dans [Swain 99].

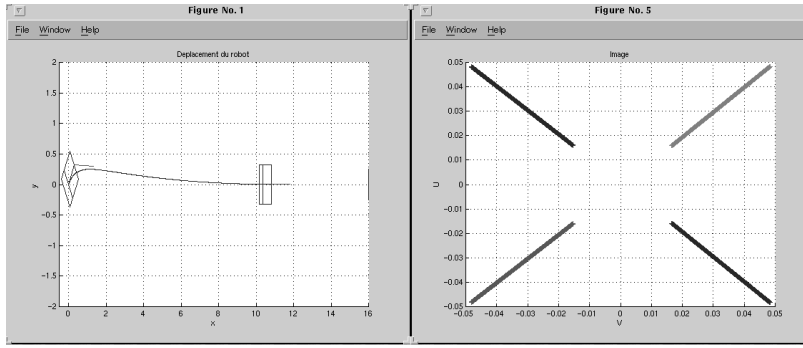


FIG. II.8 – Trajectoire du robot et évolution des indices visuels lors de la réalisation de la tâche globale e_{pos}

II.4.2 Synthèse de la commande dans le cas du robot équipé du bras

Nous considérons maintenant le cas de la base mobile équipé d'une caméra montée sur le bras manipulateur à deux degrés de liberté représenté sur la figure II.4. Nous cherchons encore à synthétiser un correcteur $\dot{q}$ permettant de réguler la fonction de tâche e_{pos} à zéro. Cependant, dans ce cas, e_{pos} définit une tâche redondante puisqu'elle ne contraint pas tous les actionneurs du robot. Cela se traduit mathématiquement par une jacobienne $J_{pos} = CL_{bras}J_{bras}$ de taille $(3, 4)$. La propriété de ρ -admissibilité est donc perdue ici. Nous avons montré précédemment qu'une solution permettant de la restaurer consistait à introduire une tâche secondaire, soit sous la forme d'une fonction de tâche à concaténer, soit sous la

forme d'un coût à minimiser sous la contrainte que la tâche référencée vision soit parfaitement réalisée. Nous proposons donc deux synthèses distinctes s'appuyant sur chacune de ces méthodes.

Remarque 2 *La synthèse de la loi de commande dans le cas d'un robot redondant peut également se traiter sans faire appel à la propriété de ρ -admissibilité. Pour cela, il suffit de considérer que la détermination du vecteur de commande $\dot{q}$ peut se ramener à la résolution du système linéaire $\dot{e}_{pos} = J_{pos}\dot{q} = -\lambda e_{pos}$. Ce système linéaire, étant sous-contraint, peut être résolu en déterminant le vecteur $\dot{q}$ qui minimise le critère $\frac{1}{2}\dot{q}^T\dot{q}$ sous la contrainte que $J_{pos}\dot{q} = -\lambda e_{pos}$. La solution de ce problème est obtenue en calculant la pseudo-inverse à droite de J_{pos} . Naturellement, cette approche sort du cadre classique du formalisme des fonctions de tâches puisque la propriété de ρ -admissibilité n'est plus satisfaite. Notons néanmoins que certains problèmes de stabilité peuvent apparaître en contexte bruité.*

II.4.2.1 Concaténation d'une deuxième fonction de tâche

Comme nous l'avons mentionné précédemment, dans cette approche, la tâche secondaire à exécuter est définie par une fonction de tâche contraignant le degré de liberté restant. Plusieurs tâches secondaires peuvent être envisagées selon le contexte de l'application robotique considérée. Pour notre part, compte tenu que seuls trois degrés de liberté sont requis pour réaliser le positionnement de la caméra, nous nous proposons ici de maintenir la cinquième articulation dans le prolongement du bras. Pour cela, nous définissons la fonction de tâche e_{q_5} par l'erreur $q_5 - q_5^*$ où $q_5^* = 0$ représente la consigne à atteindre. La jacobienne de e_{q_5} s'exprime alors par $J_{q_5} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$, et est de rang plein 1, démontrant qu'elle contraint bien un seul actionneur. La tâche "globale" e_{AV} est alors obtenue en concaténant e_{pos} et e_{q_5} , et s'exprime donc comme suit :

$$e_{AV} = \begin{pmatrix} C(s - s^*) \\ q_5 - q_5^* \end{pmatrix} \quad (II.50)$$

où C est définie par la deuxième ligne de l'équation II.47. En notant que, comme précédemment, nous choisissons L_{bras} égal à sa valeur lorsque $s = s^*$, la jacobienne de e_{AV} s'écrit :

$$J_{AV} = \begin{pmatrix} C L_{bras} J_{bras} \\ J_{q_5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{bras} \\ J_{q_5} \end{pmatrix} \quad (II.51)$$

Le déterminant de J_{AV} étant égal à $-D_x$, cette matrice est toujours inversible. La ρ -admissibilité de la tâche globale définie par e_{AV} est donc toujours assurée. La

loi de commande s'obtient alors à l'aide de l'équation générale II.41 comme dans le cas du robot muni de la platine. Elle s'écrit :

$$\dot{q} = -\lambda J_{AV}^{-1} e_{AV} \quad (\text{II.52})$$

Nous présentons maintenant un exemple de simulation où la tâche référencée vision et le maintien de q_5 autour de q_5^* sont parfaitement exécutés. La trajectoire du robot et les indices visuels sont représentés sur la figure II.9. Le centre optique de la caméra ne se projetant pas exactement au centre de l'image suite aux erreurs de calibration, ces indices visuels se trouvent décalés vers la droite de l'image au lieu d'être parfaitement centrés. Ce décalage disparaît si nous considérons la valeur métrique des points projetés comme sur la figure II.8.

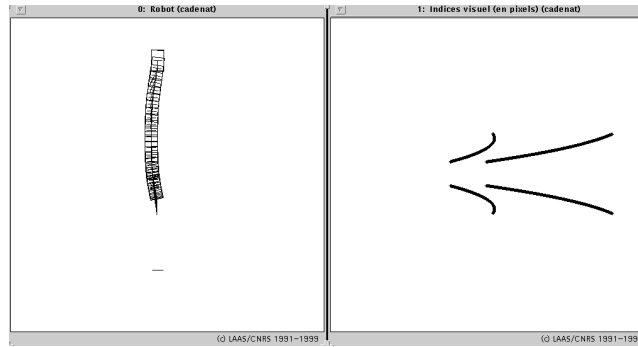


FIG. II.9 – Trajectoire du robot et évolution des indices visuels lors de la réalisation de la tâche globale e_{AV}

II.4.2.2 Application du formalisme des tâches redondantes

Ainsi, la méthode précédente permet de réaliser parfaitement deux tâches compatibles et indépendantes. Cependant, cette condition de compatibilité peut s'avérer trop contraignante pour certaines applications. Aussi, dans ces cas-là, préfère-t-on s'orienter vers le formalisme des tâches redondantes où la compatibilité est obtenue par construction. Notons néanmoins que, dans cette dernière approche, la tâche secondaire sera seulement réalisée au mieux puisqu'elle sera modélisée par un coût à minimiser sous la contrainte que la tâche principale (ici, la tâche référencée vision de positionnement) soit parfaitement exécutée. Comme dans le cas précédent, plusieurs tâches secondaires peuvent être envisagées. Pour notre part, nous chercherons ici à maintenir le bras loin de ses butées articulaires, et définissons donc la tâche secondaire par un coût h_{AV} similaire à celui

utilisé dans [Marchand *et al.* 96]. Le critère et son gradient s'expriment alors de la manière suivante :

$$h_{AV} = \frac{1}{2} (q_{bras} - q_{bras}^*)^T (q_{bras} - q_{bras}^*) \quad g_{AV} = [0 \ 0 \ q_1 - q_1^* \ q_5 - q_5^*]^T \quad (II.53)$$

où q_{bras}^* est défini par les coordonnées articulaires correspondant au milieu des premier et cinquième axes du bras manipulateur. En appliquant directement le formalisme des tâches redondantes que nous avons rappelé dans la section II.3, la tâche globale équivalente à la minimisation du critère h_{AV} sous la contrainte que $e_{pos} = 0$ est définie par l'équation II.40 où e_1 s'identifie à e_{pos} . La matrice W et le scalaire β doivent alors être définis de manière à satisfaire les conditions (2) et (4) du lemme 1. Ainsi, un choix possible permettant d'assurer que W vérifie à la fois $\text{Ker}(W) = \text{Ker}(J_{pos})$ et $W J_{pos}^T > 0$ est naturellement de prendre $W = J_{pos}$. Avec un tel choix et en fixant β suffisamment faible, le lemme 1 permet d'établir la positivité de la jacobienne de cette tâche. La loi de commande est alors directement définie par la relation II.43.

Enfin, pour terminer cette section, nous présentons ici encore très rapidement un exemple de simulation de la réalisation d'une telle tâche. La trajectoire du robot et l'évolution correspondante des indices visuels sont représentées sur la figure II.10.

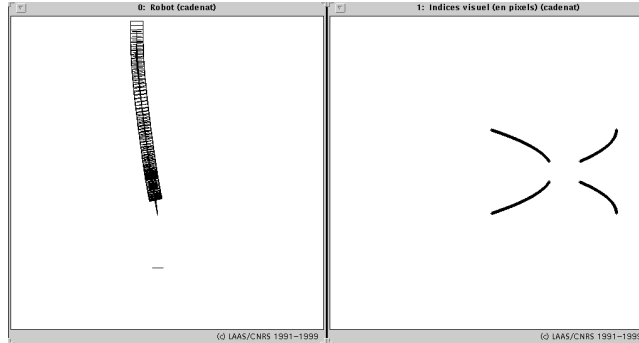


FIG. II.10 – Trajectoire du robot et évolution des indices visuels lors de la réalisation de la tâche référencée vision de positionnement

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principaux fondements de la commande référencée vision d'un robot mobile muni d'une caméra. Nous avons ainsi

montré que le formalisme des fonctions de tâche développé initialement pour des bras manipulateurs ne pouvait s'appliquer directement aux robots mobiles non holonomes du fait de la contrainte de roulement sans glissement. L'introduction de degrés de liberté supplémentaires permettant de s'affranchir de cette contrainte, nous avons considéré des ensembles mécaniques plus élaborés comportant une base mobile non holonome équipée d'une caméra montée soit sur une simple platine, soit sur un bras manipulateur. Nous avons ainsi établi dans un premier temps les modèles cinématiques de ces deux systèmes, puis introduit les notions de matrice d'interaction et liaison virtuelle, essentielles en asservissement visuel. Nous avons ensuite présenté le formalisme des fonctions de tâche en définissant les concepts fondamentaux de fonctions de tâche, ρ -admissibilité et tâches redondantes. Enfin, nous avons appliqué ce formalisme à notre cas pour réaliser une tâche référencée vision de positionnement qui sera en fait la tâche de référence dans le cadre de cette thèse. Les résultats que nous avons rappelés ici sont principalement issus des travaux menés par C. Samson [Samson *et al.* 91], B. Espiau [Espiau *et al.* 92], F. Chaumette [Chaumette 90], P. Rives et R. Pissard-Gibollet [Pissard-Gibollet & Rives 91] [Pissard-Gibollet 93].

Dans ce chapitre, nous avons établi les notions sur lesquelles seront basés nos propres travaux. Nous montrerons dans le chapitre IV comment les techniques de commande référencée vision que nous venons de présenter peuvent être étendues pour développer des lois de commande référencées multi-capteurs permettant à un robot mobile de naviguer dans un environnement encombré. Toutefois, avant d'aborder cette partie centrale, nous présentons dans le chapitre suivant un premier travail auquel nous avons collaboré sur le thème de l'évitement d'obstacles pendant la phase de transition d'un suivi de chemin.

Chapitre III

Contribution à l'évitement d'obstacles pendant la phase de transition d'un suivi de chemin

Le travail qui est présenté dans ce chapitre se situe en marge de nos travaux sur la commande référencée multi-capteurs d'un robot mobile dans un environnement encombré. Il constitue un premier effort dans la recherche d'une loi de commande permettant de réaliser simultanément l'évitement d'obstacles et une tâche de suivi. Plus précisément, il concerne l'évitement d'obstacles pendant la phase transitoire d'un suivi de chemin. Contrairement à ce qui est développé dans la suite, le problème est étudié dans l'espace d'état, ce qui suppose une localisation absolue du robot à chaque instant (voir [Canudas de Wit *et al.* 94] pour une description des différentes méthodes de commande dans l'espace d'état).

Classiquement, le problème du suivi de chemin a pour objectif de synthétiser un correcteur permettant à un robot mobile de converger géométriquement vers un chemin de référence. Celui-ci est déterminé par des méthodes de planification qui prennent en compte la présence éventuelle d'obstacles dans la scène, ainsi que les contraintes cinématiques du robot (non holonomie). Le chemin obtenu est donc défini dans l'espace libre, et la non collision est garantie dès que le véhicule rentre dans un proche voisinage du chemin.

Cependant, pour certaines tâches robotiques, la configuration initiale du robot est éloignée du chemin de référence. Le processus de stabilisation induit alors une longue phase de transition pendant laquelle la non collision ne peut plus être assurée. Il est donc important de prendre en compte la structure de l'environnement directement dans la synthèse de la loi de commande. Ainsi, l'approche développée dans [Hamel & Meizel 96] et [Hamel 96] permet de stabiliser le robot dans une configuration-but située entre deux murs en définissant un retour d'état non stationnaire dépendant de la distance à l'obstacle. De même, dans [Hamel *et al.* 97], T. Hamel propose une loi de commande de suivi de chemin robuste aux erreurs de localisation et d'orientation. Bien qu'elle n'intègre pas explicitement la configuration du robot par rapport aux obstacles, elle permet de définir une marge de sécurité en deçà de laquelle la non collision est garantie. Cependant, bien que ces techniques assurent un mouvement sûr pour le robot lorsqu'il se trouve au voisinage du chemin de référence, elles n'offrent plus aucune garantie pendant la phase de transition.

Nous présentons donc ici un correcteur permettant à un robot mobile de suivre un chemin préplanifié, tout en évitant des obstacles si nécessaire. La méthode proposée repose sur les techniques de régime glissant. Elle consiste à définir une variété de glissement non stationnaire, puis à exploiter ce degré de liberté pour modifier la trajectoire du robot lorsque des obstacles sont détectés.

Afin d'éviter l'apparition de singularités, nous supposons que les obstacles rencontrés sont strictement convexes. Nous faisons également l'hypothèse que la base mobile est munie d'un laser SICK 2D qui mesure à chaque instant la distance et l'orientation relative entre le robot et l'obstacle.

Nous présentons donc dans un premier temps le formalisme du suivi de chemin, puis synthétisons le correcteur nominal dans l'espace libre. Ensuite, nous montrons comment étendre ce correcteur afin de prendre en compte la présence des obstacles dans la scène. Enfin, nous présentons des résultats de simulation pour valider notre approche.

III.1 Formalisme du suivi de chemin

Rappelons qu'une configuration d'un robot mobile est définie par le vecteur $P = [x \ y \ \theta]^T$ où le couple (x, y) représente les coordonnées du point de référence du robot, et θ l'orientation du véhicule par rapport au repère de la scène $\mathcal{W}$. Nous considérons ici le modèle cinématique du robot décrit au chapitre II par l'équation II.2. Le problème du suivi de chemin est représenté sur la figure III.1.

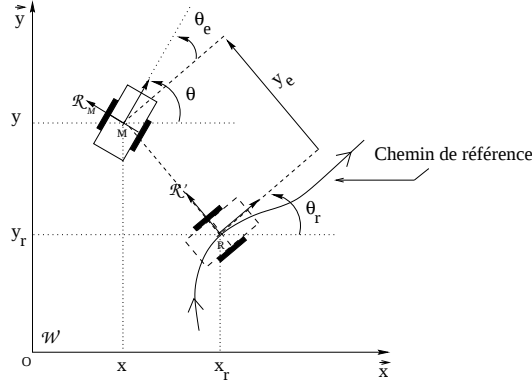


FIG. III.1 – Description du problème du suivi de chemin

Il consiste à synthétiser une loi de commande assurant la convergence *géométrique* du robot vers le chemin de référence, indépendamment de la vitesse linéaire du véhicule. Plusieurs méthodes ont été proposées, citons par exemple [Nelson & Cox 88] [Sampei *et al.* 91] ou [Samson 92].

Nous exploitons dans ces travaux l'approche développée dans [Samson 92] et la présentons ici comme un cas particulier du suivi de trajectoire [Hamel 96]. Le formalisme décrit dans cette approche consiste à projeter orthogonalement le point M de référence du robot sur le chemin de référence de manière à définir un repère de Frenet $\mathcal{R}'$. En supposant que ce repère caractérise un robot fictif de même cinématique que le véhicule réel, l'erreur de configuration P_e entre les deux robots s'exprime dans le repère $\mathcal{R}'$ comme suit :

$$\begin{cases} P_e^{\mathcal{R}'} = [x_e \ y_e \ \theta_e]^T = T_{\mathcal{R}'\mathcal{W}} P_e^{\mathcal{W}} = T_{\mathcal{R}'\mathcal{W}} (P^{\mathcal{W}} - P_r^{\mathcal{W}}) \\ T_{\mathcal{R}'\mathcal{W}} = \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

où $T_{\mathcal{R}'\mathcal{W}}$ définit la matrice de passage entre les repères $\mathcal{W}$ et $\mathcal{R}'$, tandis que $P_r^{\mathcal{W}} = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ représente la configuration du robot fictif dans le repère de la scène. La dynamique de l'erreur de configuration s'exprime alors de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_r \chi_r y_e - v_r + v \cos \theta_e \\ -v_r \chi_r x_e + v \sin \theta_e \\ v \chi - v_r \chi_r \end{pmatrix} \quad (\text{III.2})$$

où $\chi_r = \omega_r/v_r$ et $\chi = \omega/v$ définissent respectivement les courbures du chemin de référence et du chemin suivi par le robot, v_r et ω_r représentant les vitesses

linéaire et angulaire du robot fictif. De plus, comme ce dernier est défini par la projection orthogonale du robot réel sur le chemin, x_e et $\dot{x}_e$ restent toujours nulles. La première équation du système III.2 peut donc se réécrire comme suit :

$$v_r = \frac{v \cos \theta_e}{1 - \chi_r y_e} \text{ sous la contrainte } (1 - \chi_r y_e) > 0 \quad (\text{III.3})$$

Cette contrainte peut aussi s'exprimer sous la forme $|y_e| < |\frac{1}{\chi_r}|$ et montre que la distance entre le robot et le chemin doit toujours rester inférieure à son rayon de courbure pour que l'unicité de la projection du point M soit garantie [Samson 92]. La dynamique de l'erreur est alors décrite par les deux dernières équations du système III.2 :

$$\begin{cases} \dot{y}_e &= v \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e &= v \chi_e \end{cases} \text{ où } \chi_e = \chi - \chi_r \frac{\cos \theta_e}{1 - \chi_r y_e} \quad (\text{III.4})$$

Le problème du suivi de chemin consistera donc à synthétiser une loi de commande en χ_e permettant de stabiliser ce système en $(0,0)$, sous l'hypothèse que la vitesse linéaire du robot est bornée, à dérivée bornée et ne s'annule pas. Cette dernière hypothèse permet de garantir la commandabilité du système III.4 [Canudas de Wit *et al.* 94].

La convergence du robot vers le chemin de référence se fait de manière géométrique, i.e., indépendamment de la vitesse linéaire qui n'est donc pas commandée. Le temps n'est alors plus une donnée significative du problème. C'est pourquoi, nous avons choisi d'exprimer ici la dynamique du système non plus par rapport au temps, mais par rapport à la longueur du chemin parcouru $l(t) = \int_0^t |v(\tau)| d\tau$ [Samson 95]. En remarquant que $v = \text{sign}(v) \dot{l}$ où $\text{sign}(v)$ est défini en fonction du sens de déplacement du robot (v est positive si le robot est en marche avant, négative sinon), le système dynamique III.4 peut se réécrire sous la forme III.5 suivante :

$$\begin{cases} y'_e &= \text{sign}(v) \sin \theta_e \\ \theta'_e &= \text{sign}(v) \chi_e \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

où $(\cdot)$ désigne l'opérateur de dérivation par rapport à l . Nous obtenons ainsi un système dynamique non-linéaire stationnaire, et l'objectif sera de synthétiser un retour d'état $\chi_e(y_e, \theta_e)$ permettant de le stabiliser en $(0,0)$.

Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons à la synthèse d'une telle loi de commande, d'abord dans l'espace libre, puis en environnement encombré.

III.2 Synthèse

La méthode proposée est basée sur les techniques de régime glissant. Elle consiste à définir une variable de glissement z dépendant de y_e et θ_e , de telle sorte que sa régulation à zéro conduise à la stabilisation des deux variables d'état à l'origine. Une telle définition permet de prendre en compte implicitement la non holonomie du robot qui interdit que y_e et θ_e varient indépendamment.

Nous présentons d'abord la synthèse du correcteur en absence d'obstacles puis nous montrons comment, en définissant une variété de glissement non stationnaire, nous pouvons utiliser ce degré de liberté pour modifier la trajectoire du robot et ainsi éviter les obstacles.

III.2.1 Synthèse en absence d'obstacles

Considérons la variable de glissement suivante :

$$z = y_e + \gamma \text{sign}(v) \theta_e \text{ où } \gamma > 0 \quad (\text{III.6})$$

Pour réguler z à zéro, nous imposons la dynamique suivante :

$$z' = y_e' + \gamma \text{sign}(v) \theta_e' = -kz \text{ où } k > 0 \quad (\text{III.7})$$

A l'aide de la relation III.5, le correcteur correspondant s'écrit :

$$\chi_e = -\frac{1}{\gamma} [\text{sign}(v) \sin \theta_e + kz] \quad (\text{III.8})$$

Ce correcteur stabilise le système III.5 si la convergence de z à zéro entraîne celle des variables d'état y_e et θ_e . De plus, d'après la définition de z donnée par l'équation III.6, si z et y_e tendent vers zéro, alors θ_e convergera également vers cette valeur. Il suffit donc de montrer que la loi de commande III.8 garantit la stabilisation de z et y_e . Pour cela, nous établissons le lemme 2 ci-dessous : il assure que, quelle que soit la configuration initiale du robot par rapport au chemin, il est possible de déterminer γ de telle sorte que les trois variables précédentes tendent vers zéro.

Lemme 2 *Pour toute erreur de configuration initiale $(\theta_0, y_0) = (\theta_e(0), y_e(0))$, il existe un $\gamma_0 = \gamma(\theta_0, y_0) > 0$ tel que la loi de commande III.8 assure la convergence de z , y_e et donc θ_e à zéro, stabilisant ainsi le système III.5.*

Preuve

$\forall (y_0, \theta_0) \in \mathbb{R}^2, \forall \varepsilon > 0, \exists p > 0$ tel que

$$(|y_0| + (\frac{|y_0| + \frac{p}{k} + 2\varepsilon}{\pi})|\theta_0|)e^{-p} < \varepsilon \quad (\text{III.9})$$

Posons maintenant :

$$\gamma_0 = \frac{|y_0| + \frac{p}{k} + 2\varepsilon}{\pi} \quad (\text{III.10})$$

En notant $z_0 = y_0 + \gamma_0 \text{sign}(v)\theta_0$, et rappelant que l'équation différentielle $z' = -kz$ admet pour solution $z(l) = z_0 e^{-kl}$, la relation III.9 peut se réécrire sous la forme :

$$|z(\frac{p}{k})| = |z_0|e^{-p} \leq (|y_0| + \gamma_0|\theta_0|)e^{-p} < \varepsilon \quad (\text{III.11})$$

De plus, l'expression de γ_0 donnée par l'équation III.10 conduit à :

$$\frac{\gamma_0 \pi}{2} = \frac{|y_0| + \frac{p}{k}}{2} + \varepsilon$$

Comme tous les termes de cette équation sont positifs, $\varepsilon < \frac{\gamma_0 \pi}{2}$. L'équation III.11 se réécrit alors :

$$|z(\frac{p}{k})| < \varepsilon < \frac{\gamma_0 \pi}{2} \quad (\text{III.12})$$

La variable de glissement z reste donc bornée par $\gamma_0 \pi / 2$. Nous cherchons maintenant à établir un résultat similaire pour y_ε . Pour cela, nous considérons l'expression de y'_ε donnée par l'équation III.5. Comme $|\sin \theta_\varepsilon| \leq 1, |y'_\varepsilon| \leq 1$. En effectuant un développement limité à l'ordre 1 de y_ε , nous obtenons : $y_\varepsilon(\frac{p}{k}) - y_\varepsilon(0) = y'_\varepsilon \frac{p}{k}$. En majorant cette équation, il vient :

$$|y_\varepsilon(\frac{p}{k})| - |y_0| \leq |y_\varepsilon(\frac{p}{k}) - y_0| \leq \frac{p}{k} \quad (\text{III.13})$$

A l'aide des inégalités III.11 et III.13, nous obtenons la relation suivante :

$$|z(\frac{p}{k})| + |y_\varepsilon(\frac{p}{k})| < \varepsilon + |y_0| + \frac{p}{k} < 2\varepsilon + |y_0| + \frac{p}{k} = \gamma_0 \pi \quad (\text{III.14})$$

Donc, d'après les équations III.12 et III.14, on a nécessairement :

$$|y_\varepsilon| < \gamma_0 \pi \quad (\text{III.15})$$

Il reste à conclure quant à la convergence de z et de y_ε à zéro. Pour cela, exprimons y'_ε en boucle fermée. De la définition de z , il vient $\theta_\varepsilon = \text{sign}(v) \frac{z - y_\varepsilon}{\gamma_0}$ et en remplaçant dans l'équation III.5, nous obtenons :

$$y'_\varepsilon = \sin \frac{z - y_\varepsilon}{\gamma_0} \quad (\text{III.16})$$

Donc :

- Si $|y_e| > |z|$, d'après l'équation III.16, $|y_e|$ décroît.
- Si $|y_e| < |z|$, $|y_e|$ augmente, mais reste toujours inférieur à $\gamma_0\pi$ d'après l'équation III.15. De plus, comme z décroît exponentiellement vers zéro, il devient très rapidement inférieur à y_e qui, de ce fait, diminue.

Finalement, z et y_e convergent vers zéro, ce qui assure l'annulation de la variable θ_e . Le correcteur proposé dans la relation III.8 stabilise donc le système III.5, garantissant ainsi le suivi de chemin en absence d'obstacle.

Remarque 3 *La modélisation du système III.5 n'étant correcte que lorsque $1 - \chi_r y_e > 0$, $\gamma_0\pi$ doit toujours rester inférieur à $1/\chi_r$.*

III.2.2 Extension : synthèse en présence d'obstacles

Nous supposons maintenant que le robot évolue dans un environnement encombré et qu'initialement il se trouve éloigné du chemin de référence. Le correcteur III.8 ne permet donc pas de garantir la non collision. C'est pourquoi, nous nous proposons ici d'étendre la technique précédente afin de prendre en compte la présence des obstacles dans la scène.

Nous définissons d'abord un certain nombre d'hypothèses préliminaires garantissant que le problème de commande sera bien posé. Nous présentons ensuite la stratégie d'évitement envisagée avant de synthétiser le correcteur stabilisant.

III.2.2.1 Hypothèses préliminaires

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous restreignons notre étude au cas d'obstacles strictement convexes afin de pouvoir éviter les singularités correspondant à l'annulation de l'angle θ_e (cf. expression du correcteur III.27) en choisissant judicieusement le sens de contournement (voir la dernière hypothèse ci-dessous).

De plus, afin de garantir la non collision, nous devons assurer que le robot atteindra la variété de glissement avant qu'il ne rencontre un obstacle. En effet, la stratégie envisagée repose sur la variation de γ et nécessite que le point de référence du véhicule ait atteint la variété. Pour cela, comme $|z(\frac{p}{k})| < \varepsilon$, il suffit de garantir qu'aucun obstacle ne se trouve dans un disque de rayon $\frac{p}{k}$ centré sur la position initiale du robot (x_0, y_0) . Ainsi, lorsque le véhicule se trouve sur la

circonférence de ce disque, z tend vers zéro et le robot a donc quasiment atteint la variété de glissement.

En outre, nous supposons que la distance entre deux obstacles ainsi que celle entre un obstacle et le chemin de référence reste strictement supérieure à la valeur 2δ où δ est définie sur la figure III.2. Nous verrons plus loin en quoi cette hypothèse nous est utile.

Enfin, nous choisissons de contourner l'obstacle par la direction qui assure la décroissance de y_e . De cette manière, nous évitons les singularités correspondant à l'annulation de l'angle θ_e , assurons l'unicité du repère de Frenet $\mathcal{R}'$, et garantissons également la stabilité du système rebouclé puisque, dans ce cas, $|y_e|$ reste toujours inférieur à $\gamma_0\pi$ ¹.

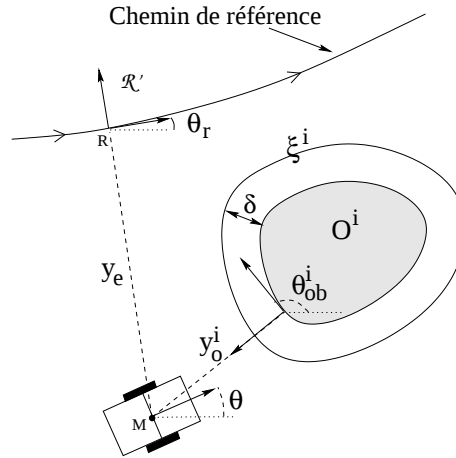
III.2.2.2 Stratégie de contournement

Considérons la figure III.2. Nous définissons autour de chaque obstacle O_i une enveloppe de sécurité ξ_i située à une distance constante δ . La distance entre le robot et l'obstacle y_0^i ainsi que son orientation relative $\theta - \theta_{ob}^i$ sont mesurées par le laser SICK 2D. L'angle θ_{ob}^i représente l'angle entre la tangente à l'obstacle au point le plus proche de M et l'axe des abscisses du repère de la scène $\mathcal{W}$. Il est défini de telle sorte que $0 \leq \theta_{ob}^i - \theta_r \leq \pi$ afin que le sens de contournement choisi soit respecté.

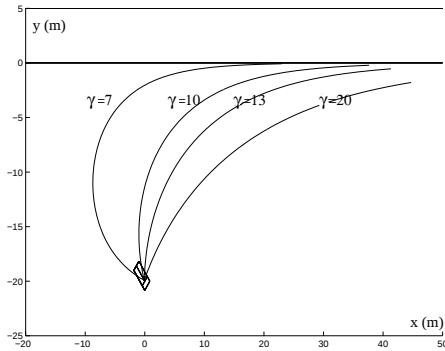
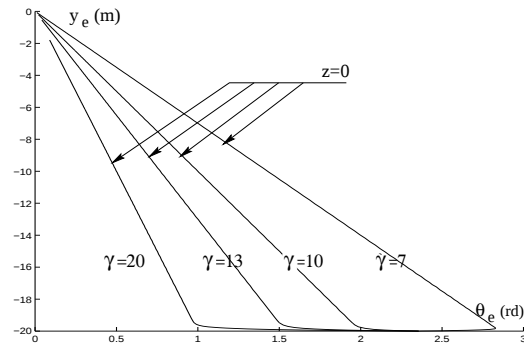
Le correcteur III.8 assure la convergence du robot vers le chemin à suivre dès que son point de référence M a atteint la variété de glissement z . La réalisation de la tâche principale de suivi implique de conserver M sur cette variété pendant tout le mouvement du robot. Cependant, celle-ci, telle qu'elle a été définie dans le paragraphe précédent, ne permet pas de garantir la non collision. Il est donc nécessaire de la modifier de manière à prendre en compte la présence des obstacles dans la scène. C'est pourquoi, nous proposons maintenant de considérer une variété de glissement non plus stationnaire, mais dépendante du temps. L'approche proposée dans ces travaux consiste à faire varier continûment la valeur de γ de manière à modifier la trajectoire du robot correspondant au glissement et éviter ainsi d'éventuels obstacles.

La variable de glissement $z = y_e + \gamma \text{sign}(v)\theta_e$ caractérise la corrélation existant entre ces deux variables due à la contrainte de non holonomie. Lorsque z décroît exponentiellement vers zéro, γ détermine la vitesse de convergence relative de

1. Le robot étant déjà sur la variété de glissement lorsqu'il rencontre un obstacle, $|y_e| < \gamma_0\pi$ d'après le lemme 2. Cette condition reste vérifiée puisque le sens de contournement choisi conduit à diminuer $|y_e|$.

FIG. III.2 – *Evitement d'obstacle pendant le transitoire d'un suivi de chemin*

chacune d'entre elles. Ainsi, le choix d'une valeur importante pour γ conduit à privilégier la convergence de θ_e au détriment de celle de y_e . Le robot aura alors tendance à tourner de manière à annuler rapidement l'erreur d'orientation plutôt que de se rapprocher du chemin. De même, si γ prend une valeur faible, le véhicule cherchera avant tout à réduire la distance qui le sépare du chemin plutôt que d'annuler l'erreur d'orientation. Ces résultats sont résumés sur les figures III.3 et III.4 qui représentent respectivement l'influence de la valeur de γ sur la trajectoire du robot dans le plan (x, y) et dans le plan (y_e, θ_e) .

FIG. III.3 – *Influence de γ sur la trajectoire du robot dans le repère de la scène*FIG. III.4 – *Influence de γ sur la trajectoire du robot dans le plan (y_e, θ_e)*

La variation de γ offre ainsi un degré de liberté supplémentaire pour éviter

les obstacles *tout en continuant de converger vers le chemin de référence*. Cette approche permet donc de réaliser deux tâches simultanément, l'évitement d'une part, le suivi de chemin d'autre part. Leur compatibilité est assurée grâce à une variation judicieuse de γ , variation que nous allons déterminer dans le paragraphe suivant.

III.2.2.3 Synthèse du correcteur

Notre objectif est ici de synthétiser le correcteur final intégrant la présence des obstacles dans la scène. Pour cela, nous proposons de faire varier γ de telle sorte que le robot suive l'enveloppe de sécurité ξ_i dès que l'obstacle devient dangereux. Ainsi, lorsque le véhicule pénètre dans la zone délimitée par cette enveloppe, γ est modifié de telle sorte que le robot s'asservisse sur ξ_i et y reste jusqu'à ce que l'obstacle ne présente plus de danger. γ est alors fixé constant, et le véhicule quitte la zone critique, achevant de converger vers le chemin de référence.

Donc, dans notre méthode, l'évitement d'obstacle est réalisé par un suivi de chemin. Nous exploitons le même formalisme que précédemment [Samson 92], et projetons orthogonalement le repère du robot sur la surface de l'obstacle. Nous définissons ainsi un repère de Frenet orienté dans la direction de θ_{ob}^i . De plus, comme les obstacles sont supposés strictement convexes, ce repère est défini de manière unique. Notons $\theta_o^i = \theta - \theta_{ob}^i$ l'orientation relative entre le robot et l'obstacle (voir figure III.2). D'après les résultats obtenus précédemment, le système caractérisant la dynamique de l'erreur de position et d'orientation du robot par rapport à l'obstacle s'écrit :

$$\begin{cases} y_o^{i'} = \text{sign}(v) \sin \theta_o^i \\ \theta_o^{i'} = \theta' - \theta_{ob}^{i'} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Le suivi de chemin consiste alors à définir une loi de commande $\theta_o^{i'}$ stabilisant le système III.17 à l'origine. Pour cela, nous proposons le correcteur suivant :

$$\theta_o^{i'} = -\frac{1}{k_{ob}}(\text{sign}(v)y_{o\delta}^i + k_{ob}\theta_o^i + 2 \sin \theta_o^i) \quad (\text{III.18})$$

où $y_{o\delta}^i = y_o^i - \text{sign}(y_o^i)\delta$ et $k_{ob} > 0$. Afin de démontrer la stabilité de ce correcteur, nous définissons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2}(y_{o\delta}^i + k_{ob}\text{sign}(v)\theta_o^i)^2 + \frac{1}{2}y_{o\delta}^{i^2} \quad (\text{III.19})$$

En dérivant cette fonction et en intégrant l'expression de $\theta_o^{i'}$ définie par III.18 dans ce calcul, nous obtenons le résultat suivant :

$$V' = -k_{ob}\theta_o^i \sin \theta_o^i - (y_{o\delta}^i + k_{ob}\text{sign}(v)\theta_o^i)^2 \quad (\text{III.20})$$

D'après la définition de θ_{ob}^i , $\theta_o^i \in [-\pi, \pi]$. θ_o^i et $\sin \theta_o^i$ restant de même signe sur cet intervalle, le produit $\theta_o^i \sin \theta_o^i$ est toujours positif. De ce fait, la dérivée de la fonction de Lyapunov donnée par l'équation III.20 est strictement négative, excepté au point d'équilibre $(0,0)$. La loi de commande III.18 stabilise donc le système III.17, assurant ainsi le suivi de chemin.

Le choix de k_{ob} est crucial pour les performances du système bouclé puisqu'il module l'amplitude de la commande : un petit gain permet ainsi de tourner rapidement tandis qu'un gain plus important peut ne pas être suffisant pour éviter l'obstacle. Nous proposons donc ici une relation permettant de choisir ce gain de manière à assurer la non collision. Supposons que le robot pénètre dans l'enveloppe ξ_i à l'abscisse curviligne s_1 . Une condition suffisante garantissant que le véhicule ne percutera pas l'obstacle est que :

$$V(s_1) < \delta^2 \quad (\text{III.21})$$

En effet, dans ce cas, nous avons :

$$(y_{o\delta}^i + k_{ob}\text{sign}(v)\theta_o^i)^2 + y_{o\delta}^{i^2} < 2\delta^2 \quad (\text{III.22})$$

ce qui assure la non collision puisque $|y_{o\delta}^i|$ reste alors inférieur à $\delta\sqrt{2}$. De plus, par définition, $y_{o\delta}^i(s_1) = 0$. Le gain permettant de satisfaire la relation III.21 doit vérifier :

$$k_{ob} < \frac{\delta\sqrt{2}}{|\theta_o^i(s_1)|} \quad (\text{III.23})$$

Si le gain k_{ob} est choisi de manière à satisfaire cette dernière relation, le robot tournera suffisamment vite pour éviter l'obstacle. Il reste alors à assurer la non saturation des actionneurs. Celle-ci dépend essentiellement de la vitesse linéaire du véhicule puisque cette dernière définit le temps de convergence du système. Elle doit donc rester suffisamment faible de manière à permettre au robot de contourner l'obstacle sans que les limites physiques du véhicule soient violées. Ainsi, tandis que la non collision repose sur le choix de k_{ob} , la non saturation est quant à elle basée sur la valeur de la vitesse linéaire v .

Nous avons élaboré deux lois de commande : la première, donnée par l'équation III.8, permet au robot de converger vers un chemin de référence, tandis

que la seconde définie par la relation III.18 assure la non collision. Nous montrons maintenant comment fusionner ces deux lois en exploitant la variation de γ . Nous considérons la loi de commande suivante pour χ_e :

$$\chi_e = -\frac{1}{\gamma}(\text{sign}(v)\sin\theta_e + \gamma'\text{sign}(v)\theta_e + kz) \quad (\text{III.24})$$

L'équation III.24 intègre la variation de γ par rapport à la longueur du chemin parcouru l . Elle apparaît ainsi comme une extension de la relation III.8 puisque, lorsque γ reste constant, les deux équations redeviennent strictement identiques. Il reste maintenant à déterminer γ' . Pour cela, nous exprimons la variable θ' à partir des équations III.17 et III.18. Il vient :

$$\theta' = -\frac{1}{k_{ob}}(\text{sign}(v)y_{o\delta}^i + k_{ob}\theta_o^i + 2\sin\theta_o^i) + \theta_{ob}^{i'} \quad (\text{III.25})$$

D'autre part, d'après le système III.5, $\theta'_e = \theta' - \theta'_r = \text{sign}(v)\chi_e$. En réinjectant l'expression III.25 dans cette dernière équation, nous obtenons :

$$\chi_e = \text{sign}(v)\left(-\frac{1}{k_{ob}}(\text{sign}(v)y_{o\delta}^i + k_{ob}\theta_o^i + 2\sin\theta_o^i) + \theta_{ob}^{i'} - \theta_r^i\right) \quad (\text{III.26})$$

Enfin, par identification des relations III.24 et III.26, nous déduisons l'expression de γ' suivante :

$$\gamma' = \frac{1}{\theta_e}\left(\frac{\gamma}{k_{ob}}(y_{o\delta}^i\text{sign}(v) + k_{ob}\theta_o^i + 2\sin\theta_o^i) + \gamma(\theta_r^i - \theta_{ob}^{i'}) - \sin\theta_e - \text{sign}(v)kz\right) \quad (\text{III.27})$$

Cette équation définit la manière dont γ doit varier pour que les deux tâches de suivi de chemin et d'évitement puissent être réalisées parallèlement. Lorsque cette exécution simultanée n'est plus possible, une singularité mathématique définie par l'annulation de l'angle θ_e apparaît. Dans ce cas, le robot se trouve orienté parallèlement au chemin de référence et ne peut plus à la fois continuer à converger vers ce chemin et suivre l'enveloppe de sécurité (cf. remarque 5). Cependant, comme nous avons restreint notre étude au cas des obstacles strictement convexes et que le sens de contournement a été choisi de telle sorte que y_e diminue, cette singularité ne peut jamais se produire, garantissant ainsi l'existence d'une commande bien conditionnée à tout instant.

Remarque 4 *La valeur de γ reste toujours positive. En effet, pendant la phase d'évitement, $|y_e| < \gamma\pi$, et d'après les hypothèses préliminaires, $|y_e| > \delta$. Donc, $\gamma > \frac{\delta}{\pi} > 0$ durant toute l'exécution de la tâche.*

La stratégie d'évitement envisagée est organisée en deux phases distinctes :

1. Si $|y_o^i| > \delta$, le robot se trouve loin des obstacles. γ est alors fixé constant et le véhicule est contrôlé par la loi de commande III.8. Il suit donc la variété de glissement $z = 0$, et commence à converger vers le chemin de référence.
2. Si $|y_o^i| < \delta$, le robot pénètre dans la zone de danger autour de l'obstacle définie par l'enveloppe ξ_i . Le véhicule doit donc s'asservir sur cette enveloppe tout en continuant de se rapprocher du chemin à suivre. Afin que les deux tâches soient compatibles, il est nécessaire de permettre à γ de varier. L'évolution de ce paramètre est alors définie par sa dérivée γ' donnée par l'équation III.27, tandis que le véhicule est contrôlé par la loi de commande III.24. Lorsque γ' s'annule, l'obstacle est dépassé et le danger de collision écarté. γ est alors fixé constant à sa dernière valeur, et le robot est à nouveau piloté par le correcteur "nominal" III.8. Il continue donc de suivre la variété de glissement $z = 0$ et achève de converger vers le chemin de référence, à moins qu'un deuxième obstacle ne soit détecté.

Remarque 5 *Lorsque γ' s'annule, le robot doit quitter l'enveloppe de sécurité ξ_i pour continuer à converger vers le chemin de référence. En effet, prolonger encore le suivi de cette enveloppe conduirait à rencontrer la singularité $\theta_e = 0$ qui marque la fin de la compatibilité des tâches de suivi de chemin et d'évitement.*

Notons ici que, tant que l'obstacle reste répulsif, l'évolution de γ ne peut être que monotone du fait de la stricte convexité des obstacles. La figure III.5 illustre les deux variations possibles de γ pendant un évitement. Ainsi, pour que le robot 1 suive l'enveloppe ξ_i en respectant le sens de contournement selon lequel y_e décroît, il doit chercher à se rapprocher du chemin de référence plutôt qu'à annuler l'erreur d'orientation. Aussi γ doit-il diminuer. De même pour que le robot 2 s'asservisse sur la même enveloppe ξ_i , il doit au contraire s'efforcer de réduire l'erreur d'orientation θ_e beaucoup plus rapidement que la distance qui le sépare du chemin de référence. C'est pourquoi, dans ce cas, γ doit augmenter.

La figure III.5 montre l'intérêt de considérer une variété de glissement instantanée pour contourner les obstacles. La trajectoire obtenue en maintenant γ constant conduirait en effet à une collision.

III.2.2.4 Lissage de la loi de commande

D'après la stratégie d'évitement précédente, tant que le robot se trouve loin des obstacles, γ reste constant, et sa dérivée est donc nulle. Par contre, lorsqu'il pénètre dans la région délimitée par l'enveloppe de sécurité ξ_i , γ commence à varier

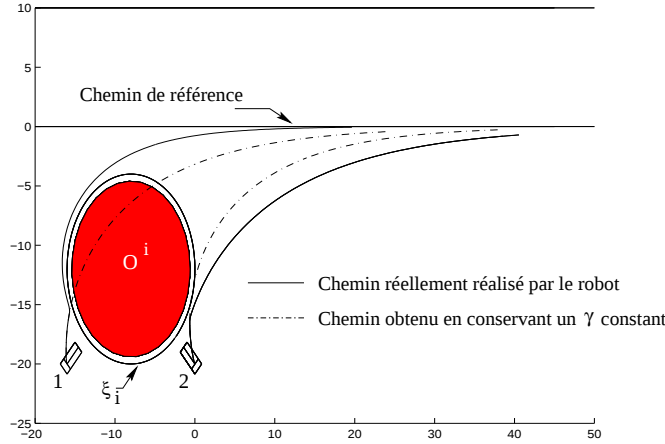


FIG. III.5 – Variation de γ pour l'évitement d'obstacle

et sa dérivée prend brutalement une valeur différente de zéro. Une telle évolution de γ' introduit nécessairement une discontinuité dans la loi de commande proposée. C'est pourquoi, nous définissons une deuxième enveloppe ξ'_i située à une distance $\delta' = \delta - \delta_1$ de l'obstacle où $0 < \delta_1 \ll \delta$ représente la largeur du couloir entre ξ_i et ξ'_i . Nous introduisons la fonction ν dépendant de la distance entre le robot et l'obstacle y_o^i :

$$\nu(y_o^i) = \begin{cases} 0 & \text{si } |y_o^i| > \delta \\ \frac{\delta - |y_o^i|}{\delta_1} & \text{si } \delta' \leq |y_o^i| \leq \delta \\ 1 & \text{si } |y_o^i| \leq \delta' \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

L'expression de γ' utilisée dans la loi de commande III.24 sera alors donnée par $\tilde{\gamma}' = \gamma' \nu(y_o^i)$ où γ' reste naturellement défini par la relation III.27.

III.3 Résultats de simulation

Nous présentons ci-après quelques résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel *Matlab*. La tâche robotique considérée consiste à suivre un chemin rectiligne ($\chi_r = 0$) en environnement encombré. Initialement, la distance algébrique y_e entre le robot et le chemin de référence est de -20 mètres, et l'erreur d'orientation θ_e de $3\pi/4$ radians. La configuration du véhicule a donc été choisie de manière à induire une longue phase transitoire pendant l'exécution de la tâche. Deux obstacles cylindriques O^1 et O^2 , de rayons respectifs $r_1 = 8$ mètres et $r_2 = 4$ mètres, ont été positionnés de manière à gêner le déplacement du robot.

Ils sont respectivement centrés en $C_1 = (-8, -12)$ et $C_2 = (8, -12)$. La configuration du véhicule par rapport aux obstacles est donc définie par les couples : $(y_o^1 = -3.313 \text{ mètres}, \theta_o^1 = \pi/2)$ et $(y_o^2 = 7.313 \text{ mètres}, \theta_o^2 = 0)$.

D'autre part, les distances de sécurité δ_1 et δ_2 ont été fixées à 0.8 mètre, tandis que les gains k et k_{ob} ont respectivement pour valeur 10 et 0.36. Enfin, γ a été fixé initialement à $\gamma_0 = 8$. Ces choix satisfont les conditions suivantes :

- La contrainte $1 - \chi_r y_e > 0$ est vérifiée quelle que soit la valeur de y_e considérée puisque $\chi_r = 0$.
- $|y_e(0)| < \gamma_0 \pi$.
- Si ε est fixé à 1.2, alors $\varepsilon < \frac{\gamma_0 \pi}{2}$ et $|z(0)| < \varepsilon$ (cf. preuve du lemme 2).
- La valeur de k_{ob} satisfait la relation III.23 dans la mesure où elle est inférieure à $\delta\sqrt{2}/\pi$. Celle-ci minore l'expression $\delta\sqrt{2}/|\theta_o^i(s_1)|$ puisque $|\theta_o^i| < \pi$.

Les figures III.6, III.7, et III.8 représentent respectivement la trajectoire du robot dans le repère de la scène, l'évolution de γ pendant la tâche, et la convergence exponentielle de z à zéro². Ainsi, au début de la tâche, γ reste fixé à sa valeur initiale. Grâce à la loi de commande III.8, le robot atteint puis suit la variété de glissement $z = 0$ (cf. figure III.8). Lorsqu'il pénètre dans la zone délimitée par ξ_1 , γ augmente (cf. figure III.7), et le robot est piloté par la loi de commande III.24. La convergence de θ_e est alors privilégiée au détriment de celle de y_e afin de satisfaire le sens de contournement imposé. Le robot va donc tourner plutôt que de chercher à se rapprocher du chemin. Lorsque la dérivée de γ s'annule, le véhicule est autorisé à quitter l'enveloppe ξ_1 . γ est alors fixé constant à sa dernière valeur (cf. figure III.7), et le robot reprend la convergence vers le chemin de référence. Il pénètre alors dans la région définie par l'enveloppe ξ_2 . Dans ce cas, pour respecter le sens de contournement selon lequel y_e décroît, il faut privilégier l'annulation de la distance au chemin en diminuant γ . Le robot pivote alors très peu afin de converger plus rapidement vers le chemin de référence tout en suivant l'enveloppe ξ_2 . Il la quitte dès que la dérivée de γ s'annule et termine la tâche en se stabilisant sur le chemin de référence.

Enfin, nous présentons sur les figures III.9 et III.10 un autre résultat de simulation obtenu par T. Hamel et A. Dzul ([Souères *et al.* 98b]) à l'aide du simulateur Khepera développé par Olivier Michel à l'INRIA de Sophia-Antipolis.

2. Ces deux dernières figures semblent montrer que les variations de γ et z sont quasiment discontinues. Nous avons toutefois pu vérifier que ce phénomène n'est dû qu'au choix des échelles et que les variations de ces paramètres sont tout à fait admissibles.

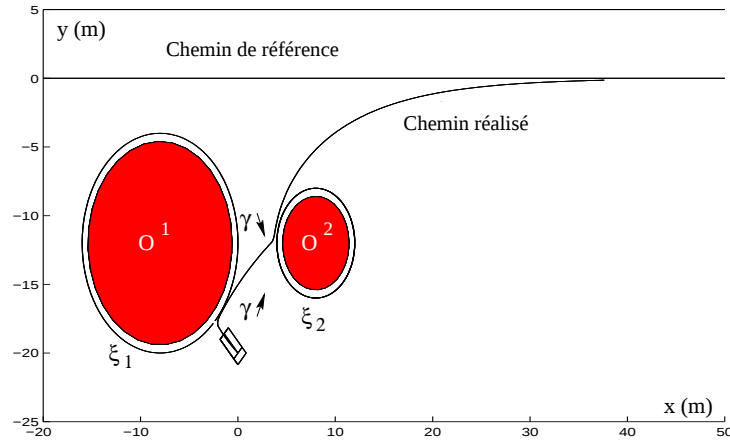


FIG. III.6 – Suivi de chemin en environnement encombré

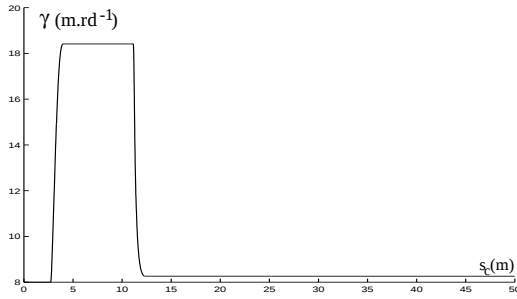


FIG. III.7 – Evolution de γ pendant le suivi de chemin

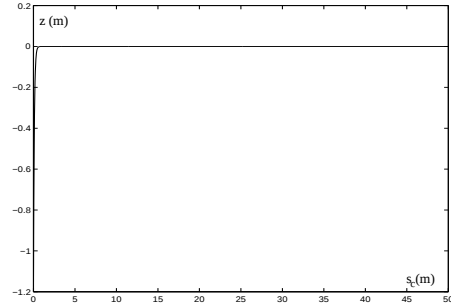


FIG. III.8 – Evolution de la variété de glissement z pendant le suivi de chemin

III.4 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section un premier travail auquel nous avons collaboré dans le cadre de cette thèse. Nous nous sommes intéressés à l'évitement d'obstacle pendant la phase transitoire d'un suivi de chemin. En effet, bien que la non collision soit assurée lorsque le robot se trouve au voisinage du chemin de référence, elle ne peut plus être garantie dès que le véhicule doit effectuer un mouvement de grande amplitude pour converger. La méthode proposée repose sur la définition d'une variété de glissement instationnaire. Elle tire son originalité de l'exploitation de ce degré de liberté pour fusionner deux lois de commande, l'une réalisant le suivi de chemin, l'autre garantissant l'évitement d'obstacle. La première loi appartient aux techniques classiques de commande de robots mobiles

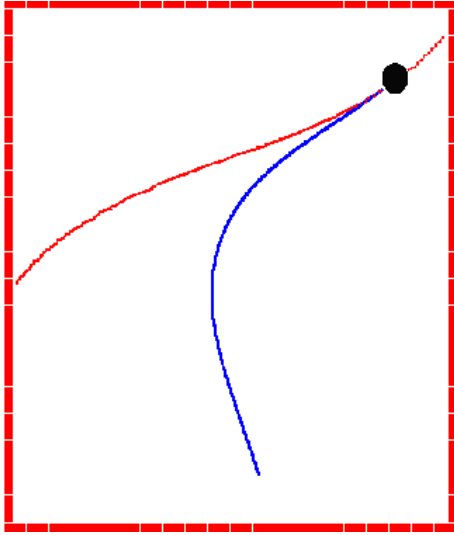


FIG. III.9 – *Suivi de chemin dans l'espace libre*

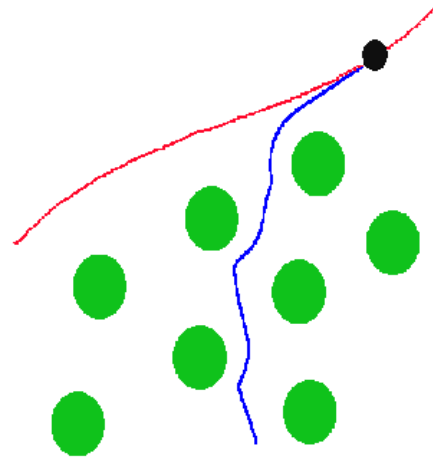


FIG. III.10 – *Même tâche en environnement encombré*

et s'exprime dans l'espace d'état du véhicule. Elle nécessite donc sa relocalisation permanente par rapport à un repère global. Par contre, la seconde apparaît plutôt comme une loi de commande référencée capteur puisqu'elle ne dépend que de données mesurées ou connues. La localisation du robot n'est alors plus nécessaire. Nous avons donc fusionné ici deux lois s'exprimant dans des espaces différents. Dans les travaux qui suivent et qui constituent le cœur de la thèse, nous développons des lois de commande référencées multi-capteurs, au sens où nous considérons à la fois des données visuelles et proximétriques afin de réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. L'exécution d'une telle tâche suppose l'introduction de degrés de liberté supplémentaires permettant à la caméra de se déplacer indépendamment de la base [Pissard-Gibollet 93]. C'est pourquoi, nous travaillons dans la suite non plus sur une simple plateforme mobile, mais sur un robot équipé d'abord d'une platine puis d'un bras manipulateur.

Chapitre IV

Commande référencée multi-capteurs d'un robot mobile en environnement encombré

IV.1 Introduction

La commande référencée vision présentée dans le chapitre II repose sur la seule régulation à zéro d'une erreur entre les indices visuels courants et leur consigne. Elle peut donc s'avérer limitée pour décrire des tâches robotiques plus élaborées telle que la navigation d'un robot mobile en environnement encombré. Ainsi, par exemple, les lois de commande synthétisées précédemment qui permettent de positionner la caméra face à une cible ne sont valables que dans l'espace libre. Nous présentons dans ce chapitre un ensemble de méthodes permettant à un robot mobile non holonome de réaliser une tâche de navigation référencée multi-capteurs en environnement encombré. Plus particulièrement, notre objectif est de positionner la caméra embarquée face à une cible fixe en dépit d'éventuels obstacles présents dans la scène.

Nous supposons dans l'ensemble de ces travaux que les obstacles susceptibles de gêner le déplacement du robot sont statiques et d'une hauteur inférieure à celle de la caméra. De ce fait, comme cette dernière est contrainte à se déplacer

dans un plan horizontal (cf. chapitre II), la cible ne peut être cachée - même momentanément - par les obstacles. Les phénomènes d'occultation ne sont donc pas pris en compte dans les méthodes que nous proposons. Notons cependant qu'un processus de prédiction du mouvement apparent de la cible dans l'image tel qu'un filtre de Kalman pourrait permettre de pallier aux occultations momentanées.

Dans notre cas, la vision ne peut permettre de détecter la présence des obstacles dans la scène. C'est pourquoi, nous considérerons dans toute la suite un robot mobile non holonome équipé, d'une part, d'une caméra fournissant les indices visuels caractérisant la cible, et d'autre part, d'un capteur laser SICK 2D mesurant la distance et l'orientation relative entre le robot et l'obstacle. Ainsi, la commande devra intégrer non seulement les informations visuelles nécessaires à la réalisation de la tâche référencée vision, mais aussi les données proximétriques permettant de caractériser localement le plus proche obstacle du robot, c'est-à-dire en fait le risque de collision. Notre objectif sera donc ici de synthétiser un ensemble de lois de commande référencées multi-capteurs permettant à un robot mobile d'effectuer une tâche de navigation en environnement encombré. Nous chercherons ensuite à comparer ces lois pour ne retenir que celles qui semblent les mieux adaptées à notre problème.

Dans le cadre de ces travaux, nous considérerons successivement les deux ensembles mécaniques modélisés dans le chapitre II. Dans le cas de la base mobile munie d'une platine commandable en lacet, nous avons élaboré cinq méthodes : trois d'entre elles reposent sur l'exécution séquentielle de l'asservissement visuel et de l'évitement, les deux dernières consistant au contraire à effectuer simultanément ces deux tâches (la tâche de positionnement doit alors être abandonnée au profit d'une autre tâche référencée vision moins contraignante). En ce qui concerne le deuxième ensemble mécanique, nous avons cherché à exploiter la redondance issue de l'introduction du bras manipulateur plan à deux degrés de liberté pour réaliser conjointement la tâche de positionnement et l'évitement au voisinage des obstacles. Nous avons montré, dans le chapitre II, que la redondance pouvait être traitée de deux manières consistant, l'une à introduire une tâche supplémentaire à exécuter parfaitement et simultanément avec la tâche référencée vision, l'autre à appliquer directement le formalisme des tâches redondantes. Nous proposons deux méthodes pour chacune de ces approches.

Les stratégies de commande envisagées ici consistent à réaliser l'asservissement visuel ou l'évitement en fonction du risque de collision. Elles reposent sur deux approches distinctes dites de fusion au niveau de la commande et de fusion au niveau de la tâche. Dans la première approche, nous synthétisons deux correcteurs valables, l'un près des obstacles, l'autre dans l'espace libre, et obtenons le correcteur global par combinaison convexe de ces deux correcteurs. Dans la se-

conde approche, au contraire, nous déterminons deux tâches référencées capteurs définies sur des domaines de validité identiques, et déduisons la tâche globale à effectuer par une combinaison convexe similaire à la précédente. Nous cherchons alors un correcteur permettant de la réguler à zéro. Les cinq techniques proposées pour l'ensemble mécanique constitué de la base mobile et de la platine s'appuient uniquement sur l'approche dite de fusion à la commande. Par contre, les quatre méthodes développées pour le robot équipé du bras manipulateur exploitent les deux types de stratégies envisagés.

Nous présentons d'abord dans la section IV.2 les techniques dédiées à la base mobile munie de la platine commandable en lacet ainsi que la stratégie de fusion à la commande sur laquelle sont basées ces méthodes. Nous reviendrons sur la fusion au niveau de la tâche dans la section IV.3 lorsque nous détaillerons les méthodes relatives au deuxième système mécanique composé de la même base mobile équipée du bras manipulateur plan à deux degrés de liberté. Enfin, nous terminerons ce chapitre en comparant les diverses approches proposées et en proposant quelques pistes concernant la modélisation d'une tâche complexe sous la forme d'un enchaînement de tâches élémentaires.

IV.2 Cas d'un robot mobile équipé d'une caméra montée sur une platine

Nous considérons donc ici un robot mobile équipé d'une platine sur laquelle est montée une caméra, et présentons un panel de méthodes permettant à un tel robot de réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Les techniques proposées reposent sur la fusion des informations sensorielles au niveau de la commande. Nous envisageons ici l'exécution de deux tâches référencées vision distinctes :

- La première consiste à positionner la caméra face à une cible composée de quatre points. Elle établit une liaison virtuelle rigide entre cette caméra et son environnement, définissant complètement le mouvement du robot et interdisant ainsi toute forme de redondance. La tâche référencée vision de positionnement et l'évitement devront donc être réalisés *séquentiellement*.
- La deuxième au contraire ne considère la tâche précédente que lorsque le robot se trouve près de la cible. Lorsqu'il en est éloigné, une tâche référencée vision moins contraignante est définie, de manière à bénéficier de la redondance pour effectuer *simultanément* l'asservissement visuel et l'évitement.

Nous décrivons d'abord la stratégie générale de commande, avant de présenter séparément les approches développées pour chaque type de tâche.

IV.2.1 Stratégie générale de commande

La stratégie envisagée s'inscrit dans la première approche dite de fusion au niveau de la commande. Elle consiste à :

- Synthétiser un premier correcteur permettant de réaliser la tâche référencée vision sur la base des travaux développés dans le chapitre II,
- Déterminer un deuxième correcteur garantissant l'évitement,
- Basculer entre les deux correcteurs en fonction de la distance à l'obstacle.

Pour modéliser cette stratégie, nous définissons une enveloppe de sécurité notée ξ_0 située à une distance d_0 de chaque obstacle et permettant de caractériser le risque de collision (voir figure IV.1).

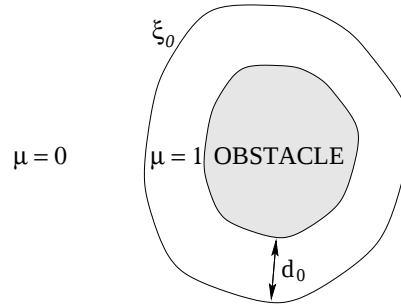


FIG. IV.1 – Paramètres pour la stratégie générale de contournement

Notre robot étant commandable en vitesse, nous proposons la loi de commande suivante pour satisfaire les objectifs précédents :

$$\dot{q} = (1 - \mu) \dot{q}_{AV} + \mu \dot{q}_{EV} \quad (\text{IV.1})$$

où $\dot{q} = [v \ \omega \ \dot{q}_{pl}]^T$ définit la loi de commande en vitesse globale qui sera appliquée au robot. $\dot{q}_{AV} = [v_{AV} \ \omega_{AV} \ \dot{q}_{plAV}]^T$ représente le correcteur permettant de réaliser l'asservissement visuel que nous avons synthétisé à la partie II.4.1.

1. Rappelons que v et ω représentent les vitesses linéaire et angulaire de la base mobile, et $\dot{q}_{pl}$ la vitesse angulaire de la platine (cf. chapitre II). Les indices AV et EV caractérisent simplement le type de correcteur considéré, asservissement visuel ou évitement.

$\dot{q}_{EV} = [v_{EV} \ \omega_{EV} \ \dot{q}_{plEV}]^T$ désigne quant à lui le correcteur garantissant l'évitement d'obstacle que nous synthétiserons dans les paragraphes qui suivent. Enfin, μ est une fonction de la distance à l'obstacle qui permet de gérer le basculement d'un correcteur vers l'autre (voir figure (IV.1)). En effet, lorsque le robot se trouve loin des obstacles (i.e., hors de la zone définie par ξ_0), μ est fixé à 0, et seul l'asservissement visuel commande le robot. Inversement, s'il entre dans le voisinage d'un obstacle (i.e., dans la région limitée par ξ_0), μ prend la valeur 1 de telle sorte que le robot soit piloté uniquement par la loi de commande garantissant l'évitement. Bien évidemment, une évolution de μ purement binaire n'est pas acceptable car elle conduit nécessairement à une discontinuité de la loi de commande IV.1. μ devra donc être défini comme une fonction continue suffisamment régulière de la distance à l'obstacle. Son évolution étant étroitement liée à la méthode considérée, nous la détaillerons pour chaque cas particulier.

Nous décrivons maintenant les différentes techniques pour les deux types de tâche.

IV.2.2 Tâche de positionnement classique

Nous considérons ici un robot mobile muni d'une simple platine commandable en lacet supportant la caméra, et cherchons à réaliser une tâche de positionnement classique. Pour cela, nous disposons de trois commandes : les vitesses linéaire et angulaire de la base d'une part, la vitesse angulaire de la platine d'autre part. A ces trois commandes correspondent seulement trois degrés de liberté pour la caméra puisque celle-ci se déplace uniquement dans un plan horizontal (cf. chapitre II).

La tâche référencée vision à réaliser consistant à positionner la caméra face à une cible, elle contraint les trois degrés de la caméra, et, à travers la jacobienne globale (voir paragraphe II.2.1.2), les trois actionneurs du robot. Elle définit donc complètement le mouvement du véhicule, et ne permet pas d'intégrer la réalisation simultanée d'un objectif supplémentaire. Ainsi, dans notre cas, est-il impossible d'exploiter le formalisme des tâches redondantes développé par Samson [Samson *et al.* 91]. Nous chercherons donc ici à réaliser séquentiellement l'asservissement visuel et l'évitement sur la base de l'équation IV.1.

Nous présentons maintenant trois méthodes permettant au robot mobile considéré de réaliser la tâche référencée vision précédente malgré la présence des obstacles dans la scène. La première approche [Swain *et al.* 99] est basée sur le formalisme des champs de potentiels classiques [Khatib 86] [Khatib 96], et de ce fait s'avère extrêmement sensible aux puits de potentiel. C'est pourquoi, nous l'avons ensuite étendue en développant un potentiel répulsif rotatif [Cadenat *et al.* 99b].

Enfin, en liaison avec nos travaux [Souères *et al.* 98a][Souères *et al.* 98b] présentés dans la section III, nous proposons également une technique [Cadenat *et al.* 99a] permettant de contourner l'obstacle en exploitant le formalisme du suivi de chemin [Samson 92].

IV.2.2.1 Méthode basée sur le formalisme des potentiels

La méthode que nous présentons ici a été développée en collaboration avec Ricardo Swain [Swain *et al.* 99]. Il s'agit d'une première approche permettant de réaliser une tâche référencée multi-capteurs, approche que nous avons étendue et améliorée dans la suite de nos travaux.

Cette technique s'appuie sur le formalisme des potentiels pour permettre au robot d'éviter les obstacles. Nous présentons donc dans un premier temps le formalisme des potentiels classiques [Khatib 86] et l'extension que nous utilisons, le potentiel pondéré [Khatib 96].

Formalisme des potentiels

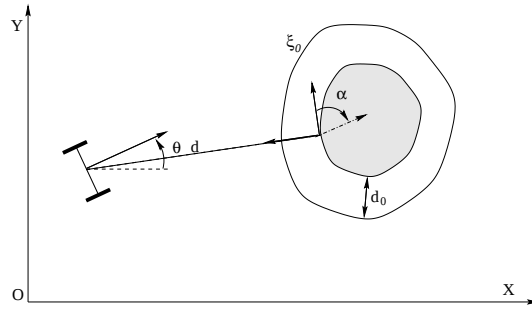
Le formalisme des potentiels [Krogh 84] [Khatib 86] [De Medio & Oriolo 91] [De Luca & Oriolo 94a] permet à un robot mobile de naviguer dans un environnement encombré. Il consiste à définir un champ de potentiel artificiel dans lequel se déplace le véhicule. Le but à atteindre est alors décrit dans l'espace des configurations par un potentiel attractif, tandis que les obstacles sont représentés par un potentiel répulsif. Le robot sera commandé de manière à suivre le gradient de la somme de ces potentiels jusqu'à son minimum.

Cependant, dans notre cas, l'objectif étant de positionner la caméra face à une cible, le potentiel attractif est déjà intégré dans la tâche référencée vision. C'est pourquoi, nous ne chercherons ici à définir qu'un potentiel répulsif. Pour cela, nous nous sommes inspirés des travaux de Maher Khatib [Khatib 96].

Afin que le problème soit bien posé, nous supposons que :

- Seuls des obstacles convexes sont présents dans la scène, pour limiter les problèmes de minima locaux inhérents à la méthode des potentiels.
- La distance finale entre la base mobile équipée du laser et la cible reste supérieure à la distance de contournement d_0 afin de garantir que la cible ne sera pas confondue avec un obstacle, et que le robot ne sera pas repoussé en fin de tâche.

Considérons maintenant la figure IV.2 : le laser SICK fournit la plus courte distance d entre le point représentatif du robot et l'obstacle, ainsi que l'orientation relative α entre la tangente à l'obstacle et la direction du véhicule.

FIG. IV.2 – *Evitement d'obstacle avec le potentiel-rotation*

Nous définissons une enveloppe de sécurité notée ξ_0 située à une distance d_0 de chaque obstacle. ξ_0 permet donc de caractériser le danger de collision pour le robot, et délimite, dans le cas de la méthode des potentiels classiques, la région dans laquelle la force répulsive sera active. Ainsi, lorsque le robot pénètre dans cette zone, il est aussitôt repoussé par l'obstacle, même si celui-ci ne présente pas de danger majeur. Le choix de la distance d_0 devient alors critique. En effet, une valeur trop faible induit de fortes variations de la force répulsive à l'entrée de la zone dangereuse, et peut conduire à la saturation des actionneurs. De même, une valeur trop élevée sur-contraint le mouvement du robot, l'empêchant de passer par des régions tout à fait navigables. Afin de s'affranchir de cette limitation et de simplifier le choix de la distance d_0 , M. Khatib a proposé dans [Khatib 96] un nouveau potentiel répulsif intégrant l'orientation relative du robot par rapport à l'obstacle. Ainsi, l'intensité de la force répulsive produite pourra être ajustée en fonction de cette donnée. M. Khatib propose la fonction de potentiel suivante [Khatib 96] :

$$\begin{cases} U_\alpha(X) = \frac{1}{2}k_1\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)^2 + \frac{1}{2}k_2\alpha^2(d - d_0)^2 & \text{if } d \leq d_0 \\ U_\alpha(X) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

où X représente l'état du robot et $k_2 \gg k_1$ sont des gains positifs. Le premier terme est prédominant près de la surface de l'obstacle et tend vers l'infini pour garantir la non collision. Le deuxième est significatif dans le voisinage de l'enveloppe ξ_0 : il permet de pondérer la force répulsive en fonction de l'angle α . Ainsi, lorsque le robot pénètre dans la zone délimitée par ξ_0 parallèlement à l'obstacle, α est faible, et le mouvement du robot n'est que très peu modifié. Par contre, dans le cas où il entre dans cette région avec un angle d'incidence orienté vers l'obstacle, le danger de collision est plus important, et l'intensité de la force s'accroît. Le véhicule est donc repoussé plus énergiquement. Une telle définition du potentiel permet d'adapter le mouvement du robot en fonction du contexte, et de simpli-

fier le choix de la distance d_0 en modulant judicieusement la force répulsive. Nous considérerons dans toute la suite cette fonction de potentiel. La force répulsive correspondante $\vec{F}_r$ est alors donnée classiquement par : $\vec{F}_r = -\text{grad}(U_\alpha)$, et, en projetant la force dans le repère lié au robot, nous obtenons la loi de commande suivante² :

$$v = k_3[\cos \theta \sin \theta] F_r \quad (\text{IV.3})$$

$$\omega = k_4[-\sin \theta \cos \theta] F_r \quad (\text{IV.4})$$

où θ représente l'orientation du robot par rapport au repère de la scène, k_3 et k_4 étant des gains positifs.

Remarque 6 *Classiquement, une force est proportionnelle à une accélération. Cependant, quand un robot peut être commandé en vitesse et que seul son modèle cinématique est pris en compte, la force virtuelle produite peut être considérée comme directement proportionnelle à la vitesse.*

Remarque 7 *Nous ne nous sommes intéressés ici qu'au cas d'un obstacle unique. Dans le cas où plusieurs obstacles sont considérés, la force répulsive F_r appliquée au robot est donnée par la somme de toutes les forces répulsives générées par chacun des obstacles [Khatib 96].*

Contrôle de la platine et synthèse de la loi de commande globale

Le vecteur de commande précédent fournit les vitesses linéaire et angulaire nécessaires pour contourner un obstacle. La méthode des potentiels ne permet donc pas de contrôler la platine, et les indices visuels peuvent être perdus pendant la phase d'évitement. Afin de répondre à ce problème, nous proposons d'exprimer la loi de commande durant cette phase comme la somme des correcteurs donnés par l'asservissement visuel et la méthode des potentiels. La commande référencée vision jouera alors le rôle du potentiel attractif, permettant de conserver la cible en vue. Nous obtenons :

$$\dot{q}_{EV} = \dot{q}_{AV} + \dot{q}_{POT} \quad (\text{IV.5})$$

où $\dot{q}_{EV} = [v_{EV} \ \omega_{EV} \ \dot{q}_{pl_{EV}}]^T$ conserve la même définition que dans l'équation IV.1, $\dot{q}_{AV} = [v_{AV} \ \omega_{AV} \ \dot{q}_{pl_{AV}}]^T$ et $\dot{q}_{POT} = [v_{POT} \ \omega_{POT} \ 0]^T$ étant respectivement donnés par la loi de commande référencée vision II.48 et la méthode des potentiels précédente. v_{POT} et ω_{POT} sont donc respectivement synthétisés à partir des équations IV.3 et

2. Le lecteur intéressé par la détermination de la force et de la loi de commande pourra se reporter à [Khatib 96] pour de plus amples détails.

IV.4, tandis que la composante correspondant à la platine est fixée à 0 puisqu'elle ne peut être contrôlée par cette première technique d'évitement.

La loi de commande IV.5 est tout à fait similaire à celle définie classiquement par la méthode des potentiels. La différence majeure réside en fait dans la définition du potentiel attractif qui s'exprime ici dans l'espace capteur et non plus dans l'espace des configurations. De plus, comme $\dot{q}_{\text{POT}}$ n'est actif (i.e., non nul) que dans la zone d'influence de l'obstacle, l'équation IV.5 suffit pour définir le correcteur global. Le basculement est alors géré au niveau de la définition du potentiel répulsif, et l'introduction du paramètre μ comme dans la loi IV.1 n'est plus nécessaire. Le correcteur global est donc ici donné par :

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{EV}} = \dot{q}_{\text{AV}} + \dot{q}_{\text{POT}} \quad (\text{IV.6})$$

Remarque 8 *L'équation IV.6 peut naturellement se réécrire sous la forme plus générale IV.1 si $\dot{q}_{\text{EV}}$ est donné par l'équation IV.5 et μ varie de manière binaire. La continuité de la loi de commande est alors assurée par la définition du potentiel répulsif qui induit des vitesses faibles lorsque le robot pénètre dans la zone délimitée par l'enveloppe ξ_0 .*

La stratégie de commande est la suivante : si le robot se trouve hors de la région définie par l'enveloppe ξ_0 , le potentiel répulsif n'est pas actif, et la force associée est nulle. De ce fait, l'équation IV.6 se réduit à $\dot{q} = \dot{q}_{\text{AV}}$, et le véhicule n'est piloté que par l'asservissement visuel. Par contre, dès que le robot franchit l'enveloppe ξ_0 , la force répulsive augmente progressivement et le véhicule est commandé par une combinaison linéaire de l'asservissement visuel et de la loi d'évitement. L'exécution de la tâche référencée vision est alors perturbée par le mouvement de contournement de la base mobile, et la conservation des indices visuels dans le champ de vue de la caméra n'est plus garantie. Enfin, lorsque l'obstacle ne présente plus de danger pour le robot, les effets attractif et répulsif s'ajoutent, permettant au robot de quitter naturellement la zone critique. La définition d'une condition de sortie n'est donc pas nécessaire, contrairement aux méthodes que nous présentons dans la suite de ce manuscrit.

Ainsi, la technique que nous avons développée suppose que l'asservissement visuel et le correcteur défini par le potentiel IV.2 cohabitent en phase d'évitement. Or, il s'agit de deux lois de commande à vocation contraire, l'une attirant le robot vers le but et donc vers l'obstacle, l'autre cherchant à l'en écarter. Outre les difficultés pour garantir la non collision et la conservation des indices visuels dans l'image, cette combinaison induit deux inconvénients supplémentaires :

- D'une part, la méthode s'avère très sensible aux problèmes des puits de potentiel. Ceux-ci se produisent lorsque les forces attractive et répulsive

s'annulent. Le robot reste alors bloqué dans le puits sans pouvoir atteindre son but, entraînant l'échec de l'exécution de la tâche. Une solution consiste à perturber le mouvement du robot aléatoirement, de telle sorte qu'il quitte le minimum local.

- D'autre part, la preuve de stabilité du correcteur global reste relativement complexe à établir car il est difficile d'exhiber une fonction de Lyapunov caractérisant à la fois la convergence du système vers le but et l'évitement d'obstacle.

Enfin, lorsque les vitesses calculées à l'aide de la loi IV.6 violent les limites physiques du véhicule, nous proposons de saturer les commandes en les fixant à leur valeur maximale comme dans [Khatib 96].

Résultats de simulation

Nous présentons maintenant quelques résultats de simulation. L'objectif est de positionner la caméra face à une cible composée de quatre points dans un environnement encombré. Les configurations du robot et des différents obstacles présents dans la scène ont été choisies de telle sorte que le véhicule ne puisse converger directement vers la cible. Les figures IV.3 et IV.4 représentent respectivement la

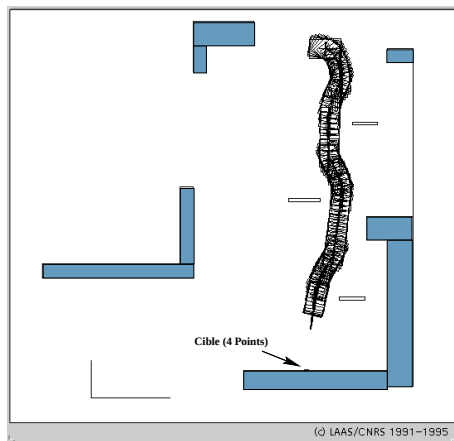


FIG. IV.3 – *Tâche référencée vision en environnement encombré avec le potentiel IV.2*

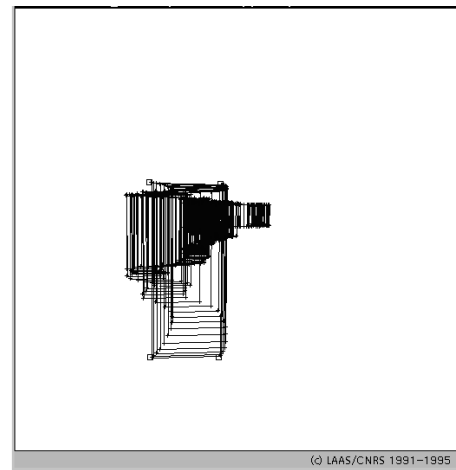


FIG. IV.4 – *Evolution des indices visuels dans l'image*

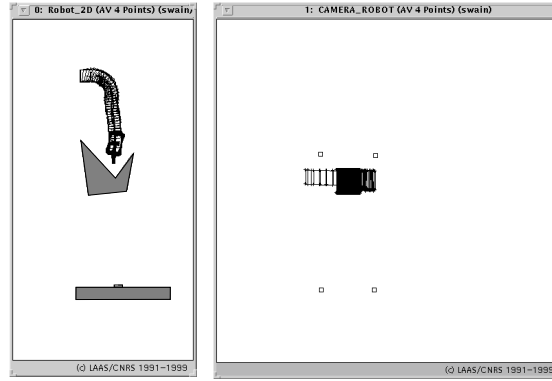
trajectoire du robot dans la scène et l'évolution des indices visuels dans l'image.

Au début de la tâche, le robot se trouve loin de tout obstacle. Il n'est donc piloté que par la commande référencée vision. Par contre, lorsqu'il entre dans le voisinage du premier obstacle, la force répulsive correspondante augmente et le mouvement du robot est modifié de telle sorte que l'obstacle soit évité³. Pendant cette phase, la convergence des indices visuels est perturbée puisqu'aucun dispositif de compensation n'a été mis en œuvre. La cible peut donc être perdue. Lorsque l'obstacle ne présente plus de danger pour le robot, les forces attractive et répulsive s'additionnent pour tirer le véhicule hors de la zone dangereuse. La force répulsive s'annule alors progressivement, et le robot est à nouveau commandé par l'asservissement visuel. Il reprend donc la tâche initiale jusqu'à ce qu'il rencontre le deuxième obstacle. Celui-ci présentant un danger immédiat, le potentiel IV.2 fournit une force répulsive permettant au robot de le contourner. Cependant, ce mouvement d'évitement conduit le véhicule directement dans la zone d'influence d'un troisième obstacle. Mais, celui-ci, contrairement au précédent, ne présente pas de danger majeur. C'est pourquoi, la force répulsive correspondante n'affecte que très légèrement la trajectoire du robot. Enfin, après avoir quitté cette zone, le véhicule rencontre un dernier obstacle qu'il contourne avant de positionner définitivement la caméra face à la cible, réalisant ainsi parfaitement la tâche robotique désirée.

Enfin, sur la figure IV.5, nous montrons les limitations de cette méthode pour des obstacles concaves. Dans le cas que nous présentons, nous avons choisi délibérément une configuration de l'obstacle et de la cible conduisant à un puits de potentiel. Ainsi, lorsque le robot pénètre dans la zone d'influence de l'obstacle, les forces attractives et répulsives se compensent, annulant la vitesse linéaire du robot. Celui-ci s'immobilise dans la zone de contournement, tout en continuant à pointer vers la cible.

La technique précédente [Swain *et al.* 99] constitue une première tentative pour réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Le contournement des obstacles est réalisé à l'aide du potentiel pondéré par l'angle IV.2, extension directe de la méthode des potentiels classiques [Khatib 86]. Cette technique conduit à exprimer la loi de commande en phase d'évitement comme une combinaison linéaire des correcteurs définis par l'asservissement visuel et le formalisme des potentiels. Comme ces deux lois sont à vocation contradictoire, il est extrêmement difficile de garantir la stabilité du système rebouclé, ainsi que la conservation des indices visuels dans l'image pendant l'exécution de la tâche. De plus, pour la même raison, la méthode s'avère très sensible aux problèmes

3. Le sens de contournement est fixé par l'orientation de la force résultante de l'asservissement visuel et du potentiel répulsif.

FIG. IV.5 – *Puits de potentiel pour un obstacle concave*

des minima locaux, et ne permet pas de considérer des obstacles concaves. Par conséquent, la faisabilité de la tâche qui repose sur la propriété de stabilité, la garantie de non collision, et la capacité du robot à pointer vers la cible pendant tout son déplacement ne peut être démontrée. Pour répondre à l'ensemble de ces problèmes, nous présentons ci-après une technique basée sur la définition d'un nouveau potentiel répulsif [Cadenat *et al.* 99b].

IV.2.2.2 Extension : Définition d'un potentiel répulsif rotatif

Les limitations de la méthode des potentiels classiques⁴ naissent de la présence de deux forces antagonistes pendant la phase d'évitement, l'une attirant le robot vers l'obstacle, l'autre l'en repoussant. La méthode que nous proposons ici s'inspire des méthodes dites de "champ de vortex" [De Medio & Oriolo 91] [De Luca & Oriolo 94a] [Bemporad *et al.* 96]. Elle repose sur la séparation des effets attractif et répulsif de ces deux lois de commande. Cependant, cela suppose d'une part que la cible ne soit pas perdue pendant la phase d'évitement, et d'autre part, que le potentiel répulsif soit défini de telle manière que le robot puisse contourner les obstacles sans l'aide d'une quelconque force attractive. Or, dans la méthode des potentiels classiques, la force répulsive s'exprime comme le gradient d'une fonction de coût qui prend une valeur constante en tout point situé à une même distance de l'obstacle. Elle est donc toujours orientée perpendiculairement à la surface de ce dernier. Aussi, lorsque le robot entre dans la zone dangereuse, il se trouve repoussé jusqu'à l'enveloppe ξ_0 , limite du domaine de définition du potentiel répulsif. La force correspondante tend alors vers zéro, et le

4. Dorénavant, nous désignerons sous le vocable "méthode des potentiels classiques" les méthodes basées sur le potentiel répulsif brut et sur le potentiel pondéré par l'angle IV.2.

robot s'immobilise sur ξ_0 en l'absence de toute force attractive. Le potentiel répulsif classique définit donc seulement une vitesse linéaire permettant de ramener le robot sur l'enveloppe ξ_0 . De ce fait, la présence des deux types de potentiel est requise en phase d'évitement, induisant les problèmes mis en exergue précédemment. C'est pourquoi, nous proposons ici de définir un potentiel répulsif capable de fournir une vitesse linéaire au robot même si celui-ci se trouve au voisinage de l'enveloppe de sécurité ξ_0 . Pour cela, l'idée de base est d'une part d'assurer que la norme de la force répulsive sera non nulle sur cette enveloppe, et d'autre part d'adapter son orientation en fonction de la distance à l'obstacle de telle sorte que le robot puisse suivre ξ_0 sans l'aide d'un potentiel attractif.

Définition du potentiel répulsif rotatif

Dans un premier temps, nous définissons autour de chaque obstacle trois enveloppes (cf. figure IV.6) :

- La première, notée ξ_+ , située à une distance d_+ , caractérise la zone à partir de laquelle l'obstacle est détecté par le laser SICK 2D et dans laquelle le potentiel répulsif est actif.
- La deuxième, ξ_0 , se trouve à une distance $d_0 < d_+$ et représente l'enveloppe de sécurité sur laquelle on souhaite asservir le robot.
- Enfin, la troisième, ξ_- , située à une distance $d_- < d_0$, définit la région où l'obstacle doit être considéré comme réellement dangereux pour le véhicule.

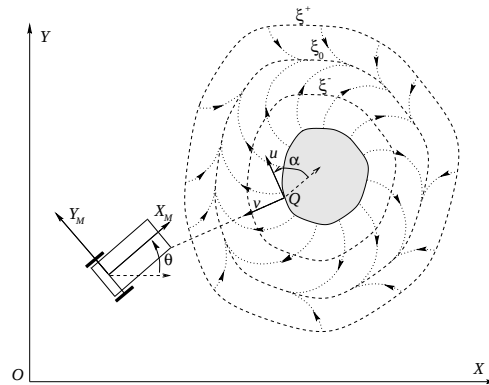


FIG. IV.6 – *Evitement d'obstacle avec un potentiel répulsif rotatif*

Quand le robot pénètre dans la zone définie par l'enveloppe ξ_+ , le laser SICK fournit la distance d entre le robot et l'obstacle, ainsi que l'orientation α entre

la tangente à l'obstacle et la direction du véhicule. Nous noterons Q le point de l'obstacle le plus proche du robot, et u un vecteur unitaire tangent à l'obstacle en Q .

Remarque 9 *La direction du robot et la tangente à l'obstacle définissent en fait deux angles. En considérant que $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$ nous définissons une tangente orientée unique u qui détermine le sens de contournement et donc le sens de rotation du champ. Cette stratégie nous permet d'adapter notre sens de contournement de telle sorte que la courbure de la trajectoire d'entrée du robot dans l'enveloppe ξ_0 ne change pas de signe. Dans le cas où le robot se présente perpendiculairement à l'obstacle, nous choisissons arbitrairement un sens de contournement.*

D'autre part, afin que le problème soit bien posé, nous supposons que :

- La distance entre deux obstacles reste supérieure à $2d_+$ afin de permettre au robot de circuler entre plusieurs obstacles et éviter les détections multiples.
- La distance finale entre la base portant le capteur laser et la cible est supérieure à la distance de sécurité d_0 pour que le robot ne confonde pas la cible avec un obstacle.

Notre objectif étant de déterminer un potentiel répulsif permettant à la base mobile de contourner un obstacle *sans l'aide d'un quelconque potentiel attractif*, nous nous proposons de définir la force répulsive de telle sorte que le robot puisse suivre l'enveloppe de sécurité ξ_0 . Cela requiert d'une part que cette force soit non nulle sur cette enveloppe, et d'autre part qu'elle lui soit tangente. Nous définirons donc l'orientation de la force répulsive de telle sorte qu'elle soit (cf. figure IV.6) :

- perpendiculaire à la surface de l'obstacle, lorsque le robot en est très proche,
- tangente à l'obstacle, lorsque le robot se trouve sur l'enveloppe ξ_0 ,
- légèrement orientée vers l'obstacle, lorsque le robot se trouve entre les enveloppes ξ_0 et ξ_+ .

Afin de définir une telle force, nous considérons la fonction de potentiel suivante :

$$\begin{cases} U(d) = \frac{1}{2}k_1(\frac{1}{d} - \frac{1}{d^+})^2 + \frac{1}{2}k_2(d - d^+)^2 & \text{si } d \leq d^+ \\ U(d) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

où k_1 and k_2 sont des gains positifs à fixer. Le premier terme de U est prépondérant près de la surface de l'obstacle et tend vers l'infini pour garantir la non collision.

Par contre, le deuxième terme domine au voisinage de ξ_+ , et permet de conserver une valeur suffisamment importante au potentiel pour pouvoir commander le robot. La fonction de potentiel IV.7 est définie dans toute la région délimitée par ξ_+ , et plus particulièrement au voisinage de l'enveloppe ξ_0 . Elle garantit donc l'existence d'une force non nulle sur cette enveloppe, ce qui assure une vitesse linéaire de contournement pour le robot. Il reste maintenant à déterminer cette force. Dans la méthode des potentiels classiques, elle se déduit directement du gradient de la fonction de potentiel par rapport à l'état du robot. Ici, afin de remplir les objectifs précédents, nous définissons séparément le module et l'orientation de cette force, notés respectivement F et β :

- Le module, qui caractérise l'amplitude de la force répulsive, sera donné par la dérivée de U par rapport à d , soit :

$$F = -\frac{\partial U}{\partial d} \quad (\text{IV.8})$$

Ainsi, plus le véhicule sera proche de l'obstacle, plus l'intensité de la force répulsive sera importante, et inversement.

- L'orientation, exprimée par rapport au repère lié au robot, sera définie comme une fonction linéaire de la distance à l'obstacle de manière à satisfaire les conditions précédentes :

$$\beta = \alpha - \frac{\pi}{2d_0}d + \frac{\pi}{2} \quad (\text{IV.9})$$

Ainsi, près de l'obstacle, la distance d est faible et l'angle β tend vers $\alpha + \pi/2$. La force répulsive est alors normale à l'obstacle et le robot est repoussé perpendiculairement vers l'enveloppe ξ_- . Cette propriété permet de garantir la non collision si la distance d_- est choisie de telle sorte que le robot ait le temps de s'arrêter lorsqu'il entre perpendiculairement dans l'enveloppe ξ_- à vitesse maximale.

De même, sur l'enveloppe ξ_0 , $d = d_0$ et $\beta = \alpha$. Le robot est donc soumis à une force tangente non nulle. Celle-ci définit une vitesse linéaire lui permettant de suivre l'enveloppe de sécurité. Si maintenant le robot s'écarte de cette enveloppe et pénètre dans le couloir délimité par ξ_0 et ξ_+ , la distance d devient supérieure à d_0 , et de ce fait l'angle β diminue. La force est alors dirigée vers l'obstacle et ramène le véhicule sur ξ_0 . De la même manière, s'il revient vers l'enveloppe ξ_- , β augmente et la force s'oriente de manière à le repousser vers l'enveloppe de sécurité.

Finalement, nous déduisons des équations IV.8 et IV.9 les vitesses linéaires et angulaires du robot en nous appuyant, comme dans la méthode des potentiels

classiques, sur les travaux de M. Khatib [Khatib 96].

$$v = k_v F \cos \beta \quad (\text{IV.10})$$

$$\omega = \frac{k_\omega}{D_x} F \sin \beta \quad (\text{IV.11})$$

où k_v et k_ω sont des gains positifs à choisir, D_x permettant de prendre en compte le bras de levier défini par la distance entre le point de référence du robot et le centre de rotation de la platine.

Ce potentiel permet en quelque sorte de définir un suivi de chemin puisqu'il fournit au robot des vitesses linéaire et angulaire lui permettant de s'asservir sur une enveloppe de référence. Grâce à cette vitesse linéaire, le robot peut contourner les obstacles sans l'aide d'une force attractive, et, de ce fait, les problèmes de minima locaux inhérents à la méthode des potentiels classiques ne peuvent plus se produire. Il sera donc possible de considérer l'évitement d'obstacles concaves. Notons cependant que, si leur concavité est trop profonde, la distance mesurée par le laser ne sera plus définie de manière unique. Un problème analogue se pose dans le cas du suivi de chemin : lorsque la concavité devient trop importante, la projection orthogonale du repère lié au robot sur le chemin de référence n'est plus unique. De tels obstacles ne pourront donc être évités avec notre méthode.

Néanmoins, les équations IV.10 et IV.11 définissent seulement les vitesses linéaire et angulaire de la base mobile. L'utilisation seule de cette technique ne permet donc pas de contrôler la platine, et, de ce fait, la cible peut être perdue pendant la phase d'évitement. Afin d'éviter ce phénomène, nous proposons de commander la platine de manière à compenser le mouvement de contournement de la base.

Commande de la platine

Nous nous appuyons ici sur les travaux développés par D.P. Tsakiris. Il considère une base mobile munie d'une caméra montée sur une platine [Tsakiris *et al.* 96] [Tsakiris *et al.* 97a] ou un bras manipulateur plan [Tsakiris *et al.* 97b]. Il s'intéresse au problème de la stabilisation dans une configuration fixe d'un tel véhicule. Or, les lois de commande permettant de réaliser une telle tâche sont de type retour d'état, et nécessitent une estimation de ce dernier. Celle-ci peut être effectuée sur la base d'informations proprioceptives ou extéroceptives. Dans ces travaux, l'état sera reconstruit à partir des indices visuels fournis par la caméra et caractérisant une cible fixe connue. La structure de commande envisagée requiert donc la conservation de ces indices dans le champ de vision de la caméra. C'est pourquoi, Tsakiris propose une technique permettant de stabiliser la base dans une configuration désirée, tandis que la platine (respectivement, le bras) est commandée

de manière à réaliser une tâche référencée vision garantissant le suivi de la cible⁵. La méthode développée repose sur la désolidarisation de la plateforme mobile et de la platine (respectivement, du bras). Ainsi, pendant la phase de transition où le robot cherche à atteindre sa configuration finale, la platine (respectivement, le bras) est commandée indépendamment de la base de telle sorte que les indices visuels ne soient jamais perdus. Nous avons adapté cette technique à notre cas pour garantir la conservation en vue de la cible pendant l'évitement.

La cible considérée étant composée de quatre points, le vecteur des informations visuelles s comprend les coordonnées de ces points projetés dans le plan image (X_i, Y_i) (cf. chapitre II). Pendant l'évitement d'obstacle, si le mouvement de la base n'est pas compensé, l'erreur $e = C(s - s^*)$ que nous avons définie au chapitre II va brutalement augmenter. Comme la caméra est contrainte à se déplacer dans un plan horizontal, cette erreur se traduit par un déplacement latéral des indices visuels dans l'image, et affectera donc principalement les ordonnées Y_i des points projetés. Pour cette raison, nous considérons que la tâche référencée vision à réaliser en phase d'évitement est de réguler à zéro, non plus la fonction de tâche initiale e , mais une nouvelle fonction de tâche $\tilde{e}$, dépendant des ordonnées Y_i et de leur consigne Y_i^* . De plus, comme nous ne disposons que d'une seule commande pour déplacer la caméra indépendamment de la base, nous considérerons uniquement une erreur scalaire afin de satisfaire la propriété de ρ -admissibilité. Nous définissons donc $\tilde{e}$ comme l'écart $Y_i - Y_i^*$, l'indice i désignant l'un quelconque des quatre points de la cible. Le suivi de cette dernière en phase d'évitement est alors étroitement lié à la régulation de cette erreur à zéro. Nous imposons la dynamique suivante :

$$\dot{\tilde{e}} = -\lambda \tilde{e} \quad \lambda > 0 \quad (\text{IV.12})$$

Il reste maintenant à déterminer la commande de la platine permettant de satisfaire la dynamique IV.12. Dans ce but, nous partitionnons la jacobienne du robot de manière à séparer les termes relatifs à la base notés J_{base} de ceux relatifs à la platine notés J_{pl} . Notons que cette idée de partitionner la jacobienne en colonnes a déjà été utilisée dans le cas de robots manipulateurs redondants [De Luca & Oriolo 90] [De Luca & Oriolo 94b]. Nous obtenons le résultat suivant [Tsakiris *et al.* 96] :

5. Cette tâche référencée vision pourra définir une liaison virtuelle d'autant plus contraignante que le nombre de degrés de liberté introduit par le bras sera important. Si bien que s'ils sont en nombre suffisant, il sera possible de réaliser simultanément la stabilisation de la base et celle de la caméra [Tsakiris *et al.* 97b].

$$T_{\text{red}} = [J_{\text{base}} J_{\text{pl}}] \begin{pmatrix} \dot{q}_{\text{base}} \\ \dot{q}_{\text{pl}} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

où $\dot{q}_{\text{base}}$ est connue puisqu'elle représente les vitesses linéaire et angulaire de la base mobile définies respectivement par les équations IV.10 et IV.11. $\dot{q}_{\text{pl}}$ désigne la vitesse angulaire de la platine à déterminer. En considérant les équations IV.12 et IV.13, nous déduisons :

$$L_{\text{red}}^i J_{\text{base}} \dot{q}_{\text{base}} + L_{\text{red}}^i J_{\text{pl}} \dot{q}_{\text{pl}} = -\lambda \tilde{e} \quad (\text{IV.14})$$

où L_{red}^i désigne la $2i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice d'interaction réduite L_{platine} . A partir de cette relation, nous pouvons déduire l'expression de $\dot{q}_{\text{pl}}$ permettant de compenser le mouvement de la base :

$$\dot{q}_{\text{pl}} = \frac{-1}{L_{\text{red}}^i J_{\text{pl}}} (\lambda \tilde{e} + L_{\text{red}}^i J_{\text{base}} \dot{q}_{\text{base}}) \quad (\text{IV.15})$$

La commande de la platine intègre l'erreur de tracking et les vitesses de la base déterminées par la méthode du potentiel rotatif. Le premier terme garantit le suivi de la cible, tandis que le deuxième compense le mouvement de contournement du robot. La commande IV.15 permet donc de conserver le potentiel attractif (dans notre cas, l'asservissement visuel), sans qu'il induise un mouvement sur la base. Les effets attractif et répulsif peuvent ainsi être séparés sans que l'exécution de la tâche robotique soit remise en cause.

Remarque 10 *Le terme $L_{\text{red}}^i J_{\text{pl}}$ étant un scalaire du fait de la définition de $\tilde{e}$, la commande $\dot{q}_{\text{pl}}$ peut être déterminée de manière unique et exacte. La propriété de ρ -admissibilité est donc satisfaite ici (hors singularité).*

Remarque 11 *Le potentiel défini au paragraphe précédent par l'équation IV.2 consiste à introduire l'orientation relative du robot par rapport à l'obstacle dans la fonction de potentiel. Cette définition permet de moduler l'amplitude de la force répulsive en fonction de la configuration du véhicule par rapport à l'obstacle, et donc de ne repousser le robot que si c'est absolument nécessaire. Cependant, il est toujours nécessaire dans cette méthode de considérer une combinaison des deux types de potentiel en phase d'évitement, ce dont nous nous sommes affranchis ici.*

Stratégie de commande et évolution de μ

Nous combinons la commande référencée vision déterminée au chapitre II avec l'évitement d'obstacle précédent sur la base de l'équation IV.1. Chacune des lois

définissant les trois commandes du robot, les dimensions des vecteurs $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ sont compatibles, et la fusion proposée dans la relation IV.1 est valide.

Notre stratégie est organisée en trois phases distinctes dépendant de la distance d entre le robot et l'obstacle. Le basculement d'une phase vers une autre repose sur la définition du paramètre μ (cf. équation IV.1).

1. Si $d > d_0$, le robot est hors de la zone dangereuse, et μ est fixé à 0. Le véhicule n'est piloté que par la commande référencée vision.
2. Si $d \in [d_-, d_0]$, le robot mobile pénètre dans la région définie par ξ_0 , et μ augmente progressivement. Le véhicule est alors commandé par une combinaison linéaire de l'asservissement visuel et de la loi d'évitement. Si l'action de la force répulsive s'avère suffisante, le robot peut naturellement quitter la zone dangereuse et, dans ce cas, μ revient à 0 sans avoir atteint la valeur 1.
3. Si $d < d_-$, le robot a franchi l'enveloppe ξ_- et se trouve dans une zone où le risque de collision est élevé. μ est fixé à 1 et maintenu à cette valeur jusqu'à ce que l'obstacle ne présente plus de danger pour le robot. Pendant cette phase, le véhicule n'est commandé que par la méthode des potentiels, la platine compensant le mouvement de contournement de la base. Les indices visuels ne peuvent donc être perdus. Le robot est ramené au voisinage de l'enveloppe de sécurité ξ_0 , voisinage qu'il ne quittera que lorsque la condition de sortie sera remplie. Celle-ci est satisfaite dès que la direction de la base et celle de la platine sont parallèles à l'obstacle, ce qui se traduit mathématiquement par l'annulation simultanée des deux angles α et θ_{pl} . A cet instant, un "flag" S , indiquant que la condition de sortie a été vérifiée, est positionné à 1, et μ diminue alors progressivement vers 0. Il est définitivement fixé à cette valeur lorsque le robot franchit l'enveloppe ξ_+ . Tous les "flags" sont alors remis à zéro.

Remarque 12 μ augmente uniquement lorsque le robot pénètre dans la région définie par ξ_0 , bien que le potentiel répulsif soit défini dès l'enveloppe ξ_+ . Donc, initialement, la force répulsive n'agit sur le véhicule que lorsque la distance devient inférieure à d_0 , de telle sorte que la trajectoire du robot ne soit modifiée que lorsque l'obstacle devient vraiment gênant.

Le basculement entre chaque phase est donc géré par le paramètre μ que nous définissons comme suit ⁶ :

6. Cette évolution de μ garantit la continuité de la loi de commande IV.1

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mu = 0 & \text{si } d \geq d_0 \text{ et } E = 0 \\ \mu = \frac{d-d_0}{d_- - d_0} & \text{si } d \in [d_-, d_0] \text{ et } E = 0 \\ \mu = \frac{d-d_+}{d_s - d_+} & \text{si } d \in [d_s, d_+] \text{ et } S = 1 \\ \mu = 1 & \text{sinon} \end{array} \right. \quad (\text{IV.16})$$

où d_s est la distance séparant le robot de l'obstacle quand la condition de sortie intervient, E étant un "flag" positionné à 1 lorsque le véhicule franchit l'enveloppe ξ_- . L'introduction de la distance d_s garantit la continuité de l'évolution de μ au moment où le robot est autorisé à quitter l'enveloppe de sécurité. Le "flag", quant à lui, permet de maintenir μ à la valeur 1 tant que la condition de sortie n'est pas vérifiée.

Faisabilité de la tâche

La faisabilité de la tâche dépend de la stabilité de l'équilibre lorsque le robot est commandé par la loi IV.1, de la qualité du suivi de la cible en phase d'évitement, et enfin de la garantie de non collision et de non saturation des actionneurs.

La stabilité du point d'équilibre $s = s^*$ peut être établie sur la base des propriétés de stabilité de l'asservissement visuel et de l'évitement, dans la mesure où le couloir délimité par les deux enveloppes ξ_0 et ξ_- est étroit et où μ est maintenu à 1 pendant toute la phase d'évitement. Comme chacun des correcteurs stabilise séparément le système et que la condition de sortie garantit que le robot ne restera pas bloqué sur l'enveloppe de sécurité pendant la phase d'évitement, on peut conclure à la stabilité de l'équilibre.

D'autre part, la conservation des indices visuels dans le champ de vision de la caméra est garantie en phase d'évitement pur, puisque la platine est alors commandée de manière à compenser le mouvement de contournement de la base mobile. Cependant, lorsque $\mu \in]0, 1[$, le suivi de la cible est perturbé par l'addition des deux lois de commande. Néanmoins, comme la cible est correctement positionnée dans l'image lorsque le robot franchit l'enveloppe ξ_0 et que la largeur du couloir entre ξ_0 et ξ_- est choisie faible, le risque de perdre les indices visuels pendant cette phase est minime.

La non collision quant à elle est liée au choix de la fonction de potentiel U et à la direction de la force. Comme nous l'avons mentionné précédemment, si la distance d_- est choisie de manière à ce que le robot ait le temps de s'arrêter lorsqu'il arrive perpendiculairement sur l'obstacle à vitesse maximale, les problèmes de collision pourront être limités. Pour garantir théoriquement la non collision, il faudrait définir l'orientation de la force répulsive de telle manière que les lignes de champ restent perpendiculaires à la surface de l'obstacle dans toute la région

délimitée par ξ_- .

Enfin, comme dans la méthode des potentiels classiques développée dans le paragraphe précédent, la saturation des actionneurs n'est pas considérée directement dans la synthèse de la commande, et est réalisée a posteriori sur la base des travaux de M. Khatib [Khatib 96].

Résultats de simulation

L'objectif de la tâche robotique envisagée est de positionner la caméra face à une cible en environnement encombré. Les configurations du robot et des obstacles ont été choisies de telle manière que le véhicule ne puisse converger directement vers la cible. Les distances d_+ , d_0 , et d_- ont été respectivement fixées à 1, 0.7, et 0.5 mètre. Les gains de la loi de commande d'évitement k_v et k_w ont été pris égaux à 1.

Pour démontrer l'intérêt de notre approche, nous avons considéré l'évitement d'obstacles convexes et concaves. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures IV.7 et IV.8 pour les convexes, IV.9 et IV.10 pour les concaves. Elles représentent pour chaque type d'obstacle la trajectoire du robot en 2D et 3D⁷, ainsi que l'évolution correspondante des indices visuels dans l'image.

L'exécution de la tâche robotique se déroule en plusieurs phases. Initialement, le robot se trouve hors de la zone dangereuse définie par l'enveloppe ξ_0 . μ est alors fixé à 0 et le véhicule est uniquement guidé par l'asservissement visuel (cf. equation IV.1). Il converge vers la cible sans prendre en compte l'obstacle.

Le robot pénètre ensuite dans la région délimitée par ξ_0 . μ augmente alors progressivement et atteint la valeur 1 lorsque le véhicule franchit l'enveloppe ξ_- . A cet instant, la base et la platine sont commandées indépendamment, la première pour éviter l'obstacle et la deuxième pour compenser ce mouvement de contournement. Le robot s'écarte de l'obstacle, sans que les indices visuels soient perdus.

Enfin, lorsque la condition de sortie est vérifiée, le robot est autorisé à quitter l'enveloppe de sécurité. μ diminue progressivement jusqu'à s'annuler sur ξ_+ . Le robot n'est alors plus piloté que par l'asservissement visuel et continue de converger vers la cible, à moins qu'un autre obstacle ne soit détecté comme sur les figures IV.7 et IV.8.

7. Les simulations en 3D ont été réalisées à l'aide du logiciel *GDHE* développé au sein du groupe RIA par M. Herrb. Ce logiciel permet de visualiser la trajectoire de l'un des robots mobiles du LAAS, *H2Bis*. Bien que ce robot soit muni d'un bras manipulateur à six degrés de liberté, nous ne commandons ici que la première liaison, nous ramenant au cas de la platine simple.

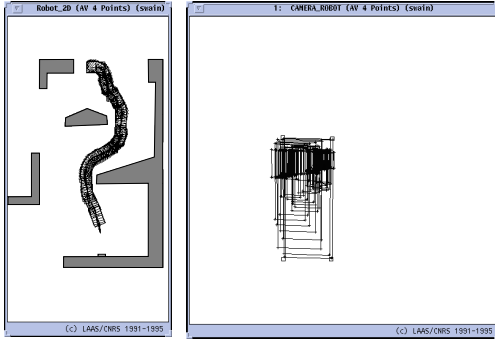


FIG. IV.7 – Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles convexes - Evolution des indices visuels

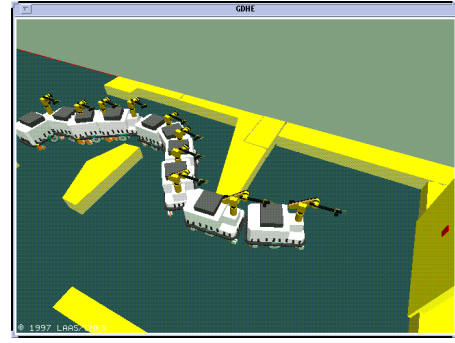


FIG. IV.8 – Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles convexes : Vue 3D

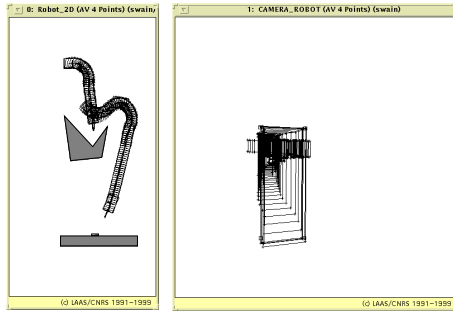


FIG. IV.9 – Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles concaves - Evolution des indices visuels

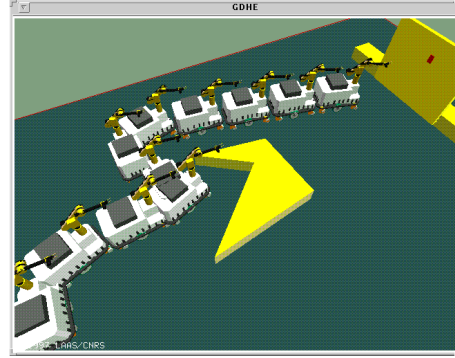


FIG. IV.10 – Exécution d'une tâche référencée vision en présence d'obstacles concaves : Vue 3D

Nous avons présenté ici une méthode permettant à un robot mobile non redondant de réaliser une tâche référencée multi-capteurs. Elle est basée sur la fusion des informations visuelles et proximétriques au niveau de la commande. Elle tire son originalité de la définition d'un potentiel répulsif permettant à un véhicule de contourner un obstacle sans l'aide d'une force attractive, et s'appuie sur la commande séparée de la base mobile et de la platine pour garantir la conservation de la cible dans le champ de vision de la caméra pendant toute l'exécution de la tâche. De cette manière, les problèmes inhérents à la présence de deux commandes à vocation contradictoire en phase d'évitement sont supprimés. Il est ainsi possible de considérer des obstacles convexes et concaves, dans la mesure où la concavité n'est pas trop profonde. En outre, pour la même raison, la convergence du système rebouclé et la faisabilité de la tâche sont plus faciles à établir. Cette

technique, développée dans [Cadenat *et al.* 99b], permet donc de répondre aux limitations de la méthode précédente [Swain *et al.* 99] basée sur le formalisme des potentiels classiques.

IV.2.2.3 Méthode basée sur le suivi de chemin

Nous présentons dans ce dernier paragraphe une loi de commande permettant de contourner l'obstacle en suivant l'enveloppe de sécurité ξ_0 (cf. figure IV.11) [Cadenat *et al.* 99a].

Hypothèses de base

Nous définissons autour de l'obstacle une enveloppe supplémentaire notée ξ_1 située à une distance $d_1 > d_0$. Elle délimite la région à l'intérieur de laquelle les obstacles sont détectés par le laser. Donc, pour permettre au robot de circuler entre plusieurs obstacles et éviter les détections multiples sources d'erreurs, nous supposons que la distance entre deux obstacles reste toujours strictement supérieure à $2d_1$. En outre, afin d'éviter que la cible soit confondue avec un obstacle, nous supposons que la distance finale entre la base qui porte le laser et la cible est strictement supérieure à la distance de contournement d_0 . Enfin, le laser fournissant la distance et l'orientation relative entre le robot et l'obstacle, nous faisons l'hypothèse de l'existence d'un module fonctionnel permettant de fournir une valeur estimée de la courbure de l'obstacle à chaque instant.

Formalisme du suivi de chemin

Nous rappelons très brièvement ici le formalisme du suivi de chemin [Samson 92] que nous avons déjà introduit dans le chapitre III. Le problème du suivi de che-

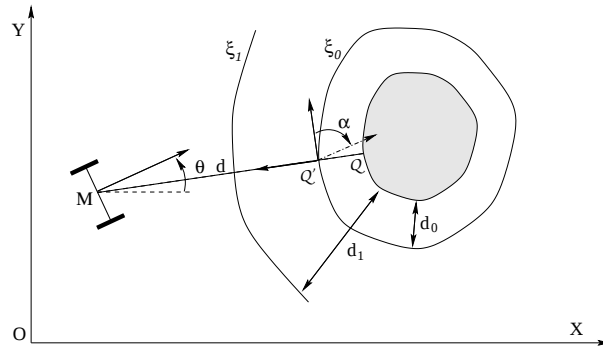


FIG. IV.11 – *Evitement d'obstacle par suivi de chemin*

min - particularisé au cas de l'évitement d'obstacle - est représenté sur la figure

IV.11. M désigne le point de référence du robot mobile. Le formalisme développé dans [Samson 92] consiste à projeter orthogonalement le repère lié au robot d'origine M sur l'enveloppe ξ_0 , de manière à définir un repère de Frenet d'origine Q' . De même, nous pouvons définir le point Q , projection orthogonale de M sur la surface de l'obstacle. Ces deux points existent et sont uniques si la distance entre le robot et l'enveloppe reste suffisamment faible (la condition mathématique correspondante est rappelée dans le chapitre III). La distance d et l'angle α , mesurés par le laser, s'expriment dans ce repère de Frenet, et représentent respectivement la distance *signée* entre Q et M , et l'angle entre la tangente à l'obstacle en Q' et la direction du robot. Le sens de contournement est défini comme précédemment par la remarque 9.

Nous considérons maintenant l'erreur de positionnement latéral du robot $\delta = d - d_0$ ainsi que l'erreur d'orientation α . La dynamique de ces deux grandeurs par rapport au repère de Frenet précédemment défini s'exprime comme suit [Canudas de Wit *et al.* 94] :

$$\begin{cases} \dot{\delta} = v \sin \alpha \\ \dot{\alpha} = \omega - v \bar{\chi} \cos \alpha \end{cases} \quad \text{avec} \quad \bar{\chi} = \frac{\chi}{1 + \sigma \chi d} \quad (\text{IV.17})$$

où $\chi = \frac{\sigma}{R}$ représente la courbure de l'obstacle, R désignant son rayon de courbure et $\sigma = \{-1, 0, 1\}$ selon le sens de contournement (cf. remarque 9) : σ vaut 1 si le robot tourne autour de l'obstacle dans le sens trigonométrique, -1 s'il tourne en sens inverse, et 0 si le contour de l'obstacle est localement une ligne droite. $\bar{\chi}$ correspond à la courbure d'une enveloppe qui passerait par le point représentatif M du robot.

Dans le formalisme du suivi de chemin [Samson 92], l'objectif est d'assurer la convergence *géométrique* du point de référence M de la base mobile vers le chemin à suivre *indépendamment de la vitesse linéaire du véhicule*. En d'autres termes, le problème du suivi de chemin consiste à déterminer une loi de commande ω permettant de stabiliser la dynamique de l'erreur à zéro, la vitesse linéaire du robot étant donnée. Nous n'avons donc à notre disposition qu'une seule variable de commande : la vitesse angulaire de la base mobile.

Dans notre cas, la vitesse linéaire du robot sera conservée constante pendant toute la phase d'évitement : en fait, elle sera fixée à la valeur v_0 qu'elle avait lorsque le robot est entré dans l'enveloppe ξ_0 afin d'assurer la continuité de son évolution. Nous proposons le correcteur suivant pour stabiliser le système IV.17 en $(0, 0)$:

$$\omega = -v (k\delta + \alpha + 2k \sin \alpha - \bar{\chi} \cos \alpha) \quad (\text{IV.18})$$

où k est un gain positif à choisir, v étant fixée à v_0 . Nous reviendrons sur le choix de k dans les paragraphes qui suivent.

Afin de démontrer la stabilité de ce correcteur, nous définissons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2}(\delta + \frac{\alpha}{k})^2 + \frac{1}{2}\delta^2 \quad (\text{IV.19})$$

En dérivant la fonction de Lyapunov précédente et en injectant l'expression de ω définie par l'équation IV.18 dans le calcul de $\dot{V}$, nous obtenons :

$$\dot{V} = -\frac{v}{k}\alpha \sin \alpha - (\delta + \frac{\alpha}{k})^2 v \quad (\text{IV.20})$$

Comme $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$ (cf. remarque 9), α et $\sin \alpha$ restent de même signe sur cet intervalle, et le produit $\alpha \sin \alpha$ est donc positif. De plus, la vitesse linéaire v reste toujours positive puisque le robot ne peut que s'avancer vers la cible pour satisfaire la liaison virtuelle imposée par la tâche référencée vision. Donc la fonction IV.20 est définie négative, assurant la stabilité du système IV.17 rebouclé par la loi IV.18, avec v constante et fixée à la valeur $v_0 > 0$.

Le choix du gain k est critique pour les performances du système bouclé. En effet, d'une part, une valeur de k trop importante peut conduire à la saturation des actionneurs, le véhicule tentant de tourner très vite sur place, d'autre part, une valeur de k trop faible accroît le risque de collision, le robot ne pivotant plus assez rapidement pour s'asservir sur l'enveloppe de sécurité. Pour répondre à ce problème, nous établissons à partir de la fonction de Lyapunov IV.19 deux conditions suffisantes permettant de choisir ce gain de telle sorte que la non collision et la non saturation des actionneurs soient garanties.

- Non collision

Si à $t = t_0$, le robot arrive sur l'enveloppe ξ_0 , une condition suffisante permettant de garantir la non collision est que :

$$V(t_0) \leq \frac{1}{2} d_0^2 \quad (\text{IV.21})$$

En effet, comme V est une fonction strictement décroissante du temps, la relation précédente sera vérifiée $\forall t \geq t_0$, ce qui s'écrit en remplaçant $V(t)$ par son expression :

$$(\delta + \frac{\alpha}{k})^2 + \delta^2 \leq d_0^2 \quad (\text{IV.22})$$

Cette dernière relation nous assure donc que $|\delta|$ reste inférieure à d_0 .

D'autre part, en $t = t_0$, le robot se trouve sur l'enveloppe ξ_0 , donc $\delta(t_0) = 0$. En injectant ce résultat dans la relation IV.21, nous déduisons la borne minimale de k permettant de garantir la non collision avec l'obstacle.

$$k \geq \frac{|\alpha(t_0)|}{d_0} \quad (\text{IV.23})$$

- Non saturation des actionneurs

Considérons maintenant la loi de commande IV.18 et notons Ω une borne supérieure de la vitesse angulaire du robot ω . En majorant l'équation IV.18, nous obtenons :

$$|\omega| \leq vk(|\delta + \frac{\alpha}{k}| + 2) + v|\bar{\chi}| \quad (\text{IV.24})$$

D'autre part, la relation IV.22 montre que $|\delta + \frac{\alpha}{k}| \leq d_0$. Ce résultat nous permet encore de majorer l'équation IV.24, et nous déduisons la borne maximale suivante pour le gain k :

$$k \leq \frac{\frac{\Omega}{v} - |\chi_{\max}|}{d_0 + 2} \quad (\text{IV.25})$$

où $\chi_{\max}$ représente la courbure maximale de l'obstacle.

Remarque 13 *L'équation IV.25 montre que la borne supérieure du gain dépend de la courbure maximale de l'obstacle. Cela implique donc que la définition de k suppose une connaissance a priori de la forme locale des obstacles (polyèdres, quadriques, ...)*

Nous avons déterminé des bornes supérieure et inférieure permettant de guider le choix du gain k . Cependant, pour que les deux conditions suffisantes soient compatibles, c'est-à-dire pour que k puisse les vérifier simultanément, il faut que le rapport $\frac{\Omega}{v}$ soit suffisamment faible, autrement dit il faut que la vitesse linéaire du robot reste faible devant Ω . Ce résultat correspond à un phénomène bien connu des automobilistes : plus le virage à négocier est serré, plus le conducteur doit ralentir afin de tourner dans les meilleures conditions. C'est pourquoi, notre stratégie de commande intégrera une réduction de la vitesse linéaire vers une valeur de sécurité⁸ dès que le robot pénétrera dans la région définie par l'enveloppe ξ_1 .

8. Nous entendons par valeur de sécurité une vitesse suffisamment faible pour garantir que les deux conditions suffisantes seront compatibles.

Nous avons présenté succinctement le formalisme du suivi de chemin développé dans [Samson 92]. Nous avons synthétisé un correcteur permettant à la base mobile de suivre l'enveloppe de sécurité ξ_0 , et dégagé des conditions suffisantes garantissant la non collision et la non saturation des actionneurs. Ce correcteur définit un retour d'état par rapport au système IV.17, mais un retour de sortie par rapport au robot puisqu'il ne fait intervenir que des données mesurées ou estimées à partir des mesures.

Le formalisme du suivi de chemin ne permet de piloter que la base mobile. La platine n'est donc pas commandée pendant la phase d'évitement, ce qui induit au mieux une altération de l'évolution des indices visuels, au pire la perte de la cible et l'échec de la tâche. C'est pourquoi, tout comme pour la méthode des potentiels rotatifs, nous commanderons indépendamment la platine de telle sorte qu'elle compense le mouvement de la base. Pour cela, nous reprenons la méthode développée dans la section IV.2.2.2, et obtenons une loi de commande strictement identique à celle donnée par l'équation IV.15⁹. Nous ne revenons donc pas sur ce résultat.

Stratégie de commande et évolution de μ

La stratégie de commande repose sur l'équation IV.1 que nous avons présentée dans le paragraphe IV.2.1. Le correcteur $\dot{q}_{AV}$ ayant déjà été déterminé au chapitre II (cf. équation II.48), nous nous sommes attachés dans le paragraphe précédent à synthétiser le correcteur $\dot{q}_{EV}$ en nous appuyant sur le formalisme du suivi de chemin. Ce correcteur définit les vitesses linéaire et angulaire de la base de telle sorte qu'elle évite l'obstacle en suivant ξ_0 , et commande la platine de manière à compenser le mouvement de contournement. Donc, tout comme l'asservissement visuel, il fixe les trois commandes du robot. La fusion proposée à l'équation IV.1 est valide.

Afin de déterminer complètement la loi de commande IV.1, il reste encore à définir l'évolution de μ . Ce paramètre régit le basculement d'un correcteur vers l'autre en fonction de la distance à l'obstacle. C'est dire son importance pour le comportement du robot.

D'après l'équation IV.1, μ doit être fixé à 0 lorsque le robot se trouve loin de l'obstacle. De la même manière, lorsque le véhicule entre dans la zone dangereuse définie par ξ_0 , μ passe de 0 à 1 et est maintenu à cette valeur jusqu'à ce que l'obstacle ne présente plus de danger pour le robot. Cette condition est remplie lorsque les directions de mouvement données par l'asservissement visuel et l'évi-

9. Bien évidemment, ici, la commande de la base sera donnée par le formalisme du suivi de chemin et non plus par la méthode des potentiels rotatifs comme dans l'équation IV.15.

tement deviennent compatibles. Cela se traduit par l'annulation de l'angle θ_{pl} qui représente en fait l'orientation de la platine par rapport au repère lié au robot (cf. chapitre II). Cette condition de sortie est donc *bloquante* : tant qu'elle n'est pas satisfaite, le robot ne peut quitter l'enveloppe puisqu'il reste commandé par la loi de suivi de chemin IV.18.

Cependant, une telle évolution de μ introduit une discontinuité dans la loi de commande proposée. Aussi, afin de lisser cette discontinuité, nous définissons deux nouvelles enveloppes autour de ξ_0 , notées ξ_+ et ξ_- , situées respectivement à une distance $d_+ = d_0 + \varepsilon$ et $d_- = d_0 - \varepsilon$ de l'obstacle (voir figure IV.12). Lorsque le robot se trouve dans la région comprise entre ces deux enveloppes, μ varie linéairement entre 0 et 1.

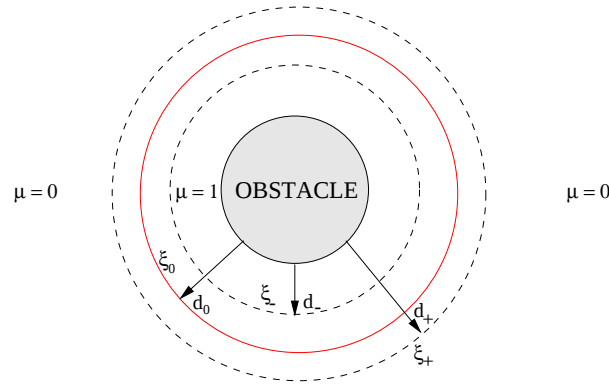


FIG. IV.12 – *Stratégie de contournement*

Nous proposons donc l'évolution suivante pour μ :

$$\begin{cases} \mu = 0 & \text{if } |d| \geq d_0 + \varepsilon \\ \mu = \frac{|d| - d_0 - \varepsilon}{2\varepsilon} & \text{si } d_0 - \varepsilon \leq |d| \leq d_0 + \varepsilon \text{ et } \theta_{pl} \neq 0 \\ \mu = \frac{|d| - d_0 - \varepsilon}{d_s - d_0 - \varepsilon} & \text{si } |d| \leq d_0 + \varepsilon \text{ et } \theta_{pl} = 0 \\ \mu = 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.26})$$

où 2ε est la largeur du couloir défini autour de ξ_0 , et d_s la distance à laquelle se trouve le robot lorsque la condition de sortie intervient. L'introduction de cette distance permet de conserver la continuité de l'évolution de μ au moment où le robot est autorisé à quitter l'enveloppe de sécurité. Enfin, les valeurs absolues permettent de prendre en compte le changement de signe de la distance lorsque le sens de contournement est modifié.

Tant que le robot reste hors de la zone dangereuse des obstacles ($d > d_0 + \varepsilon$), μ reste fixé à 0, et, quand il entre dans le couloir défini par ξ_+ et ξ_- , μ augmente

linéairement. Dans cet intervalle, le robot est commandé par une combinaison linéaire des deux correcteurs $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ (voir l'équation IV.1). Si l'obstacle s'avère en fait peu gênant, le robot peut naturellement¹⁰ quitter la zone de danger sans que μ atteigne la valeur 1. Dans ce cas, les deux correcteurs agissent sur le véhicule, l'un attirant le robot vers l'obstacle, l'autre l'en repoussant, et on peut considérer qu'une tâche globale est réalisée pendant la phase de transition. La structure de commande est donc similaire à celle développée pour les potentiels classiques. Si maintenant le robot pénètre dans ξ_- , μ atteint 1 et conserve cette valeur jusqu'à ce que la condition de sortie soit réalisée. Le robot est alors commandé exclusivement par la loi d'évitement, et la platine tourne pour compenser le mouvement d'évitement de la base. La commande séparée de la platine et la base garantit la conservation en vue de la cible pendant toute la phase de contournement. Quand la condition de sortie est satisfaite, μ diminue linéairement de 1 vers 0, valeur qui est atteinte lorsque le véhicule arrive sur ξ_+ . Le robot n'est plus commandé que par l'asservissement visuel et quitte définitivement la zone dangereuse. Il continue de converger vers la cible, à moins qu'un nouvel obstacle ne soit détecté par le laser.

Faisabilité de la tâche

La faisabilité de la tâche dépend de :

- *la stabilité de la loi* : Chaque correcteur $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ stabilise séparément le système. Comme le couloir n'est pas très large et que μ est maintenu à 1 jusqu'à ce que la condition de sortie soit vérifiée, il est légitime de considérer que le robot n'est commandé par une combinaison linéaire des deux correcteurs que pendant un laps de temps négligeable. Aussi, pouvons-nous déduire directement la stabilité de la loi de commande globale à partir des propriétés de stabilité de chacun d'entre eux. C'était d'ailleurs notre motivation principale pour définir une condition de sortie.
- *la capacité du robot à suivre la cible pendant toute l'exécution de la tâche, plus particulièrement pendant le contournement de l'obstacle* : cette propriété est assurée en phase d'évitement pur grâce à la commande séparée de la base et de la platine. Cependant, lorsque $\mu \in]0, 1[$, le suivi de la cible est perturbée par la composition des deux lois de commande. Néanmoins, comme la durée de variation de μ reste faible, nous pouvons considérer

10. C'est-à-dire que les actions des deux correcteurs vont s'additionner pour "tirer" le robot hors de la zone de danger. Un phénomène similaire se produit dans le cas de la méthode des potentiels classiques.

que les risques de perdre les indices visuels pendant ce laps de temps sont minimales.

- *la garantie de non collision et de non saturation des actionneurs* : celles-ci sont assurées en phase d'évitement pur dans la mesure où la vitesse linéaire du robot sur l'enveloppe ξ_0 est suffisamment faible pour que le gain k de la loi de suivi de chemin IV.18 puisse être choisi de manière à satisfaire simultanément les deux conditions suffisantes IV.23 et IV.25.

Cependant, la loi de commande IV.1 ne garantit en aucune manière une vitesse linéaire adéquate à l'entrée de la zone définie par ξ_0 . De plus, le risque de saturation en début de tâche lorsque l'erreur $e = C(s - s^*)$ est importante n'est pas pris en compte. Aussi, l'exécution de la tâche peut-elle être remise en cause car il n'est pas possible de garantir que les commandes calculées par l'équation IV.1 seront celles effectivement exécutées par le robot. C'est pourquoi, pour répondre à ce problème et assurer la faisabilité réelle de la tâche robotique, nous proposons un algorithme permettant d'éviter la saturation des actionneurs du robot.

Prise en compte de la saturation des actionneurs

La saturation des actionneurs peut se produire soit au début de la tâche référencée vision quand l'erreur $e = C(s - s^*)$ est importante, soit au début de la phase d'évitement quand le robot doit tourner brusquement. Pour répondre à ce problème, nous proposons une méthode garantissant la non saturation des actionneurs pendant ces deux phases critiques. Elle repose sur l'adaptation du gain λ qui fixe la vitesse de la décroissance exponentielle de e vers zéro pendant l'exécution de la tâche (cf. équation II.41). En effet, la loi de commande étant de type proportionnel, ce gain permet de fixer la vitesse de convergence des informations visuelles dans l'image, donc d'agir sur la valeur des commandes. Nous exploitons ici cette propriété pour traiter le problème de la saturation. La question du choix de λ a également été abordée dans d'autres travaux [Bensalah 96] [Huynh 98] [Swain 99].

- Saturation au début de la tâche référencée vision

En début de tâche référencée vision, comme l'erreur e est importante, le gain λ de l'asservissement visuel doit être choisi plutôt faible. Cependant, si un tel gain est conservé constant pendant toute l'exécution de la tâche, le temps de convergence sera élevé. Pour éviter ce problème, nous proposons un algorithme permettant d'accroître λ tout en garantissant la non saturation des actionneurs.

Le principe est le suivant : à chaque pas de la boucle de commande, on augmente λ , on calcule les vitesses correspondantes par la loi de commande II.48, et on vérifie s'il y a saturation ou pas. S'il y a saturation, λ est fixé constant à sa dernière valeur et les vitesses sont recalculées avec ce nouveau gain. La fonction de tâche e ayant diminué du fait de la loi de décroissance choisie, la non saturation est garantie dans la mesure où le gain λ initial ne viole pas les limites physiques des actionneurs.

Cependant, si λ est augmenté directement dès le début de la tâche, les commandes risquent de se trouver très rapidement proches de leur borne maximale. Or, l'objectif de l'asservissement visuel étant de commander le mouvement de la caméra en définissant une liaison virtuelle, les vitesses angulaires de la base et de la platine vont diminuer beaucoup plus rapidement que la vitesse linéaire. Notre idée a été d'exploiter cette double dynamique pour déclencher l'augmentation du gain de manière judicieuse : ainsi attendrons-nous que les vitesses angulaires aient atteint leur régime permanent (c'est-à-dire qu'elles varient très peu) pour commencer à agir sur λ . Nous ne traiterons donc que la saturation de la vitesse linéaire par l'algorithme présenté ci-dessus.

Il nous reste maintenant à définir la loi d'évolution choisie pour λ lorsque les commandes ne saturent pas. Celle-ci doit garantir que ce gain sera faible en début de tâche quand l'erreur e est importante, et augmentera en fin de tâche quand e tend vers zéro. Nous proposons d'intégrer la fonction de tâche e dans la loi d'évolution de λ de la manière suivante :

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i + \frac{k_0 \lambda_0}{1 + \|e\|} \quad (\text{IV.27})$$

où λ_0 , λ_i , et λ_{i+1} représentent respectivement la valeur de λ à l'itération 0, i et $i + 1$ de la boucle de commande, k_0 étant un gain positif à fixer.

L'introduction de λ_0 dans l'équation précédente permet de conserver l'ordre de grandeur du gain λ_i dans la détermination de λ_{i+1} . Le choix de k_0 est alors crucial puisqu'il module l'amplitude de l'augmentation du gain. Ainsi, il ne doit pas être pris trop grand afin d'éviter des accélérations brutales qui violeraient les contraintes physiques du robot; il ne doit pas non plus être choisi trop faible, car, dans ce cas, il ne permettrait pas de réduire significativement le temps de convergence. Ce gain devra être ajusté par réglages successifs.

Remarque 14 *Cette méthode induit cependant des oscillations résiduelles*

autour des valeurs maximales des commandes. En effet, lorsque la saturation se produit, λ est fixé constant, et la vitesse diminue puisque la fonction de tâche décroît. Le gain étant ré-augmenté dès que cela est possible, les vitesses oscillent autour de leur borne maximale tout en y restant inférieures. Heureusement, ces oscillations ne se produisent que lorsque les commandes deviennent proches de leurs valeurs saturées et sont de très faible amplitude. Elles sont donc filtrées par les actionneurs, et ne posent pas de problème majeur.

- Saturation au début de l'évitement

Au début de la phase d'évitement, le robot doit tourner rapidement afin de s'asservir sur l'enveloppe de sécurité ξ_0 . Il y a donc changement de signe de la courbure de sa trajectoire, et par conséquent risque de saturation des vitesses de rotation de la base et la platine.

Le formalisme du suivi de chemin nous a permis d'établir des bornes supérieure et inférieure pour le choix du gain k de la loi d'évitement. Pour que ces bornes soient compatibles, il faut que la vitesse linéaire d'entrée dans la zone v_0 soit suffisamment faible. Notre objectif ici est donc de proposer un algorithme permettant d'atteindre une vitesse de sécurité v_{sec} définie a priori et garantissant que les bornes IV.23 et IV.25 seront compatibles.

La méthode que nous avons développée consiste à freiner dès que l'obstacle est détecté (i.e., dès que l'enveloppe ξ_1 est franchie) de manière à suivre un profil de vitesse permettant d'atteindre l'enveloppe ξ_0 avec la vitesse de sécurité désirée v_{sec} . Celle-ci restera alors constante pendant toute la phase d'évitement. Pour cela, nous définissons le profil de vitesse suivant ¹¹ :

$$v_{profil} = \frac{v_{d_1} - v_{sec}}{d_1 - d_0 - \varepsilon}(|d| - d_1) \quad (IV.28)$$

où v_{profil} est la vitesse de consigne à atteindre lorsque le robot a détecté l'obstacle.

Afin de suivre le profil décrit par l'équation IV.28, nous proposons l'algorithme suivant : l'idée de base est en fait de réduire progressivement la valeur maximale de la vitesse linéaire, puis d'appliquer la technique précédente de telle sorte que la commande suive la consigne spécifiée. Ainsi, à chaque pas de la boucle, nous modifions la borne maximale de la vitesse linéaire à

11. Comme μ commence à varier sur l'enveloppe ξ_+ , nous définissons notre profil non plus sur l'intervalle $[d_0, d_1]$, mais sur l'intervalle $[d_0 + \varepsilon, d_1]$.

l'aide de l'équation IV.28. S'il y a saturation, nous réduisons λ au lieu de le conserver constant, et recalculons la commande. Dans le cas contraire, nous appliquons l'algorithme précédent : λ est alors soit augmenté, soit conservé constant.

La diminution de λ est gérée comme suit :

$$\begin{cases} \lambda_{i+1} = \lambda_i - k_0 \lambda_0 & \text{si } \lambda_{i+1} > \lambda_{min} > 0 \\ \lambda_{i+1} = \lambda_{min} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.29})$$

où λ_{min} est une valeur minimale choisie pour λ . La définition d'une borne inférieure strictement positive garantit que, pendant le suivi de profil, λ ne pourra jamais s'annuler ou devenir négatif. La stabilité de la commande référencée vision est donc assurée. Notons que, comme le gain varie en fonction du temps, la décroissance n'est plus exponentielle. En effet, la fonction de tâche e variant selon l'équation $\dot{e} = -\lambda e$, la loi de décroissance de chaque composante e_i de la fonction de tâche e est la suivante :

$$e_i(t) = e_i(t_0) e^{-\int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (\text{IV.30})$$

où t_0 est l'instant où débute la tâche, et τ la variable d'intégration.

Cette méthode ne permet évidemment pas un suivi extrêmement précis du profil. Cependant, si la distance de freinage $d_1 - d_+$ est suffisamment grande, elle permet d'atteindre ξ_+ avec la vitesse de sécurité désirée v_{sec} .

L'algorithme proposé ici permet de traiter le problème des saturations en adaptant judicieusement le gain de l'asservissement visuel. En effet, λ est augmenté jusqu'à ce que la vitesse linéaire atteigne sa valeur maximale, puis en permanence ajusté de telle sorte que le phénomène de saturation ne se produise pas. Le temps d'exécution de la tâche est donc réduit de manière significative. D'autre part, nous garantissons également le suivi d'un profil de vitesse afin d'entrer dans la zone dangereuse autour de l'obstacle avec une vitesse linéaire suffisamment faible pour garantir la non collision et la non saturation lorsque seule la loi d'évitement pilote le robot.

Cependant, il est clair que la méthode proposée fait intervenir un certain nombre de paramètres qu'il est très difficile de fixer a priori. C'est d'ailleurs son inconvénient majeur. En effet, s'il semble naturel - compte tenu de la dynamique imposée - d'agir sur λ pour éviter le phénomène de saturation, il est beaucoup plus compliqué de déterminer a priori la meilleure manière d'ajuster ce gain. Et cette difficulté se traduit précisément dans le choix des différents paramètres qui interviennent dans cet algorithme.

Résultats de simulation

Nous avons validé notre technique en simulation sous le logiciel *Matlab*. L'objectif de la mission proposée est de positionner la caméra face à une cible tout en garantissant la non collision. La configuration initiale du robot est la suivante: $x = -15$ mètres, $y = 0$, $\theta = \pi/4$, et $\theta_{pl} = -\pi/300$. L'obstacle considéré est un cylindre de rayon 1 mètre, centré au point $(0, 1)$. Les distances d_1 et d_0 sont respectivement fixées à 3 et 1 mètre, ε prenant la valeur 0.1. La cible est constituée de quatre points dont les coordonnées dans le repère de la scène sont : $[16 \ 0.25 \ 1.25]^T$, $[16 \ -0.25 \ 1.25]^T$, $[16 \ -0.25 \ -1.25]^T$, $[16 \ 0.25 \ -1.25]^T$. On notera que les points ont été choisis de manière à ce que le centre de gravité de la cible soit à la même hauteur que le centre optique de la caméra. Un degré de liberté supplémentaire en lacet suffit donc pour réaliser la tâche proposée.

Les configurations du robot et de l'obstacle ont été choisies de telle sorte que d'une part, le véhicule ne puisse converger directement vers la cible et d'autre part qu'il puisse atteindre sa vitesse maximale. Les bornes supérieures des commandes sont les suivantes : $|v| \leq 0.9$ m/s, $|\omega| \leq 1$ rad/s, $\dot{q}_{pl} \leq 1.45$ rad/s. La vitesse de sécurité est quant à elle fixée à 0.5 m/s. Enfin, la valeur initiale de λ est de $8e-4$, tandis que k est fixé à 0.99.

La figure IV.13 représente la trajectoire suivie par le robot. L'évolution de μ (figure IV.15) montre que la mission s'exécute en trois étapes :

- Initialement, le robot se trouve hors de la zone dangereuse définie par l'enveloppe ξ_0 . μ est donc fixé à 0 et le véhicule n'est piloté que par l'asservissement visuel (cf. équation IV.1). Il commence alors à converger vers la cible.
- Lorsqu'il entre dans la région déterminée par ξ_+ , μ est progressivement augmenté et atteint la valeur 1 sur l'enveloppe ξ_- . Le robot n'est dès lors plus commandé que par la loi d'évitement définie par l'équation IV.18, et s'écarte de l'obstacle pour converger vers l'enveloppe de sécurité ξ_0 . La platine pivote alors de manière à compenser le mouvement de contournement de la base, assurant une perturbation minimale des indices visuels (cf. figure IV.14).
- Lorsque la condition de sortie est vérifiée, c'est-à-dire lorsque l'obstacle ne présente plus de danger pour le robot, μ diminue progressivement jusqu'à atteindre 0 sur l'enveloppe ξ_+ . L'asservissement visuel reprend alors la main, et assure la convergence finale du robot vers la cible.

Les figures IV.17, IV.18 et IV.20 représentent les commandes envoyées aux actionneurs du robot. Aucune d'entre elles ne dépasse sa borne maximale, validant

l'algorithme de gestion des saturations que nous avons présenté précédemment. Cependant, les contraintes en accélération du robot mobile semblent violées au début de l'évitement. Un zoom sur les vitesses de rotation de la base mobile et de la platine pendant cette phase permet de montrer que ce phénomène n'est dû qu'au choix des échelles et que les limites physiques du véhicule sont parfaitement respectées (cf. figures IV.19 et IV.21). L'évolution de λ est donnée par la figure IV.16. Lorsque les vitesses angulaires de la base et la platine atteignent leur régime permanent, λ est augmenté puis ajusté de telle manière que la vitesse linéaire du robot reste proche de sa valeur maximale. Lorsque le véhicule atteint l'enveloppe ξ_+ , l'obstacle est détecté par le laser. Le profil décrit par l'équation IV.28 est alors déterminé et λ calculé pour assurer un suivi de ce profil. Le robot pénètre alors dans la zone dangereuse avec la vitesse de sécurité désirée $v_{sec} = 0.5$ m/s. Cette vitesse est maintenue constante pendant toute la phase d'évitement. Celle-ci s'achève lorsque la condition de sortie est vérifiée. λ est alors à nouveau augmenté afin d'accélérer la convergence finale du robot.

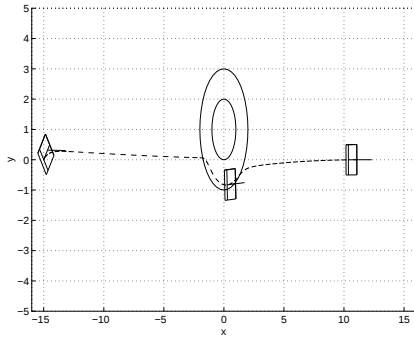


FIG. IV.13 – *Tâche référencée vision en environnement encombré*

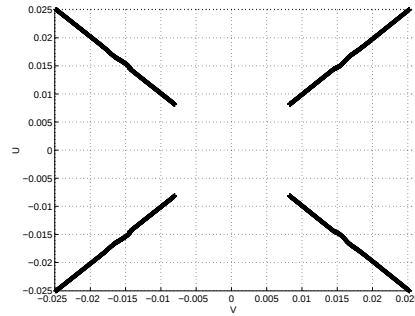


FIG. IV.14 – *Evolution des indices visuels*

Nous avons présenté dans ce paragraphe une méthode permettant à un robot mobile non redondant de réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Elle repose sur la fusion des informations visuelles et proximétriques au niveau de la commande, et consiste à définir un correcteur global à partir de deux correcteurs, l'un réalisant l'asservissement visuel, l'autre effectuant l'évitement. Dans cette approche, nous avons exploité le formalisme du suivi de chemin pour assurer le contournement de l'obstacle ainsi que la non collision. Nous avons également garanti la conservation de la cible dans le champ de vue de la caméra grâce à une commande séparée de la base et la platine en phase d'évitement. Enfin, nous avons développé un algorithme permettant d'éviter la saturation des

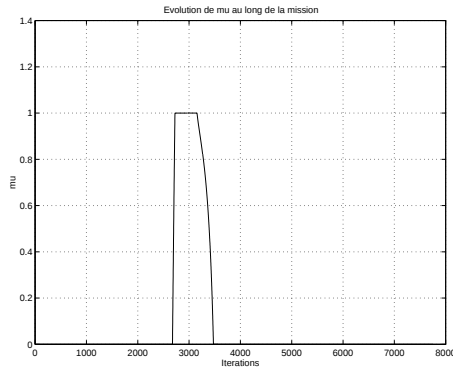


FIG. IV.15 – *Evolution de μ*

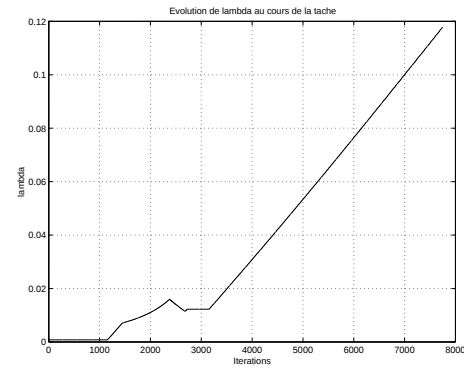


FIG. IV.16 – *Evolution du gain λ*

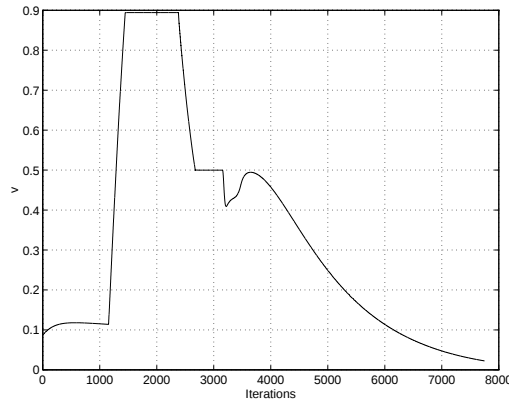
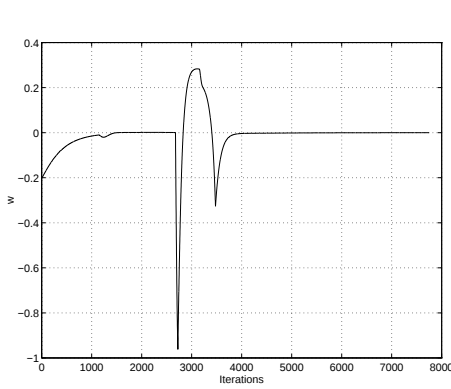
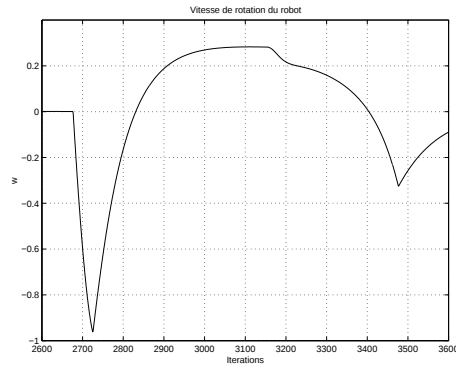
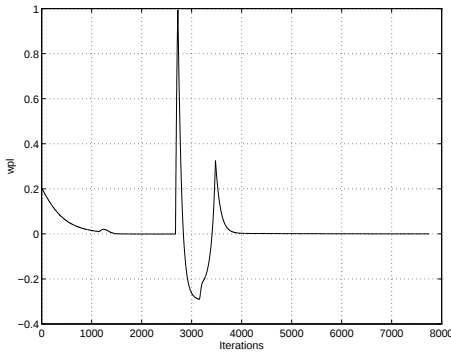
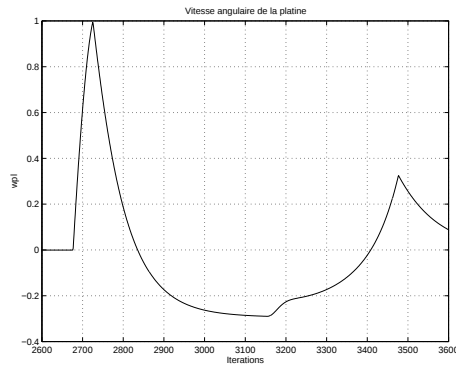


FIG. IV.17 – *Vitesse linéaire de la base mobile*

actionneurs. La faisabilité de la tâche est donc garantie. Cette technique - contrairement à celles basées sur le formalisme des tâches redondantes - est applicable à tout type de robot, redondant ou non, puisqu'elle requiert uniquement la détermination séparée de deux correcteurs. En outre, tout comme la méthode reposant sur le potentiel répulsif rotatif, elle permet de considérer aussi bien des obstacles convexes que concaves, dans la mesure où la concavité n'est pas trop profonde (i.e., dans la mesure où l'unicité du repère de Frenet projeté sur l'enveloppe reste garantie).

IV.2.2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans les sous-sections IV.2.2.1, IV.2.2.2 et IV.2.2.3 trois méthodes permettant à un robot mobile muni d'une caméra montée sur une

FIG. IV.18 – *Vitesse angulaire de la base mobile*FIG. IV.19 – *Zoom sur la vitesse angulaire de la base mobile pendant l'évitement*FIG. IV.20 – *Vitesse angulaire de la platine*FIG. IV.21 – *Zoom sur la vitesse angulaire de la platine pendant l'évitement*

platine de réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Elles reposent sur la fusion des informations visuelles et proximétriques au niveau de la commande (cf. équation IV.1).

La première technique proposée s'appuie sur le formalisme des potentiels classiques. Dans cette approche, la loi d'évitement dépend non seulement du potentiel répulsif, mais aussi de l'asservissement visuel. De ce fait, la faisabilité de la tâche ne peut être que difficilement garantie. C'est pourquoi, nous avons amélioré cette méthode en développant deux nouvelles techniques qui reposent sur la désolidarisation de la base et de la platine. Ainsi, tandis que la plateforme contourne l'obstacle sous l'action d'un potentiel rotatif ou d'un suivi de chemin, la platine est commandée de manière à conserver les indices visuels dans l'image. L'asser-

vissement visuel est donc encore présent en phase d'évitement, mais *n'intervient plus sur le mouvement de la base*. L'effet attractif de la cible est alors complètement séparé de l'action répulsive de l'obstacle, excepté lorsque le paramètre μ varie (cf. équation IV.1). Néanmoins, l'introduction d'une condition de sortie restreint cette variation dans un couloir de largeur suffisamment faible pour que la faisabilité de la tâche ne soit pas remise en cause. De ce fait, les deux techniques que nous avons développées [Cadenat *et al.* 99a] [Cadenat *et al.* 99b] permettent de garantir une exécution correcte de la tâche et constituent une amélioration importante de l'approche proposée dans [Swain *et al.* 99].

Dans les travaux précédents, nous avons considéré l'exécution d'une tâche référencée vision de positionnement. Cette dernière définit complètement le mouvement de la caméra et contraint les trois degrés de liberté du véhicule. Le robot considéré est non redondant par rapport à la tâche à exécuter, et il est impossible de réaliser simultanément le positionnement de la caméra et l'évitement d'obstacle. Ces deux tâches ont donc été réalisées séquentiellement par fusion des informations visuelles et proximétriques au niveau de la commande. Au contraire, les deux méthodes que nous allons décrire reposent sur la définition d'une tâche référencée vision beaucoup moins contraignante. De cette manière, nous disposons de degrés de liberté permettant de réaliser parallèlement l'asservissement visuel et l'évitement, sans avoir besoin de désolidariser la base et la platine.

IV.2.3 Relaxation des contraintes de déplacement imposées par la tâche référencée vision de positionnement

Nous avons développé, en collaboration avec Dominique Dedieu, deux nouvelles méthodes utilisant la redondance de la tâche référencée vision pour réaliser l'évitement [Dedieu *et al.* 99]. Toutes deux reposent sur le principe suivant : tant que le robot reste loin de la cible, la tâche référencée vision à réaliser est définie par une fonction de tâche de dimension 2, de manière à libérer un degré de liberté permettant, soit de contourner les obstacles rencontrés, soit d'effectuer toute autre tâche nécessaire dans l'espace libre. Cette fonction de tâche est naturellement définie de telle sorte que le robot converge vers la cible sans la perdre de vue. Cependant, le positionnement de la caméra reste notre objectif principal. Aussi, dès que le véhicule entre dans un voisinage prédéterminé de la cible *supposé libre d'obstacle*, on bascule vers une tâche de positionnement classique permettant de stabiliser définitivement la caméra. La stratégie de commande envisagée se déroule donc en trois phases distinctes dépendant non seulement de la distance à l'obstacle mais aussi de celle à la cible. Ainsi, tant que le robot se trouve loin de la

cible et des obstacles, l'objectif est essentiellement de se rapprocher de cette dernière. Par contre, lorsque le robot entre dans le voisinage d'un obstacle, le véhicule est commandé de manière à éviter cet obstacle et conserver les indices visuels dans le champ de vision de la caméra. La tâche référencée vision définie dans l'espace libre ne contraignant que deux degrés de liberté sur les trois disponibles, le degré de liberté restant est utilisé pour réaliser simultanément l'asservissement visuel et le contournement. C'est donc ici que se situe la différence majeure avec les approches développées précédemment dans la sous-section IV.2.2. Enfin, lorsque l'obstacle ne présente plus de danger, le robot quitte son voisinage et continue à converger vers la cible. Lorsqu'il en est suffisamment proche (i.e., l'erreur $s - s^*$ devient inférieure à un seuil préfixé), on considère à nouveau la tâche référencée vision de positionnement afin d'assurer la stabilisation finale de la caméra face à la cible.

Nous proposons deux méthodes reposant sur cette stratégie de commande. La première s'appuie directement sur le formalisme des fonctions de tâche développé dans [Samson *et al.* 91], et consiste à déterminer *complètement* le vecteur de commande du robot à partir de la définition d'une fonction de tâche ρ -admissible. L'inconvénient majeur de cette approche est que la vitesse linéaire ne peut alors être régulée qu'à travers l'ajustement *empirique* des gains de commande, ajustement qui s'avère être relativement complexe à réaliser en pratique comme nous l'avons vu dans l'approche présentée dans le paragraphe IV.2.2.3. C'est pourquoi, nous avons développé une deuxième technique où seulement deux des trois commandes disponibles sur le robot sont déterminées. Ainsi, seules les vitesses angulaires de la base et la platine sont contrôlées, la vitesse linéaire étant spécifiée à un autre niveau de commande. Cette approche, contrairement à la précédente, permet de ne considérer que les informations relatives à l'orientation qui - seules - sont essentielles dans la réalisation de la tâche référencée vision. En effet, lorsqu'une telle tâche est exécutée, la vitesse à laquelle le véhicule converge vers la cible n'est pas d'une grande importance pour notre problème pourvu que, d'une part, elle ne viole pas ses contraintes physiques et que, d'autre part, elle lui permette de contourner les éventuels obstacles rencontrés. Le seul élément d'importance réside donc en fait dans la conservation des indices visuels dans le champ de vision de la caméra et la qualité du positionnement final.

IV.2.3.1 Première méthode : Spécification du vecteur de commande complet

Rappelons que $\epsilon = s - s^*$ représente l'erreur entre le signal capteur s et sa consigne s^* (cf. équation II.44). Si nous définissons la fonction de tâche comme

dans l'équation II.46 (i.e., en introduisant une matrice de combinaison C), le déplacement de la caméra est complètement déterminé par sa décroissance exponentielle, et aucun mouvement ne peut plus être effectué simultanément avec l'asservissement visuel. C'est pourquoi, ici, nous choisissons de définir une tâche référencée vision moins contraignante de manière à libérer des degrés de liberté permettant de réaliser un contournement ou toute autre tâche nécessaire. Cette fonction de tâche, de dimension 2, doit assurer à la fois la convergence du robot vers la cible et la conservation de cette dernière dans le champ de vision de la caméra. Pour cela, nous définissons ses deux composantes e_1 et e_2 comme suit :

$$e_1 = \frac{1}{2}\epsilon^T H \epsilon \quad e_2 = p^T \epsilon \quad (\text{IV.31})$$

où H est une matrice symétrique définie positive, tandis que $p^T = \frac{1}{4}[0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$. e_1 est une fonction quadratique qui s'annule si et seulement si $\epsilon = 0$ comme le montre la figure IV.22. Cette fonction de tâche assure donc la progression du robot vers la cible puisque la seule manière de la faire décroître consiste à s'approcher de la position finale décrite par le vecteur s^* . De même, la fonction de

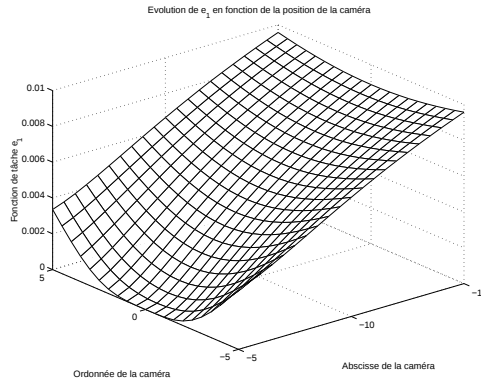


FIG. IV.22 – *Evolution de e_1 en fonction de la position de la caméra*

tâche e_2 garantit la conservation de la cible dans le champ de vision de la caméra, puisqu'elle dépend uniquement des ordonnées des points projetés. Celles-ci correspondant au centrage de la cible dans l'image, d'après le choix des repères représenté sur la figure II.2, la réalisation de e_2 suffit pour que les indices visuels ne soient pas perdus pendant la phase d'approche. Afin de réguler e_1 et e_2 à zéro, nous imposons la dynamique suivante pour chacune de ces fonctions de tâche :

$$\dot{e}_1 = -\lambda_1 e_1 \quad \text{et} \quad \dot{e}_2 = -\lambda_2 e_2 \quad (\text{IV.32})$$

où λ_1 et λ_2 définissent la vitesse de convergence de e_1 et e_2 à zéro. De la définition de e_1 et e_2 donnée dans l'équation IV.31, et rappelant que $\dot{s} = L_{platine} J_{platine} \dot{q}$ d'après la relation II.38, il vient :

$$\epsilon^T H L_{platine} J_{platine} \dot{q} = -\lambda_1 e_1 \quad \text{et} \quad p^T L_{platine} J_{platine} \dot{q} = -\lambda_2 e_2 \quad (\text{IV.33})$$

Ainsi, la régulation de e_1 et e_2 à zéro permet d'assurer la progression de la caméra vers la cible ainsi que son centrage, mais ne suffit pas pour assurer que la caméra sera positionnée perpendiculairement face à la cible comme dans le cas de la tâche classique de positionnement. Notons en outre que ces deux tâches dépendent des mêmes informations visuelles. Leurs vitesses de décroissance doivent donc être compatibles, et les gains λ_1 et λ_2 être choisis en conséquence. En effet, au début de la tâche, la caméra va chercher d'une part à converger vers la cible et d'autre part à centrer les motifs visuels. Si, compte tenu de la dynamique de la platine et de la valeur de λ_2 , elle centre la cible plus vite qu'elle ne s'en rapproche, e_1 va diminuer trop rapidement par rapport au gain λ_1 imposé. Le véhicule devra alors reculer dans un premier temps pour continuer à satisfaire simultanément les deux dynamiques imposées par l'équation IV.32, et un tel mouvement n'est pas souhaité. Les gains λ_1 et λ_2 ne peuvent donc être fixés indépendamment.

Nous avons défini la tâche référencée vision à réaliser par une liaison virtuelle ne contraignant que deux degrés de liberté sur les trois initialement disponibles. Il reste un degré de liberté à fixer pour déterminer complètement le vecteur de commande $\dot{q}$. Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous nous proposons de le définir de manière différente selon que le robot se trouve ou non dans le voisinage d'un obstacle.

Synthèse dans l'espace libre

Dans le cas où le robot se trouve dans l'espace libre, l'objectif est essentiellement de se rapprocher de la cible en assurant la régulation à zéro de e_1 et e_2 . Comme il reste encore un degré de liberté à contraindre pour déterminer complètement le vecteur de commande, nous proposons de minimiser, à tout instant du temps, le critère $\mathcal{J} = \frac{1}{2} \dot{q}^T N \dot{q}$ où N est une matrice symétrique définie positive. Le choix des termes de N permet de sélectionner un actionneur plutôt qu'un autre pour contraindre le déplacement du robot : ainsi, par exemple, si le coefficient correspondant à $\dot{q}_{pl}$ est élevé, la convergence globale du système sera réalisée avec un mouvement minimal de la platine, l'essentiel du déplacement reposant alors sur la base. Il sera donc possible de prendre en compte la saturation des actionneurs à travers la définition de ce critère.

Le problème est donc ici de déterminer un vecteur $\dot{q}$ minimisant $\mathcal{J}$ à tout instant du temps sous les contraintes que $\dot{e}_1 = -\lambda_1 e_1$ et $\dot{e}_2 = -\lambda_2 e_2$. En in-

introduisant les variables $K_1^T = \epsilon^T H L_{platine} J_{platine}$, $K_2^T = p^T L_{platine} J_{platine}$, et $\Lambda = [\lambda_1 e_1 \ \lambda_2 e_2]^T$, les contraintes s'écrivent sous la forme vectorielle suivante :

$$K^T \dot{q} = -\Lambda \quad (\text{IV.34})$$

où $K = [K_1 \ K_2]$. Il s'agit donc d'un problème de minimisation d'un critère sous contrainte égalité. Rappelant que le Lagrangien s'écrit $\mathcal{L} = \mathcal{J} + \eta^T (K^T \dot{q} + \Lambda)$, où η , de dimension $(2, 1)$, représente le vecteur des paramètres de Lagrange, les conditions d'optimalité du premier ordre (conditions nécessaires) sont classiquement définies de la manière suivante [Luenberger 84] :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial \mathcal{J}}{\partial \dot{q}} + K \eta = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \eta} = K^T \dot{q} + \Lambda = 0 \quad (\text{IV.35})$$

En dérivant $\mathcal{J}$ par rapport au vecteur $\dot{q}$, nous obtenons :

$$\dot{q} = -N^{-1} K \eta \quad (\text{IV.36})$$

Il reste alors à déterminer les paramètres de Lagrange. Pour cela, il suffit de substituer la commande définie par l'équation IV.36 dans la relation de contraintes IV.34. Il vient :

$$K^T N^{-1} K \eta = \Lambda \quad (\text{IV.37})$$

En supposant la matrice $K^T N^{-1} K$ inversible¹², η est défini par $(K^T N^{-1} K)^{-1} \Lambda$, et la commande s'exprime comme suit :

$$\dot{q} = -N^{-1} K (K^T N^{-1} K)^{-1} \Lambda \quad (\text{IV.38})$$

Remarque 15 *La minimisation du critère $\mathcal{J}$ est réalisée à tout instant du temps sous les contraintes $\dot{e}_1 = -\lambda_1 e_1$ et $\dot{e}_2 = -\lambda_2 e_2$. Ce problème d'optimisation est différent de celui qui est résolu dans [Samson et al. 91]. En effet, ce dernier consiste à minimiser une fonction de coût par rapport à q , alors que, dans notre cas, la minimisation de $\mathcal{J}$ est réalisée par rapport à $\dot{q}$.*

La commande précédente assure donc à la fois la décroissance exponentielle des fonctions de tâche e_1 et e_2 définissant l'asservissement visuel, et la minimisation du critère $\mathcal{J}$. Cette commande ne prenant pas en compte la présence des obstacles dans la scène est naturellement valable uniquement dans l'espace libre. Ainsi, lorsqu'un obstacle est rencontré, il est nécessaire de relaxer la condition de minimisation de $\mathcal{J}$ pour définir une nouvelle contrainte garantissant la non collision.

¹². Cette matrice est inversible si la solution $\dot{q}$ du problème de minimisation satisfait les deux relations de contraintes.

Synthèse au voisinage d'un obstacle

Comme précédemment, le robot est muni d'un laser SICK 2D fournissant la distance d et l'orientation relative α entre le robot et l'obstacle. Nous supposons également que nous disposons d'une estimation de sa courbure χ à chaque instant. Nous exploitons ici encore le formalisme du suivi de chemin [Samson 92]. d et α sont donc définis de la même manière que dans la sous-section IV.2.2.3 (cf. figure IV.23). De même, le sens de contournement est choisi comme indiqué dans la remarque 9. Nous introduisons également deux enveloppes ξ_+ et ξ_0 situées respectivement aux distances d_+ et d_0 . ξ_+ délimite la zone dans laquelle l'obstacle est détecté, et ξ_0 correspond à la distance à laquelle la manœuvre d'évitement débute. Enfin, nous conservons les mêmes hypothèses de base que dans la sous-section IV.2.2.3.

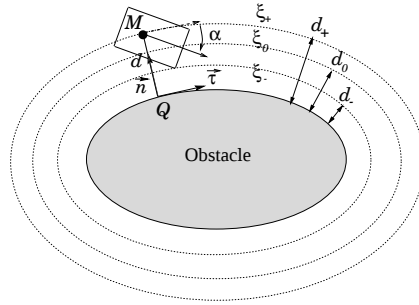


FIG. IV.23 – Représentation du problème

Lorsque le robot franchit l'enveloppe ξ_0 , la minimisation du critère est abandonnée au profit de la régulation à zéro d'une nouvelle fonction de tâche définie par $e_3 = \sin \alpha$. Cette fonction de tâche permet d'éviter l'obstacle puisque, lorsque la condition $e_3 = 0$ est satisfaite, le robot est orienté parallèlement à celui-ci, et va donc le contourner en suivant une troisième enveloppe ξ_- située à une distance constante d_- de l'obstacle. Cette enveloppe n'est pas fixée a priori comme ξ_0 et ξ_+ . La distance d_- dépend en effet de la vitesse du robot, de son orientation initiale $\alpha(t_0)$ lorsqu'il entre dans la zone délimitée par ξ_0 , et de la dynamique de e_3 . Nous montrerons toutefois par la suite qu'il est possible de s'assurer que d_- reste supérieure à une distance de sécurité d_{sec} . Afin de réguler e_3 à zéro, nous imposons la dynamique suivante :

$$\dot{e}_3 = \dot{\alpha} \cos \alpha = -\lambda_3 e_3 \quad (\text{IV.39})$$

où $\lambda_3 > 0$ définit la vitesse de décroissance de e_3 à zéro. La détermination de la loi de commande complète requiert donc le calcul de l'expression de $\dot{\alpha}$ en fonction

de $\dot{q}$. En reprenant les résultats du formalisme du suivi de chemin que nous avons rappelés dans la sous-section IV.2.2.3, $\dot{\alpha}$ est défini comme dans le système IV.17 par :

$$\dot{\alpha} = \omega - \frac{v\chi \cos \alpha}{1 + \sigma d\chi} \quad (\text{IV.40})$$

où tous ces différents paramètres conservent leur signification antérieure. $\dot{e}_3$ s'écrit alors comme suit :

$$\dot{e}_3 = \left[-\frac{\chi \cos^2 \alpha}{1 + \sigma d\chi} \quad \cos \alpha \quad 0 \right] \dot{q} = K_3^T \dot{q} \quad (\text{IV.41})$$

Ainsi, des équations IV.34 et IV.41, il vient :

$$\dot{q} = - \begin{pmatrix} K^T \\ K_3^T \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Lambda \\ \lambda_3 e_3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.42})$$

La loi de commande IV.42 assure la régulation à zéro des trois fonctions de tâche e_1 , e_2 et e_3 , donc l'évitement d'obstacle. Cependant, l'existence de cette loi de commande est intimement liée à l'inversibilité de la matrice $[K K_3]^T$. Celle-ci sera régulière si les trois tâches sont indépendantes et compatibles, autrement dit si elles peuvent être réalisées parallèlement. e_2 ne contrôlant que le centrage des indices visuels, les problèmes de compatibilité seront en fait particulièrement liés à l'exécution simultanée de e_1 et e_3 qui gèrent respectivement la progression du robot vers la cible et l'évitement. En effet, pendant cette phase, le robot va devoir à la fois continuer à converger vers la cible et s'orienter progressivement parallèlement à l'obstacle, mouvements qui peuvent s'avérer incompatibles si les vitesses de décroissance définies par les gains λ_1 et λ_3 sont mal choisies ou si l'obstacle rencontré présente une concavité trop importante. Dans ces cas-là, il sera effectivement impossible d'assurer à la fois la décroissance exponentielle de e_1 et celle de e_3 , et il y aura singularité. En outre, même dans le cas où ces deux tâches restent compatibles, il est important de noter que, comme l'évitement de l'obstacle perturbe l'approche de la cible, le véhicule doit accélérer afin de continuer à satisfaire la dynamique d'approche imposée par λ_1 malgré le mouvement de contournement. Le choix des gains λ_1 et λ_3 apparaît donc essentiel dans cette méthode.

Afin de garantir la faisabilité de la tâche, il est nécessaire d'assurer la non collision et la non saturation des actionneurs. Comme la vitesse linéaire est bornée $v \leq V_{\max}$, il est possible de montrer que la distance de contournement d_- restera supérieure à une distance de sécurité d_{sec} . Rappelons que la dérivée de la distance par rapport au temps s'écrit $\dot{d} = v \sin \alpha$ dans le formalisme du suivi de chemin. Si

t_0 et t_- représentent respectivement les instants où le robot franchit les enveloppes ξ_0 et ξ_- , il vient en intégrant :

$$d_- = d_0 + \int_{t_0}^{t_-} v(t) \sin \alpha(t) dt \quad (\text{IV.43})$$

Or, le robot atteint l'enveloppe ξ_- avec une orientation $\alpha(t_-) \simeq 0$. En outre, d'après l'équation IV.39 et comme $e_3 = \sin \alpha$, $\dot{\alpha} = -\lambda_3 \tan \alpha$. d_- peut donc se réécrire comme suit :

$$d_- = d_0 - \int_{\alpha(t_0)}^{\alpha(t_-)} \frac{v(t)}{\lambda_3} \cos \alpha(t) d\alpha \quad (\text{IV.44})$$

La distance d_- étant toujours inférieure à d_0 , elle peut être majorée par une distance de sécurité d_{sec} en considérant le cas le plus dangereux où la vitesse du robot est maximale. Nous obtenons alors le résultat suivant :

$$d_- \geq d_{sec} = d_0 + \frac{V_{\max}}{\lambda_3} \sin \alpha(t_0) \quad (\text{IV.45})$$

Ainsi, pour un choix de d_0 et de λ_3 garantissant la non saturation de la vitesse angulaire, on peut montrer que le contournement s'effectuera sur une enveloppe ξ_- située à une distance d_- supérieure ou égale à la distance de sécurité d_{sec} , garantissant ainsi la non collision.

De plus, la faisabilité de la tâche requiert que la vitesse linéaire du véhicule soit suffisamment faible pour permettre au robot de contourner les obstacles sans saturer ses actionneurs. Comme nous l'avons vu précédemment [Cadenat *et al.* 99a], la garantie de non saturation peut être obtenue en ajustant les gains intervenant dans la loi de commande. Cette régulation, très empirique, s'avère difficile à réaliser. En outre, nous avons montré qu'ici les lois de commande synthétisées sont relativement sensibles à leurs valeurs. C'est pourquoi, nous proposons une deuxième méthode où la vitesse linéaire n'est plus spécifiée au sein de la boucle de commande classique précédente mais à un niveau supérieur.

IV.2.3.2 Deuxième méthode : Contrôle externe de la vitesse linéaire

Dans l'approche précédente, la vitesse linéaire du robot ne peut être ajustée qu'en agissant sur les gains λ_i . Or, celle-ci doit être suffisamment faible pour permettre au véhicule d'éviter les obstacles sans saturer les vitesses angulaires. De plus, seules les informations de cap sont essentielles pour l'exécution d'une tâche référencée vision de navigation, la vitesse de convergence vers la cible apparaissant plutôt comme un paramètre indépendant. Aussi, dans ce contexte, semble-t-il

intéressant de sortir la vitesse linéaire de la boucle de commande classique définie généralement par une décroissance exponentielle pour la spécifier à un autre niveau de commande. Nous choisissons donc ici de contrôler indépendamment la vitesse linéaire de manière à ce qu'elle suive un profil de consigne similaire à celui décrit dans la sous-section IV.2.2.3. Ainsi, lorsque le robot se trouve dans l'espace libre, v est régulée à sa vitesse maximale après une phase d'accélération. Par contre, dès qu'un obstacle est détecté par le laser, elle est progressivement réduite pour atteindre une valeur de sécurité v_{sec} sur l'enveloppe ξ_- . Cette vitesse de sécurité est choisie suffisamment faible pour garantir le contournement de l'obstacle sans saturation des vitesses angulaires.

Ainsi, dans notre cas, la vitesse linéaire du véhicule est spécifiée à un niveau supérieur de commande. Elle apparaît donc comme un paramètre indépendant, tout comme dans le formalisme du suivi de chemin où l'on ne s'intéresse qu'à la convergence géométrique vers le chemin de référence [Samson 92]. Le vecteur de commande se réduit de ce fait à $\dot{\vec{q}} = [\omega \ \dot{q}_{pl}]^T$. Nous définissons maintenant le mouvement de la caméra par la seule fonction de tâche e_2 décrite par l'équation IV.31, et cherchons comme précédemment à la réguler à zéro en imposant la dynamique spécifiée par la relation IV.32. Cette fonction de tâche assure uniquement le centrage des informations visuelles dans l'image et contraint un seul degré de liberté sur les deux maintenant disponibles. Tout comme dans la méthode précédente, nous utiliserons le degré de liberté restant différemment selon que le robot se trouve - ou non - dans le voisinage d'un obstacle.

Synthèse dans l'espace libre

Après une phase d'accélération correspondant au début de la tâche, la vitesse linéaire est fixée à sa valeur maximale. Comme la régulation de e_2 contraint la caméra à centrer les indices visuels et donc à pointer vers la cible, nous cherchons à définir le mouvement de la base mobile de manière à l'orienter vers cette dernière. Pour cela, il suffit d'imposer que la vitesse linéaire v_P du point P soit dirigée selon l'axe $\vec{x}_P$ (cf. figure II.2). Comme $v = v_P \cos \theta_{pl}$, la vitesse angulaire ω permettant d'orienter correctement la base mobile vers la cible s'exprime comme suit :

$$\omega = \frac{v_P}{D_x} \sin \theta_{pl} = \frac{v}{D_x} \tan \theta_{pl} \quad (\text{IV.46})$$

La définition de ω par cette relation permet d'orienter naturellement la base mobile dans la direction pointée par la caméra, le profil définissant la vitesse linéaire assurant quant à lui la progression du robot vers la cible. Néanmoins, une telle formulation du problème conduit à une variation trop rapide de la vitesse angulaire ω si l'angle θ_{pl} a une valeur trop grande, voire à une singularité s'il vaut $\pi/2$.

Ce phénomène se comprend très bien physiquement puisque, sous l'action de cette commande, le point P doit se déplacer instantanément dans la direction pointée par la platine. De ce fait, si l'angle θ_{pl} est trop grand, la commande permettant de réaliser ce mouvement sera trop importante et violera les contraintes physiques du robot. Aussi, afin de réduire cette discontinuité et d'empêcher la singularité $\theta_{\text{pl}} = \pi/2$, nous avons mis en place une phase de transition en remplaçant dans la loi de commande précédente θ_{pl} par $\theta_{\text{pl}}/2$ de manière à contraindre le point P à se déplacer sur la bissectrice de l'angle défini par l'orientation du robot et celle de la caméra. On peut également considérer l'angle $\bar{\theta}_{\text{pl}} = (1 - e^{-t}/2)\theta_{\text{pl}}$ si l'on souhaite lisser davantage la discontinuité. De cette manière, la régulation de θ_{pl} à zéro n'est réellement prise en compte que lorsque le robot a vraiment commencé à tourner, évitant ainsi tout problème de saturation au début de la tâche.

Il reste maintenant à exprimer le vecteur de commande $\dot{q}'$. Pour cela, rappelons que $\dot{q}$ doit vérifier simultanément les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{e}_2 = K_2^T \dot{q} = K_2^T [0 \ \dot{q}^T]^T + K_2^T [v \ 0 \ 0]^T \\ \omega = \frac{v}{D_x} \tan \bar{\theta}_{\text{pl}} \end{cases} \quad (\text{IV.47})$$

En écrivant ce système sous forme matricielle, il est possible d'exprimer le vecteur $\dot{q}$ comme suit :

$$\dot{q} = A^{-1}a_1 \quad (\text{IV.48})$$

où A et a_1 sont définies de la manière suivante :

$$A = \begin{pmatrix} K_2^T \\ 0 \ 1 \ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad a_1 = \begin{pmatrix} -\lambda_2 e_2 \\ \frac{v}{D_x} \tan \bar{\theta}_{\text{pl}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} K_2^T \\ 0 \ 1 \ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.49})$$

Naturellement, l'existence de la commande IV.48 est assujettie à l'inversibilité de la matrice A . D'après les expressions de J_{platine} et L_{platine} définies respectivement par les équations II.16 et II.36, le déterminant de A s'écrit :

$$\det(A) = -\frac{1}{4} \left(a \sum_{i=1}^4 \frac{1}{z_i} + b \sum_{i=1}^4 \frac{Y_i}{z_i} + \sum_{i=1}^4 Y_i^2 + 4 \right) \quad (\text{IV.50})$$

Comme la cible est relativement centrée dans l'image grâce à la régulation de e_2 , la somme $\sum_{i=1}^4 Y_i$ est petite. Par suite, comme tous les termes contenus dans la parenthèse sont positifs, le déterminant de A est non nul et cette matrice est inversible, garantissant ainsi le bon conditionnement du problème de commande. Notons également que la vitesse linéaire du véhicule apparaît comme un paramètre dans la commande proposée. Ainsi, la loi IV.48 garantit le centrage des

informations visuelles dans l'image, tandis que la convergence vers la cible est assurée par la définition externe de la vitesse linéaire. Cette loi ne prenant pas en compte la présence des obstacles dans la scène ne permet pas de garantir la non collision, et est donc uniquement valable dans l'espace libre.

Synthèse au voisinage d'un obstacle

On considère encore la figure IV.23 où les différents paramètres définis précédemment conservent leur signification première : ξ_+ délimite la zone dans laquelle l'obstacle est détecté par le laser et à partir de laquelle la procédure d'évitement débute. ξ_- sera choisie¹³ de manière assurer la non collision et la non saturation. Nous reviendrons plus loin sur le rôle de l'enveloppe ξ_0 .

Dès qu'un obstacle est détecté par le laser, la vitesse linéaire est réduite jusqu'à atteindre une vitesse de sécurité v_{sec} sur l'enveloppe ξ_- . De cette manière, le contournement de l'obstacle pourra s'effectuer sans saturer les vitesses angulaires du robot, moyennant un choix judicieux de la distance d_- . D'autre part, afin de garantir la non collision, nous modifions la définition de la vitesse angulaire de la base mobile de telle sorte qu'elle s'oriente parallèlement à l'obstacle au lieu de se diriger vers la cible. Pour cela, une solution consiste à imposer que la vitesse du point P soit orientée selon la tangente à l'obstacle. Ainsi, comme $v = v_P \cos \alpha$, ω est définie par $v/D_x \tan \alpha$. Naturellement, cette modélisation conduit aux mêmes problèmes que dans le cas de la synthèse dans l'espace libre, lorsque α est grand ou vaut $\pi/2$. En effet, au début de l'évitement, le point P est brutalement¹⁴ contraint à se déplacer sur une enveloppe parallèle à l'obstacle, et le robot doit alors tourner très rapidement (voire infiniment rapidement si $\alpha = \pi/2$) pour que ce mouvement soit possible. Comme précédemment, pour éviter la singularité lorsque α est proche de $\pi/2$ et lisser le mouvement, nous introduisons une phase transitoire en remplaçant α par $\alpha/2$ dans l'expression de ω . Ainsi, comme $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\alpha/2 \in [-\pi/4, \pi/4]$, et la tangente est toujours définie. Il est également possible de lisser davantage la discontinuité en considérant $\bar{\alpha} = \alpha(1 - e^{-(t-t_0)/2})$ en lieu et place de α , t_0 désignant l'instant où la phase d'évitement débute. De cette manière, le robot a le temps de commencer à pivoter avant que la valeur de l'angle soit complètement prise en compte. Naturellement, avec une telle modélisation, le robot va s'approcher davantage de l'obstacle. Cette phase transitoire devra donc être suffisamment rapide pour assurer la non collision. La vitesse angulaire de la base mobile est finalement définie par $v/D_x \tan \bar{\alpha}$. Rappelant que le vecteur de commande doit satisfaire à la fois cette dernière re-

13. Pour cette deuxième méthode, l'enveloppe ξ_- est définie a priori.

14. Nous verrons plus loin que l'introduction du coefficient de basculement μ permet de lisser cette discontinuité.

lation et l'équation IV.33, nous obtenons un système similaire à celui défini par la relation IV.47, et $\dot{\bar{q}}$ s'écrit :

$$\dot{\bar{q}} = A^{-1}a_2 \quad \text{où} \quad a_2 = \begin{pmatrix} -\lambda_2 e_2 \\ \frac{v}{D_x} \tan \bar{\alpha} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} K_2^T \\ 0 \ 1 \ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.51})$$

L'existence de cette loi de commande est comme précédemment liée à l'inversibilité de A , la régularité de cette matrice ayant déjà été discutée au paragraphe précédent.

IV.2.3.3 Stratégie générale de commande

Nous avons élaboré pour chacune des deux méthodes proposées des correcteurs valables soit dans l'espace libre, soit au voisinage d'un obstacle. Afin de déterminer une loi de commande globale continue permettant à un robot mobile de naviguer dans un environnement encombré, il s'avère nécessaire de fusionner chacun de ces correcteurs. Cette fusion est réalisée au niveau de la commande et repose sur l'équation IV.1. Reprenant les notations introduites dans cette relation, $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ seront respectivement définis par les relations IV.38 et IV.42 pour la première méthode, et par les équations IV.48 et IV.51 pour la seconde. Ainsi, pour déterminer complètement la loi de commande globale, il reste à définir la fonction μ qui assurera le basculement entre les différents correcteurs synthétisés précédemment. Ce basculement ne sera pas géré de la même manière selon la technique considérée.

Première méthode : La phase d'évitement débute lorsque le robot franchit l'enveloppe ξ_0 , l'obstacle ayant été détecté dans la zone délimitée par ξ_+ . Aussi, nous choisissons de faire évoluer μ lorsque le robot se trouve entre ces deux enveloppes. Naturellement, tant que le véhicule reste à l'extérieur de la région délimitée par ξ_+ et ξ_0 , μ reste constant : il prend la valeur 0 s'il se trouve hors de la zone dangereuse ($d > d_+$), et 1 dès qu'il franchit l'enveloppe ξ_0 ($d < d_0$).

Deuxième méthode : Nous contraignons le robot à freiner lorsqu'il pénètre dans la région définie par ξ_+ jusqu'à atteindre une vitesse de sécurité sur l'enveloppe ξ_- . La phase d'évitement ne débute donc vraiment que sur ξ_- . C'est pourquoi, nous introduisons une enveloppe ξ_0 , et faisons évoluer μ entre ξ_0 et ξ_- . Tout comme pour la première méthode, μ reste constant tant qu'il reste à l'extérieur du couloir délimité par ces deux enveloppes : il est ainsi fixé à zéro lorsque $d > d_0$, et prend la valeur 1 dès que la distance devient inférieure à d_- .

La variation de μ pour chacune des deux méthodes est gérée en définissant un polynôme de degré 3 vérifiant les conditions aux limites suivantes :

$$\underbrace{\begin{cases} \mu(d_0) = 1 \\ \mu(d_+) = 0 \\ \mu'(d_0) = 0 \\ \mu'(d_+) = 0 \end{cases}}_{\text{Première méthode}} \quad \underbrace{\begin{cases} \mu(d_-) = 1 \\ \mu(d_0) = 0 \\ \mu'(d_-) = 0 \\ \mu'(d_0) = 0 \end{cases}}_{\text{Deuxième méthode}} \quad (\text{IV.52})$$

où μ' désigne la dérivée de μ par rapport à d . Nous avons ainsi défini une fonction différentiable μ permettant de basculer d'un correcteur vers l'autre, et donc de privilégier l'asservissement visuel ou l'évitement en fonction de l'environnement perçu par le robot. La loi de commande IV.1 est maintenant parfaitement connue.

La stratégie de commande envisagée est alors la suivante : tant que le véhicule se trouve dans l'espace libre ($d > d_+$), μ est fixé à 0, et le robot est contrôlé par $\dot{q}_{AV}$, vecteur de commande défini par l'équation IV.38 pour la première méthode ou l'équation IV.48 pour la deuxième. Il va donc se rapprocher de la cible. Par contre, dès qu'il pénètre dans la zone de basculement ($d < d_+$ pour la première technique ou $d < d_0$ pour la seconde), μ augmente progressivement jusqu'à atteindre 1 pour privilégier l'exécution de $\dot{q}_{EV}$, vecteur de commande défini par l'équation IV.42 pour la première méthode, l'équation IV.51 pour la deuxième. De cette manière, le robot exécute *simultanément* la tâche référencée vision souhaitée et l'évitement, contournant l'obstacle sans perdre les informations visuelles. Lorsque le mouvement de la caméra devient tangent à la trajectoire du robot mobile (i.e., lorsque $\theta_{pl} = 0$), l'obstacle ne présente plus de danger, et μ diminue alors progressivement jusqu'à s'annuler sur l'enveloppe ξ_+ .

Cependant, les correcteurs IV.38 et IV.48 ne suffisent pas pour positionner la caméra perpendiculairement face à la cible. Aussi, est-il nécessaire de basculer vers la tâche de positionnement lorsque le robot atteint un voisinage prédéfini de cette dernière. Le basculement est réalisé au niveau de la commande en introduisant une fonction μ_f dépendant de la norme de $\epsilon = s - s^*$, telle que $\mu_f = 1$ si $\|\epsilon\| < s_f$ et $\mu_f = 0$ si $\|\epsilon\| < s_f + \varepsilon_s$, la variation de μ_f étant alors gérée par un polynôme de degré 3. s_f définit donc le seuil à partir duquel la tâche de positionnement va être effectuée, tandis que ε_s assure la continuité du basculement. Finalement, pour pouvoir prendre en compte ce basculement dans la loi de commande IV.1, il est nécessaire de redéfinir $\dot{q}_{AV}$ de la manière suivante :

$$\dot{q}_{AV} = (1 - \mu_f)\dot{\tilde{q}}_{AV} + \mu_f\dot{q}_{pos} \quad (\text{IV.53})$$

où $\dot{\tilde{q}}_{AV}$ désigne le correcteur IV.38 ou IV.48 selon la méthode considérée, tandis que $\dot{q}_{pos}$ représente le correcteur II.48 qui permet de réaliser la tâche

référéncée vision de positionnement. Ainsi, lorsque le véhicule pénètre dans un voisinage prédéfini de la cible, μ_f prend la valeur 1 et la tâche référéncée vision initiale est abandonnée au profit d'une tâche de positionnement. La caméra est alors contrainte à se déplacer sur un rail virtuel perpendiculaire à la cible jusqu'à sa position finale.

Enfin, notons que la faisabilité de la tâche est garantie pour chacune des deux méthodes. En effet, dans les deux cas, la conservation des indices visuels et la non collision sont assurées¹⁵. D'autre part, la stabilité du correcteur global est comme précédemment déduite de la stabilité de chacun des correcteurs synthétisés, et dépend donc de la largeur du couloir dédié à la variation de μ . Enfin, si la non saturation est garantie "par construction" pour la deuxième technique proposée, elle est liée au choix des gains de commande pour la première.

IV.2.3.4 Résultats de simulation

Nous proposons maintenant quelques résultats de simulation pour chacune des deux méthodes développées. La configuration initiale du robot est définie par le vecteur $P = [-15 \ 0 \ \pi/4]^T$, tandis que l'obstacle considéré est un cylindre de rayon 1 mètre centré en $(0, 0)$. La cible est quant à elle située à 16 mètres de l'obstacle. La configuration du robot, de l'obstacle et de la cible ont été choisies de manière à empêcher le véhicule de converger directement vers cette dernière. Nous définissons les trois distances de référence $d_+ = 4.5$ mètres et $d_0 = 3.5$ mètres pour la première méthode, $d_+ = 5$ mètres, $d_0 = 3$ mètres, et $d_- = 2$ mètres pour la seconde. Enfin, notons que les bornes maximales sur les vitesses sont définies par : $|v| \leq 0.9$ m/s, $|\omega| \leq 1$ rad/s, $\dot{q}_{pl} \leq 1.45$ rad/s. La vitesse de sécurité est quant à elle fixée à 0.5 m/s.

Les figures IV.24 et IV.25 représentent respectivement les trajectoires du robot obtenues pour les première et seconde méthodes. Pour chacune d'entre elles, on retrouve les trois étapes de la stratégie de commande que nous avons adoptée. Au début de la tâche, le robot exécute une tâche référéncée vision peu contraignante, mais suffisante pour permettre de conserver les indices visuels dans le champ de vision de la caméra. La progression vers la cible est alors assurée soit par la définition d'une deuxième fonction de tâche, soit par la spécification externe de la vitesse linéaire (cf. figure IV.29). Ainsi, pendant cette phase, le robot cherche essentiellement à centrer la cible, sa vitesse angulaire s'annulant dès que la caméra est correctement positionnée (cf. figures IV.30 et IV.31). Ensuite,

15. La non collision sera garantie pour la deuxième méthode dans la mesure où l'angle $\bar{\alpha}$ tendra suffisamment rapidement vers α .

lorsque le véhicule franchit l'enveloppe ξ_+ , l'obstacle est détecté. Dans la première méthode proposée, μ augmente progressivement jusqu'à atteindre 1 sur l'enveloppe ξ_0 . Le robot doit alors accélérer pour converger vers la cible avec la même dynamique malgré le mouvement de contournement (cf. figure IV.28). Dans la deuxième technique, au contraire, lorsque l'enveloppe ξ_+ est franchie, le robot freine progressivement jusqu'à atteindre l'enveloppe ξ_- avec la vitesse de sécurité spécifiée (cf. figure IV.29). Ce n'est qu'à cet instant-là que débute vraiment la phase d'évitement pour cette méthode puisque μ vaut alors 1.

Néanmoins, quelle que soit la technique employée, le robot est commandé de manière à assurer simultanément le contournement de l'obstacle et l'asservissement visuel. De ce fait, les indices visuels ne sont pas perdus, et leur évolution n'est pas perturbée (cf. figures IV.26 et IV.27). Pendant cette phase, la platine s'écarte de la base de manière à continuer à suivre la cible pendant que cette dernière évite l'obstacle, comme le montrent les variations des différentes vitesses angulaires sur les figures IV.30, IV.31, IV.32 et IV.33. Enfin, lorsque la condition de sortie $\theta_{pi} = 0$ intervient, l'exécution simultanée de l'asservissement visuel et de l'évitement est abandonnée pour reprendre celle de la tâche référencée vision initiale. Le robot continue alors de converger vers la cible jusqu'à ce qu'il en soit suffisamment proche (i.e., l'erreur $s - s^*$ devient inférieure à un seuil préfixé). A cet instant, on bascule vers la tâche classique de positionnement qui assure la stabilisation finale de la caméra face à la cible. La qualité de cette stabilisation est intimement liée au choix du gain assurant la décroissance exponentielle de l'erreur $C(s - s^*)$. En effet, comme la commutation vers cette dernière tâche se produit uniquement lorsque le robot se trouve près de la cible, le choix d'un gain λ suffisamment grand est nécessaire pour assurer un bon positionnement de la caméra, un gain trop faible ne permettant pas de s'avancer suffisamment rapidement vers la cible. D'autre part, le basculement entre les lois $\ddot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{pos}$ induit une augmentation des différentes vitesses et plus particulièrement de la vitesse linéaire. Ce phénomène est d'ailleurs mis en exergue sur la figure IV.28 où le gain λ a été choisi de manière à bien visualiser la phase de stabilisation de la caméra. Le choix de ce gain est donc crucial pour le comportement du système au voisinage de la cible, et une valeur trop grande peut conduire à des problèmes de saturation, surtout si la vitesse linéaire est élevée au moment du basculement comme cela peut se produire pour la deuxième méthode. Ainsi, comme dans tout problème d'automatique, il y a un compromis à trouver entre un positionnement correct de la caméra et des commandes acceptables pour le robot. Dans la deuxième méthode, nous avons tenté de mettre en place un tel compromis en choisissant λ de telle sorte que la vitesse linéaire représentée sur la figure IV.29 ne soit que peu perturbée par le basculement, le positionnement final obtenu étant alors moins

précis que pour la première technique (cf. figures IV.24 et IV.25). Enfin, les bornes maximales sur les vitesses sont respectées.

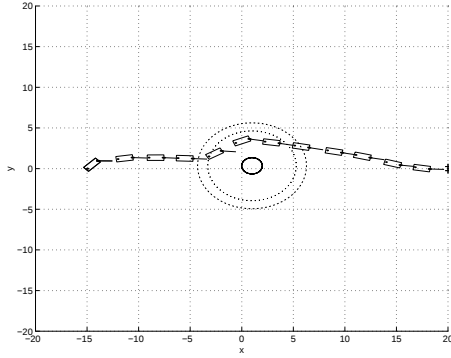


FIG. IV.24 – *Trajectoire du robot pour la première méthode*

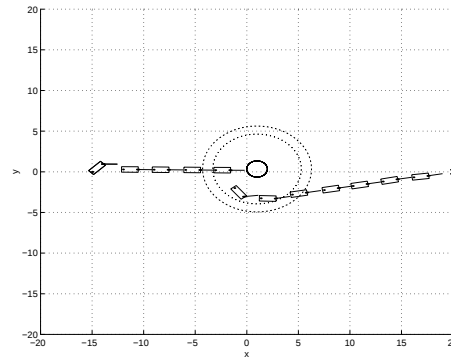


FIG. IV.25 – *Trajectoire du robot pour la deuxième méthode*

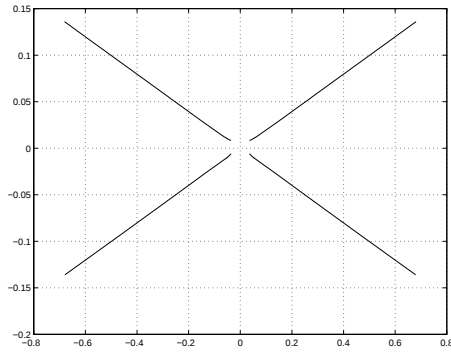


FIG. IV.26 – *Evolution des indices visuels dans le plan image pour la première méthode*

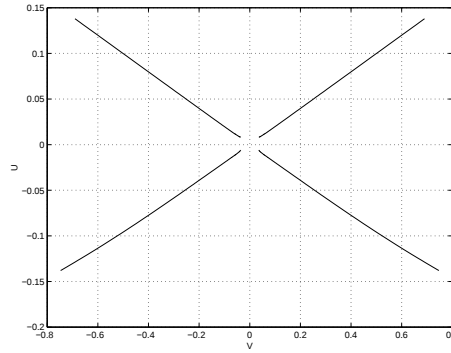


FIG. IV.27 – *Evolution des indices visuels dans le plan image pour la deuxième méthode*

Les deux méthodes présentées ici permettent à un robot mobile muni d'une platine de positionner sa caméra face à une cible dans un environnement encombré. Elles tirent leur spécificité de la définition (tant que le robot reste loin de la cible) d'une tâche référencée vision peu contraignante qui libère des degrés de liberté permettant de contourner un obstacle ou de réaliser tout autre tâche nécessaire dans l'espace libre. Il est ainsi possible d'exécuter simultanément l'asservissement visuel et l'évitement. De plus, la définition externe de la vitesse linéaire proposée dans la deuxième méthode permet de réguler cette dernière en

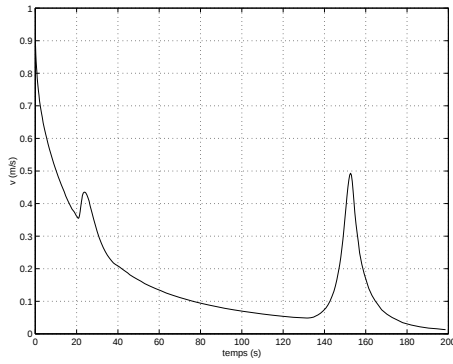


FIG. IV.28 – *Evolution temporelle de la vitesse linéaire pour la première méthode*

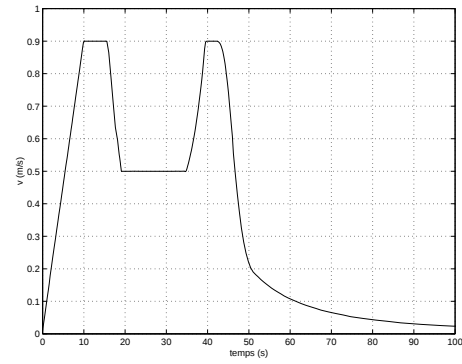


FIG. IV.29 – *Evolution temporelle de la vitesse linéaire pour la deuxième méthode*

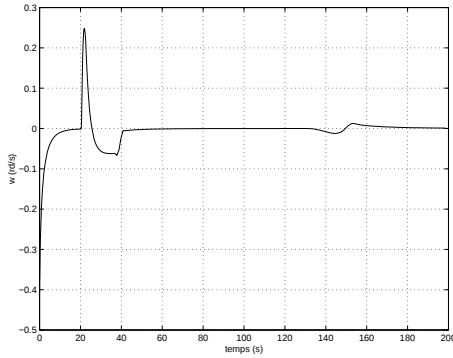


FIG. IV.30 – *Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la base pour la première méthode*

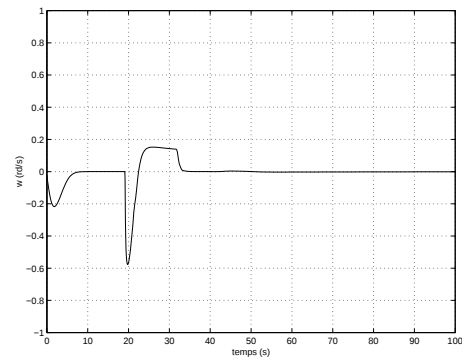


FIG. IV.31 – *Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la base pour la deuxième méthode*

fonction de l'environnement perçu par le robot, et donc de s'affranchir de l'ajustement empirique des gains de commande jusqu'ici nécessaire (voir sous-section IV.2.2.3 ou [Cadenat *et al.* 99a]).

IV.2.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté un ensemble de méthodes permettant à un robot mobile muni d'une platine de réaliser une tâche référencée multi-capteurs. Celle-ci consiste à positionner une caméra face à une cible en environnement encombré. Les techniques proposées reposent sur la fusion des informations sensorielles au niveau de la commande, et consistent à synthétiser un correcteur

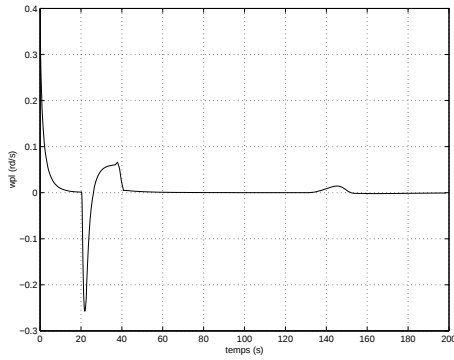


FIG. IV.32 – *Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la platine pour la première méthode*

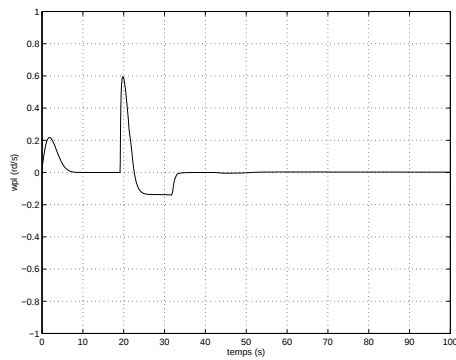


FIG. IV.33 – *Evolution temporelle de la vitesse angulaire de la platine pour la deuxième méthode*

global à partir de deux correcteurs, l'un réalisant l'asservissement visuel, l'autre effectuant l'évitement.

Nous avons d'abord modélisé ce problème en définissant une liaison virtuelle rigide entre la caméra et l'environnement. Celle-ci contraignant l'ensemble des degrés de liberté du robot n'offre aucune possibilité de redondance : l'asservissement visuel et l'évitement doivent alors être exécutés séquentiellement. Nous avons proposé trois méthodes : la première, basée sur le formalisme des potentiels classiques, ne permet pas de garantir la faisabilité de la tâche du fait de la présence conjointe de l'asservissement visuel et de la loi d'évitement pendant le contournement de l'obstacle. Afin de répondre à ce problème, nous avons développé deux nouvelles techniques qui reposent sur la séparation de ces deux lois et la désolidarisation de la base et la platine. A l'aide de ces deux approches, la faisabilité de la tâche peut être garantie.

Cependant, la définition d'une liaison virtuelle rigide surcontraint le mouvement du robot et interdit la réalisation simultanée de la tâche de positionnement et de l'évitement. C'est pourquoi, dans la seconde approche proposée, nous avons considéré une tâche référencée vision moins contraignante lorsque le robot se trouve loin de la cible. Nous bénéficions ainsi de degrés de liberté supplémentaires pour contourner un éventuel obstacle. L'asservissement visuel et l'évitement peuvent alors être exécutés simultanément, le découplage de la base et la platine n'étant dans ce cas plus nécessaire. Nous avons ainsi développé, en collaboration avec Dominique Dedieu, deux méthodes reposant directement sur ce principe qui présentent l'avantage de laisser libres des degrés de liberté nécessaires pour l'évitement et inutilement contraints par la tâche référencée vision de positionnement

classique.

Dans ces travaux, nous avons considéré un robot mobile muni d'une simple platine commandable en lacet, et montré comment la définition d'une liaison virtuelle moins contraignante pouvait permettre l'exécution simultanée de l'asservissement visuel et de l'évitement. La redondance nécessaire pour réaliser une telle tâche provient donc de la *définition même* de la tâche référencée vision. Néanmoins, si l'on souhaite absolument réaliser la tâche de positionnement classique et le contournement des obstacles simultanément, le robot considéré ne présente plus suffisamment de degrés de liberté. C'est pourquoi, dans la section suivante, nous nous proposons d'introduire *mécaniquement* de la redondance par le biais d'un bras manipulateur, et d'étudier l'intérêt de cette approche.

IV.3 Cas d'un manipulateur mobile équipé d'une caméra

La commande de manipulateurs mobiles a été relativement bien étudiée dans l'espace des configurations ou l'espace opérationnel. Le lecteur intéressé peut se reporter à [Foulon 98] pour une étude bibliographique détaillée. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons à la commande référencée multi-capteurs d'un tel robot. Nous considérons une base mobile munie d'un laser SICK 2D et équipée d'un bras manipulateur sur lequel est montée une caméra. Ce bras comporte six degrés de liberté, mais sera bloqué dans une configuration simulant un manipulateur plan redondant à deux liaisons (cf. figure II.4). Seuls les axes 1 et 5 seront commandés. Cette restriction permet de considérer un robot de même structure que le véhicule précédent, et donc d'étendre plus facilement les résultats déjà obtenus. De plus, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II, les cibles considérées se situent à la même hauteur que le centre optique de la caméra. De ce fait, seuls des mouvements plans sont nécessaires pour réaliser l'asservissement visuel, et le robot représenté sur la figure II.4 suffit pour remplir nos objectifs.

Comme dans le cas précédent, la tâche référencée vision de positionnement contraint trois actionneurs, mais quatre sont maintenant disponibles. Il y a donc redondance, et notre objectif est précisément d'exploiter cette redondance pour contourner les obstacles tout en continuant à réaliser la tâche référencée vision de positionnement. La liaison virtuelle ainsi imposée est extrêmement contraignante, et les mouvements permis au robot pendant la phase d'évitement sont de ce fait relativement réduits. Donc, seuls des obstacles de petite taille ou peu gênants pourront être contournés. Néanmoins, en développant ces travaux, nous avons voulu montrer qu'il était possible, moyennant l'introduction de degrés de

liberté supplémentaires, d'effectuer simultanément la tâche de positionnement et l'évitement.

Nous proposons deux approches distinctes : la première consiste à définir deux objectifs primaires caractérisant l'asservissement visuel et l'évitement, tandis que la seconde repose sur le formalisme des tâches redondantes développé dans [Samson *et al.* 91]. Afin que le problème de commande soit bien posé, nous supposons que les obstacles sont suffisamment écartés pour éviter les détections multiples, sources d'erreur. En outre, afin de garantir que la cible ne sera pas confondue avec un obstacle, nous faisons l'hypothèse que la distance finale entre la base mobile portant le laser SICK 2D et la cible reste strictement supérieure à la distance de sécurité sur laquelle le robot sera asservi en phase d'évitement.

IV.3.1 Méthodes reposant sur la définition de deux objectifs primaires

Dans cette approche, l'asservissement visuel et l'évitement sont considérés comme deux tâches de même priorité. Nous définissons deux objectifs primaires, le premier réalisant la tâche référencée vision seule, le second effectuant à la fois cette même tâche référencée vision et l'évitement. La réalisation de la tâche robotique désirée requiert donc un basculement entre ces deux objectifs en fonction de la distance à l'obstacle. La stratégie de commande envisagée reste similaire à celle que nous avons développée dans la sous-section IV.2.1 : tant que le robot se trouve loin des obstacles, il doit effectuer la tâche référencée vision seule, c'est-à-dire satisfaire le premier objectif. Par contre, dès qu'il entre dans le voisinage d'un de ces obstacles, il est commandé de manière à réaliser simultanément l'asservissement visuel et l'évitement, i.e., de manière à remplir le deuxième objectif. La synthèse de la loi de commande repose sur la fusion de ces deux objectifs en fonction de la distance à l'obstacle. Nous avons développé deux approches distinctes :

- La première consiste à fusionner directement les deux objectifs primaires pour définir une tâche globale, puis à déterminer un correcteur permettant de la réguler à zéro. *La fusion se fait alors au niveau de la tâche.*
- La seconde, par contre, synthétise deux correcteurs permettant de satisfaire séparément les deux objectifs, puis les combine de manière à définir un correcteur global. *La fusion se fait alors au niveau de la commande* comme dans la section précédente. Cette méthode s'appuiera sur l'équation IV.1.

Nous proposons donc deux structures de commande différentes selon le niveau de fusion des objectifs primaires. Avant de présenter séparément chacune de ces

techniques et leur stratégie de contournement, nous introduisons les fonctions de tâche définissant les deux objectifs primaires.

IV.3.1.1 Définition des deux objectifs primaires

Dans cette sous-section, nous cherchons à définir deux objectifs primaires, le premier caractérisant la tâche référencée vision, le deuxième modélisant l'exécution simultanée de cette même tâche et de l'évitement.

Nous choisissons comme premier objectif la fonction de tâche proposée dans le chapitre II que nous rappelons pour mémoire ci-dessous :

$$e_{AV} = \begin{pmatrix} C(s - s^*) \\ q_5 - q_5^* \end{pmatrix} \quad (IV.54)$$

où s et s^* représentent respectivement le vecteur des informations visuelles courant et désiré, tandis que q_5 et q_5^* caractérisent les configurations courante et désirée de la cinquième liaison du bras. La fonction d'erreur précédente permet de réaliser la tâche référencée vision de positionnement et exploite la redondance du robot pour amener puis maintenir l'angle q_5 à une valeur désirée q_5^* . En effet, l'asservissement visuel contraignant seulement trois degrés de liberté peut déjà être exécuté par un robot muni d'une simple platine, et ne nécessite pas l'utilisation de la dernière articulation du bras. Nous avons fait le choix de réguler q_5 autour d'une valeur de référence q_5^* définie de telle sorte que le bras reste tendu. Cependant, contraindre ainsi l'articulation q_5 peut poser problème si la première liaison du bras ne peut tourner suffisamment pour exécuter correctement la tâche. Néanmoins, notre propos ici est de déterminer deux tâches primaires bien conditionnées pour ensuite les fusionner soit au niveau de la commande, soit au niveau de la tâche. Nous ne cherchons donc pas à exploiter au mieux le degré de liberté laissé libre par la tâche référencée vision lorsque le robot se trouve loin des obstacles.

La fonction de tâche définie par l'équation IV.54 vérifie la propriété de ρ -admissibilité puisque sa matrice jacobienne J_{AV} est régulière autour de la trajectoire solution [Samson *et al.* 91]. En effet, son déterminant a pour valeur $-D_x$ et est non nul quelle que soit la configuration du robot, puisque D_x représente la distance entre le point représentatif du robot M et le point O_0 , origine du repère de base du bras manipulateur. Nous rappelons ci-après l'expression de J_{AV} , les matrices C , L_{bras} , et J_{bras} conservant la même signification que dans le chapitre II :

$$J_{AV} = \begin{pmatrix} CL_{bras}J_{bras} \\ J_{q_5} \end{pmatrix} \quad \text{où } J_{q_5} = \frac{\partial q_5}{\partial q^T} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (IV.55)$$

Il reste maintenant à déterminer e_{EV} . Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, la stratégie d'évitement envisagée est similaire à celle développée dans la section IV.2. Nous définissons, comme précédemment, une enveloppe de sécurité ξ_0 située à une distance d_0 de chaque obstacle (cf. figure IV.1) sur laquelle nous asservirons le robot en phase d'évitement. Ainsi, lorsqu'il y a risque de collision, i.e., lorsque le véhicule pénètre dans la zone délimitée par l'enveloppe ξ_0 , nous considérons la fonction d'erreur suivante :

$$e_{EV} = \begin{pmatrix} C(s - s^*) \\ d - d_0 \end{pmatrix} \quad (IV.56)$$

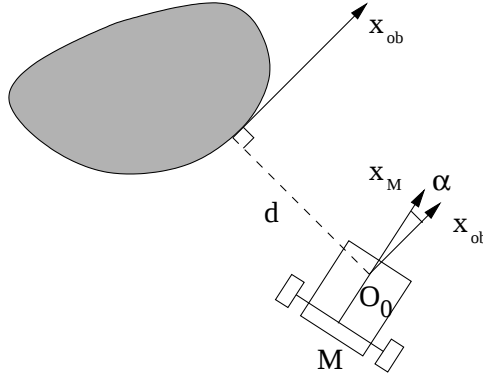
où d représente la plus courte distance entre le robot et l'obstacle. La régulation à zéro de e_{EV} garantit donc à la fois la conservation en vue de la cible et la non collision. Néanmoins, la distance d doit être définie judicieusement. En effet, elle dépend de la configuration du robot et intervient dans l'expression de la matrice jacobienne de la tâche précédente. De ce fait, elle doit être choisie de manière à garantir la ρ -admissibilité de e_{EV} , autrement dit de manière à assurer la régularité de sa matrice jacobienne J_{EV} . Tout choix de d ne permet pas de satisfaire cette propriété. En effet, considérons le formalisme du suivi de chemin introduit dans la section IV.2. Il consiste à définir d comme la plus courte distance entre le point représentatif M du robot et l'obstacle (cf. figure IV.11). D'après le système IV.17, la dynamique de d s'exprime par $\dot{d} = v \sin \alpha$ où α désigne l'orientation relative entre le véhicule et l'obstacle. La matrice jacobienne J_{EV} s'écrit alors :

$$J_{EV} = \frac{\partial e_{EV}}{\partial q^T} = \begin{pmatrix} CL_{bras}J_{bras} \\ J_d \end{pmatrix} \quad \text{où } J_d = \frac{\partial d}{\partial q^T} = [\sin \alpha \ 0 \ 0 \ 0] \quad (IV.57)$$

Or, cette matrice n'est plus de rang plein dès que $\alpha = 0$, i.e., dès que le robot se trouve parallèle à l'obstacle. Ce phénomène est dû à la non holonomie de la base mobile. Il est nécessaire ici de choisir un point holonome du robot pour définir correctement la distance d . C'est pourquoi, nous considérons maintenant l'origine O_0 du repère de base $\mathcal{R}_0$ lié au bras manipulateur, et définissons d comme la plus courte distance entre O_0 et l'obstacle (cf. figure IV.34). La tâche d'évitement définie par l'équation IV.56 consistera donc à asservir le point O_0 (et non plus le point M) sur l'enveloppe ξ_0 tout en réalisant la tâche référencée vision.

L'angle α étant maintenant défini par l'angle entre la direction du véhicule x_M et la tangente à l'obstacle x_{ob} , la dynamique de d s'écrit $\dot{d} = v \sin \alpha - \omega D_x \cos \alpha$, et J_{EV} s'exprime comme suit :

$$J_{EV} = \begin{pmatrix} CL_{bras}J_{bras} \\ J_d \end{pmatrix} \quad \text{où } J_d = [\sin \alpha \ -D_x \cos \alpha \ 0 \ 0] \quad (IV.58)$$

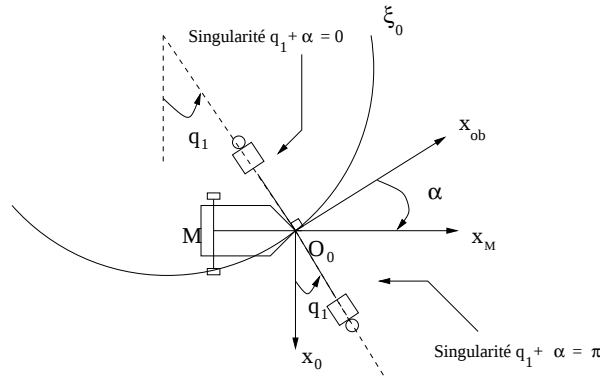
FIG. IV.34 – Définition de la distance d

J_d étant toujours de rang plein égal à 1, J_{EV} est régulière lorsque $\alpha = 0$. Notons que cette matrice apparaît dès lors comme un *torseur global* permettant de réaliser à la fois la tâche référencée vision et l'évitement. Néanmoins, cette exécution simultanée n'étant possible que tant que ces deux tâches restent compatibles, il est nécessaire de déterminer les singularités de J_{EV} afin de mettre en évidence les limites de validité des lois de commande qui seront par la suite élaborées. Pour cela, nous calculons son déterminant à l'aide du logiciel de calcul formel *maple*, et obtenons le résultat suivant :

$$\det(J_{EV}) = D_x(d_1 + d_2) \sin(q_1 + \alpha) \quad (\text{IV.59})$$

Il y a donc singularité dès que l'angle $q_1 + \alpha$ devient égal à 0 ou à π . Cette singularité se produit lorsque le bras devient perpendiculaire au chemin suivi (cf. figure IV.35), c'est-à-dire lorsque l'asservissement visuel et l'évitement ne sont plus compatibles. Ces deux tâches ne peuvent plus être exécutées simultanément, et, dans ce cas, seul un découplage de la base et du bras peut permettre de continuer à exécuter la tâche robotique. La tâche référencée vision et l'évitement sont alors réalisés séquentiellement et non plus parallèlement. Néanmoins, tant que l'on reste loin de la singularité, la fonction d'erreur IV.56 définit une fonction de tâche ρ -admissible et permet d'exploiter la redondance du bras pour réaliser en même temps l'asservissement visuel et le contournement des obstacles.

Il reste maintenant à déterminer la loi de commande permettant au robot d'effectuer la tâche robotique désirée, i.e., le positionnement de la caméra face à une cible en environnement encombré. La synthèse de cette loi repose sur la fusion des deux objectifs primaires e_{AV} et e_{EV} . Celle-ci peut être réalisée soit au niveau de la tâche, soit au niveau de la commande. Nous décrivons donc maintenant les deux structures de contrôle correspondantes.

FIG. IV.35 – *Singularité de la matrice jacobienne J_{EV}*

IV.3.1.2 Fusion au niveau de la tâche

Cette approche consiste à fusionner directement les deux objectifs primaires précédents pour définir une tâche globale, puis à déterminer un correcteur permettant de la réguler à zéro. Nous considérons la fonction de tâche suivante :

$$e = (1 - \mu) e_{AV} + \mu e_{EV} \quad (\text{IV.60})$$

où e_{AV} et e_{EV} sont respectivement définis par les équations IV.54 et IV.56, et $\mu \in [0, 1]$ est une fonction scalaire dépendant de la distance à l'obstacle que nous allons maintenant déterminer. La stratégie d'évitement est présentée sur la figure IV.37. Lorsque le robot se trouve loin des obstacles, c'est-à-dire hors de la région délimitée par l'enveloppe ξ_0 , μ est fixé à 0, et la tâche à réaliser est définie par $e = e_{AV}$. Par contre, dès que le véhicule franchit l'enveloppe ξ_0 , μ prend la valeur 1, et la tâche globale à effectuer se réduit alors à $e = e_{EV}$. Cependant, une telle évolution de μ introduit une discontinuité dans l'expression de la tâche globale e donnée par l'équation IV.60. Aussi, définissons-nous une deuxième enveloppe notée ξ_+ située à une distance $d_+ = d_0 + \varepsilon$ de l'obstacle où ε représente la largeur du couloir compris entre les deux enveloppes. Lorsque le robot se trouve dans ce couloir, μ varie continûment entre 0 et 1. D'autre part, μ étant fonction de la distance à l'obstacle dépend également de l'état du robot. De ce fait, la dérivée de μ intervient dans la jacobienne de e et donc dans la synthèse de la loi de commande (voir plus loin les équations IV.64 et IV.65). Il est donc nécessaire de définir μ comme une fonction de classe $\mathcal{C}^1$, et nous proposons l'évolution présentée sur la figure IV.36 :

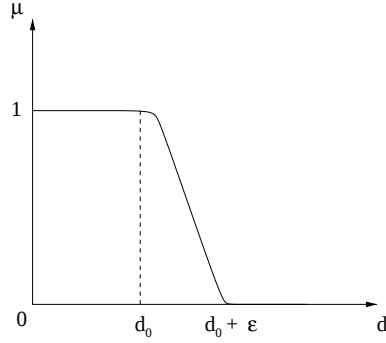


FIG. IV.36 – Evolution de μ pour la fusion des objectifs primaires à la tâche

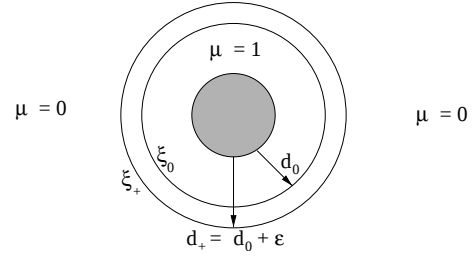


FIG. IV.37 – Stratégie d'évitement pour la fusion des objectifs primaires à la tâche

Afin de suivre ce profil, nous définissons μ comme suit :

$$\mu(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d > d_0 + \varepsilon \\ 1 & \text{si } d < d_0 \\ a_1 (d - d_0)^3 + a_2 (d - d_0)^2 + a_3 (d - d_0) + a_4 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.61})$$

Les coefficients a_i ($i = \{1, 2, 3, 4\}$) sont déterminés en considérant les conditions aux limites que doivent vérifier simultanément μ et sa dérivée μ' par rapport à d :

$$\begin{cases} \mu(d_0 + \varepsilon) = 0 \\ \mu(d_0) = 1 \\ \mu'(d_0 + \varepsilon) = 0 \\ \mu'(d_0) = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.62})$$

La résolution de ce système conduit au résultat suivant :

$$a_1 = \frac{2}{\varepsilon^3} \quad a_2 = -\frac{3}{\varepsilon^2} \quad a_3 = 0 \quad a_4 = 1 \quad (\text{IV.63})$$

Il reste maintenant à synthétiser la loi de commande permettant au robot d'exécuter la tâche globale e . Celle-ci sera parfaitement réalisée si elle est régulée à zéro. Nous choisissons d'imposer une décroissance exponentielle comme dans le cas de l'asservissement visuel classique, et obtenons la loi de commande suivante :

$$\dot{q} = -\lambda J_T^{-1} e \quad \lambda > 0 \quad (\text{IV.64})$$

où J_T désigne la matrice jacobienne associée à la fonction de tâche e et s'exprime comme suit :

$$J_T = (1 - \mu) J_{AV} + \mu J_{EV} + (e_{EV} - e_{AV}) J_\mu \quad (\text{IV.65})$$

avec $J_\mu = \frac{\partial \mu}{\partial q^T} = \frac{\partial \mu}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial q^T}$. La dérivée partielle de μ par rapport à d est naturellement obtenue à partir de l'équation IV.61, tandis que celle de d par rapport à q est directement donnée par J_d (cf. équation IV.58). Lorsque μ varie entre 0 et 1, l'expression de J_T et de son déterminant devient extrêmement complexe et ne permet plus de conclure quant à la ρ -admissibilité de la tâche globale. Néanmoins, comme nous imposons une décroissance exponentielle pour réguler d vers d_0 , μ tend rapidement vers 1. Donc, si la largeur du couloir ε est choisie suffisamment faible, on peut considérer que la seule singularité significative est celle où le bras se trouve perpendiculaire à l'enveloppe ξ_0 .

Remarque 16 *Comme le torseur d'interaction L considéré dans l'expression de J_T est calculé autour de la position finale $s = s^*$, cette matrice définissant la loi de commande IV.64 n'est qu'une matrice estimée que nous pouvons noter $\hat{J}_T$. La stabilité de cette loi repose alors sur la positivité de la matrice $J_T \hat{J}_T^{-1}$ [Samson et al. 91] [Chaumette 90]. Si la configuration initiale de la caméra est choisie relativement proche de sa configuration désirée alors le produit précédent tend vers l'identité et la loi IV.64 est stable. Dans le cas contraire, il n'est plus possible de conclure, l'expression de ce produit de matrices devenant trop complexe.*

Finalement, la stratégie de commande envisagée se déroule en trois phases distinctes. Tant que d reste supérieure $d_0 + \varepsilon$, le robot se trouve hors de la zone dangereuse, et μ est fixé à 0. Le véhicule est alors piloté de manière à exécuter la tâche $e = e_{AV}$. Il converge vers la cible, tandis que la cinquième articulation du bras est régulée autour de sa valeur de consigne. Cette articulation n'intervient donc pas dans la réalisation de la tâche référencée vision. Par contre, lorsque le robot franchit l'enveloppe ξ_+ , $d \in]d_0, d_0 + \varepsilon[$ et μ varie continûment entre 0 et 1. La tâche globale à réaliser e s'exprime alors comme une combinaison linéaire de e_{AV} et e_{EV} et s'écrit :

$$\begin{pmatrix} C(s - s^*) \\ (1 - \mu)(q_5 - q_5^*) + \mu(d - d_0) \end{pmatrix} \quad (\text{IV.66})$$

La contrainte sur la dernière liaison du bras est donc progressivement relâchée pour bénéficier de la redondance, et réaliser simultanément la tâche référencée vision et l'évitement d'obstacle. Le sens de contournement est défini par l'asservissement visuel, et correspond à celui qui permet d'assurer la compatibilité entre les deux tâches, i.e, celui qui permet de faire converger à la fois d vers d_0 et s vers s^* . Le point O_0 est alors asservi sur l'enveloppe ξ_0 , tandis que le bras s'écarte de la base mobile pour assurer un positionnement correct de la caméra, réalisant

ainsi parfaitement la tâche référencée vision. Les indices visuels ne peuvent donc jamais être perdus, ni voir leur évolution perturbée pendant tout le mouvement du robot. Néanmoins, ici apparaît la limitation majeure de notre méthode : la nécessaire compatibilité de l'asservissement visuel et de l'évitement. En effet, la tâche référencée vision considérée contraint la caméra sur un "rail virtuel", interdisant tout mouvement latéral. De ce fait, les possibilités de contournement permises à la base se trouvent extrêmement réduites, et limitées par la taille du bras manipulateur. La valeur de la distance d_0 revêt dès lors une importance capitale et doit être choisie de telle sorte que l'asservissement visuel et l'évitement puissent être réalisés simultanément. Pour cette raison, seuls des obstacles de petite taille ou peu gênants de par leur configuration pourront être évités. Enfin, lorsque, pour continuer à faire tendre la deuxième composante de e vers zéro, il est nécessaire de diminuer $q_5 - q_5^*$ plutôt que de réduire $d - d_0$, l'obstacle est dépassé et ne présente plus de danger. μ diminue progressivement vers zéro, contraignant à nouveau l'articulation q_5 à rester dans le prolongement du bras. Le robot quitte alors naturellement l'enveloppe de sécurité ξ_0 grâce au basculement entre les tâches consistant à réguler à zéro les erreurs $q_5 - q_5^*$ et $d - d_0$.

Remarque 17 *La distance d n'atteindra jamais exactement la valeur d_0 puisqu'elle est régulée exponentiellement vers cette valeur. Le robot ne pourra donc pas pénétrer dans la zone délimitée par l'enveloppe ξ_0 , garantissant ainsi la non collision. μ reste donc strictement inférieur à 1, mais sera très proche de cette valeur pendant toute la phase d'évitement où le robot est asservi sur ξ_0 . L'influence du premier objectif e_{AV} est alors négligeable.*

La loi de commande IV.64 ne prend pas en compte les limites physiques du robot. Aussi, lorsque les commandes produites violent ces contraintes, nous les bornons par leur valeur maximale. Nous ne prenons donc en compte la saturation des actionneurs qu'a posteriori. Cependant, un fonctionnement prolongé dans ce mode peut conduire à l'échec de la tâche. En effet, la loi de commande IV.64 synthétise des vitesses garantissant la parfaite réalisation de l'asservissement visuel et de l'évitement. De ce fait, si la base mobile ou le bras manipulateur ne pivotent plus suffisamment, les indices visuels glissent latéralement dans l'image et peuvent être perdus. Le choix d'un gain λ suffisamment faible ou la mise en œuvre d'un algorithme similaire à celui que nous avons développé dans le paragraphe IV.2.2.3 suffit pour se prémunir contre ce problème.

Nous proposons maintenant quelques résultats de simulation. La tâche robotique à réaliser consiste à positionner la caméra face à une cible en environnement encombré. L'obstacle considéré est un cylindre de rayon 1 mètre et centré au point

de coordonnées $(3, 6)$ dans le repère de la scène. La configuration initiale du robot est définie par $x = 0.7$ mètre, $y = 7$ mètres, $\theta = 0$, $q_1 = 90$ degrés, et $q_5 = 0$. Elle a été choisie de telle sorte que l'obstacle gêne le véhicule dans sa progression vers la cible. Autour de cet obstacle, nous définissons une enveloppe de sécurité située à $d_0 = 0.6$ mètre, puis une deuxième enveloppe garantissant la continuité située à $d_+ = 0.7$ mètre. Le couloir entre les deux enveloppes est donc de largeur $\varepsilon = 0.1$ mètre. Les bornes maximales des vitesses sont les suivantes : $v < 0.9$ m/s, $\omega < 1$ rad/s, $\dot{q}_1 < 1.4$ rad/s, et $\dot{q}_5 < 2$ rad/s. Enfin, le gain λ est pris égal à 0.1, tandis que q_5^* , la valeur désirée de q_5 , est fixée à 0 pour conserver le bras tendu.

La trajectoire du robot est représentée sur la figure IV.38. L'évolution de μ (figure IV.40) montre que la tâche s'exécute en trois étapes :

- Initialement, le robot se trouve hors de la zone dangereuse, et μ est fixé à 0. Le véhicule exécute la tâche référencée vision tout en maintenant q_5 à sa valeur d'origine 0. La commande envoyée sur la dernière articulation du bras est donc nulle pendant cette période (cf. figure IV.45). D'autre part, les indices visuels sont initialement centrés dans l'image et le robot n'a pas à pivoter pour corriger l'orientation de la caméra. Les vitesses angulaires de la base et la première articulation du bras représentées respectivement sur les figures IV.43 et IV.44 sont donc également nulles durant cette phase.

- Lorsque le robot pénètre dans la zone définie par l'enveloppe ξ_+ , μ augmente progressivement, et tend¹⁶ vers 1 lorsque le "nez" du véhicule est asservi sur l'enveloppe ξ_0 . Le bras compense alors le mouvement de contournement de la base mobile de telle sorte que d'une part, la tâche référencée vision continue à être parfaitement réalisée, et que d'autre part, le point O_0 soit maintenu sur ξ_0 . L'évolution des indices visuels ne peut donc être perturbée pendant toute l'exécution de la tâche, et la conservation de la cible dans le champ de vision de la caméra est garantie (cf. figure IV.39). Enfin, la figure IV.41 montre que le déterminant de la matrice jacobienne J_T reste non nul pendant tout le mouvement du robot, garantissant ainsi la compatibilité de l'asservissement visuel et de l'évitement.

- Finalement, lorsque l'obstacle ne présente plus de danger pour le robot, μ diminue progressivement et s'annule, une fois l'enveloppe ξ_+ franchie. Le véhicule reprend alors l'exécution de l'objectif e_{AV} , et termine la tâche référencée vision en positionnant correctement la caméra face à la cible, tandis que l'articulation q_5 est rapidement ramenée à sa valeur de consigne.

Notons que, le gain λ étant choisi suffisamment faible, les commandes représentées sur les figures IV.42, IV.43, IV.44 et IV.45 ne saturent pas, et ne violent

16. Rappelons que μ ne peut atteindre 1 du fait de la régulation exponentielle de d vers d_0 .

pas les contraintes en accélération.

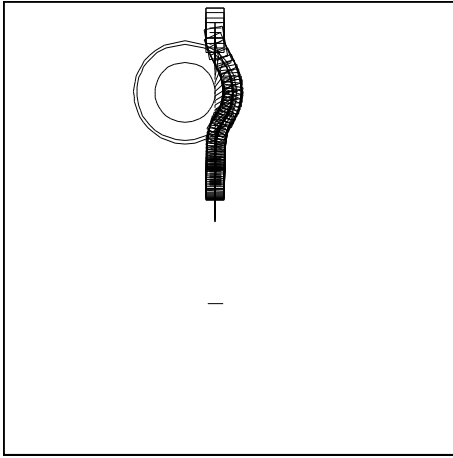


FIG. IV.38 – Trajectoire du robot pour la fusion des objectifs primaires à la tâche

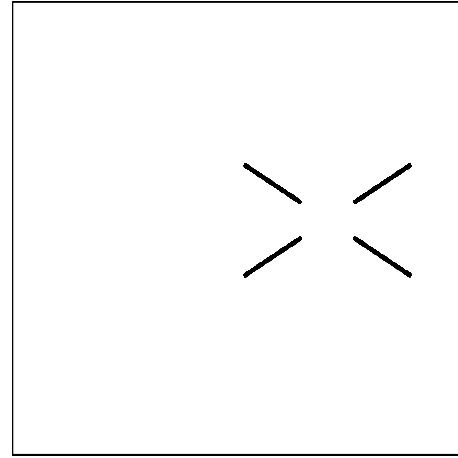


FIG. IV.39 – Evolution des indices visuels pour la fusion des objectifs primaires à la tâche

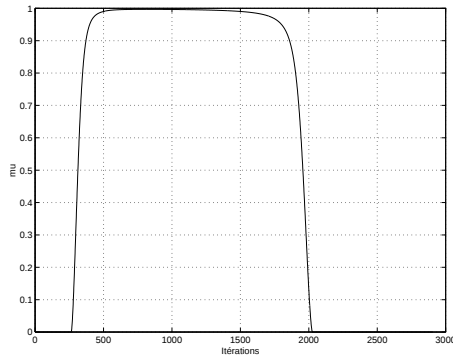


FIG. IV.40 – Evolution de μ pour la fusion des objectifs primaires à la tâche

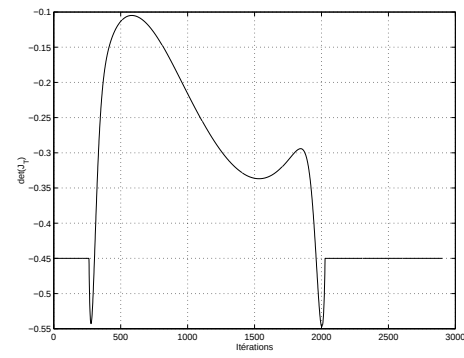


FIG. IV.41 – Déterminant de la matrice jacobienne J_T

Enfin, la figure IV.46 montre que le choix de la distance de sécurité d_0 n'est pas sans influence sur la compatibilité de l'asservissement visuel et de l'évitement. En effet, compte tenu des configurations du robot et de l'obstacle, le choix d'une distance supérieure à la longueur du bras ne permet plus l'exécution simultanée de ces deux tâches, et conduit à la singularité évoquée précédemment où le bras devient perpendiculaire à l'enveloppe ξ_0 .

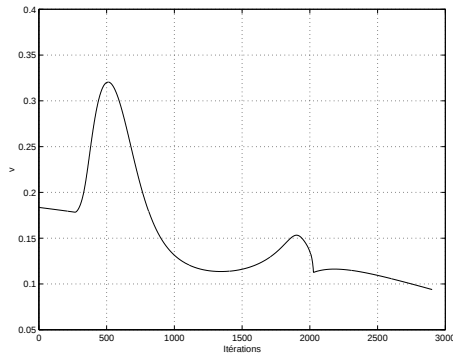


FIG. IV.42 – *Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la tâche*

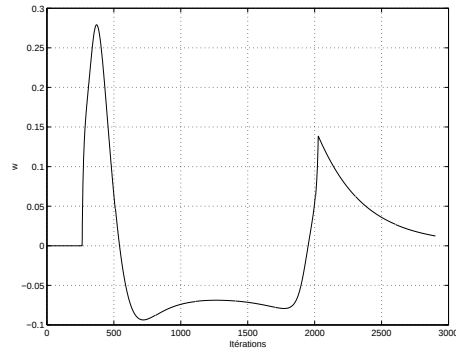


FIG. IV.43 – *Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la tâche*

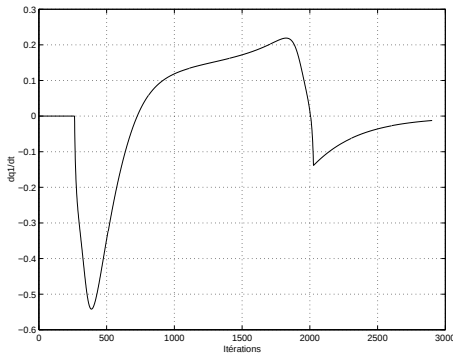


FIG. IV.44 – *Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la tâche*

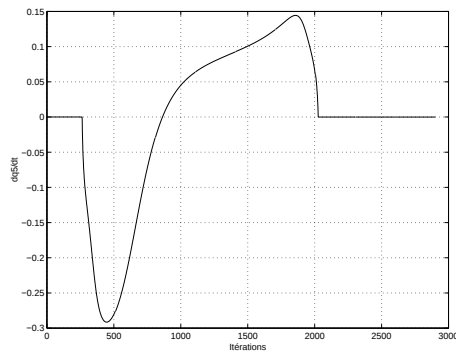


FIG. IV.45 – *Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la tâche*

Nous avons présenté une méthode permettant à un robot mobile équipé d'un bras manipulateur plan à deux degrés de liberté de positionner sa caméra face à une cible en environnement encombré. Elle repose sur l'exploitation de la redondance pour effectuer simultanément l'asservissement visuel et l'évitement. Cependant, la nécessaire compatibilité des deux tâches et le choix d'imposer une liaison virtuelle rigide limitent considérablement les mouvements d'évitement permis à la base mobile. De ce fait, seuls des obstacles peu encombrants ou peu gênants pourront être contournés avec cette dernière méthode. Néanmoins, les résultats obtenus montrent comment la redondance mécanique introduite par le bras peut permettre d'effectuer simultanément une tâche référencée vision et un évitement, et donc de réaliser une véritable tâche référencée multi-capteurs.

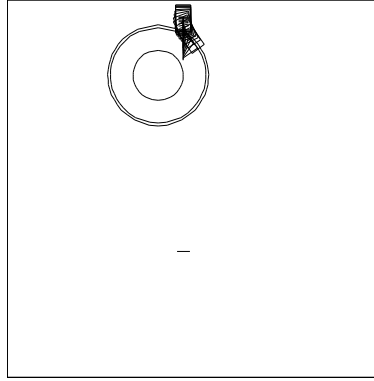


FIG. IV.46 – *Incompatibilité de la tâche référencée vision et de l'évitement lorsque d_0 est trop élevée*

La technique proposée ici s'appuie sur la fusion de deux objectifs primaires au niveau de la tâche. Nous présentons maintenant, dans la lignée des travaux développés dans la section IV.2, une deuxième méthode reposant sur la fusion de ces mêmes objectifs au niveau de la commande.

IV.3.1.3 Fusion au niveau de la commande

Dans la méthode précédente, nous avons déterminé une tâche globale à partir de la définition de deux objectifs primaires, puis avons synthétisé une loi de commande unique permettant de la réaliser. Dans cette approche, au contraire, nous considérons séparément les deux objectifs primaires définis précédemment et synthétisons deux correcteurs permettant de les réguler à zéro. La loi de commande globale est alors obtenue par combinaison linéaire de ces deux correcteurs en fonction de la distance à l'obstacle. La technique de fusion envisagée est donc similaire à celle développée dans la section IV.2. C'est pourquoi, nous exploiterons encore une fois l'équation IV.1 que nous rappelons ci-après pour mémoire :

$$\dot{q} = (1 - \mu) \dot{q}_{AV} + \mu \dot{q}_{EV}$$

Tous les paramètres de cette loi conservent leur signification première. Néanmoins, notons que les vecteurs $\dot{q}$, $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ sont maintenant définis par quatre commandes, et non plus seulement trois. La détermination de la loi de commande précédente requiert donc le calcul de $\dot{q}_{AV}$, $\dot{q}_{EV}$ et μ . Nous nous intéressons dans un premier temps à la synthèse de ces deux correcteurs, avant de présenter la stratégie d'évitement envisagée et l'évolution de μ associée.

Synthèse de $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$

Considérons les deux objectifs primaires e_{AV} et e_{EV} définis respectivement par les équations IV.54 et IV.56. Nous cherchons ici à synthétiser deux correcteurs permettant de les réguler à zéro. Pour cela, nous définissons pour chacun d'entre eux la même décroissance exponentielle, soit : $\dot{e}_{AV} = -\lambda e_{AV}$ et $\dot{e}_{EV} = -\lambda e_{EV}$ avec $\lambda > 0$. $\dot{q}_{AV}$ ayant déjà été déterminé dans le chapitre II de manière à satisfaire cette dynamique est défini par l'équation II.52. Il reste dès lors à synthétiser $\dot{q}_{EV}$. En dérivant e_{EV} , nous obtenons :

$$\dot{q}_{EV} = -\lambda J_{EV}^{-1} e_{EV} \quad (IV.67)$$

où J_{EV} est donnée par l'équation IV.58. La loi de commande précédente reste naturellement valide tant que l'asservissement visuel et l'évitement sont compatibles (cf. figure IV.35).

Stratégie de commande et évolution de μ

Il reste maintenant à déterminer μ . Ce paramètre gère le basculement d'un correcteur vers l'autre en fonction de la distance à l'obstacle. La stratégie d'évitement envisagée est identique à celle proposée dans la section IV.2.1, et repose sur la figure IV.1. Comme précédemment, afin de garantir la continuité de la loi de commande IV.1, nous définissons autour de l'enveloppe de sécurité ξ_0 une deuxième enveloppe notée ξ_+ située à une distance $d_+ = d_0 + \varepsilon$ de l'obstacle (ε représentant la largeur du couloir entre ces enveloppes). Nous obtenons une modélisation similaire à celle développée pour la fusion des objectifs à la tâche (cf. figure IV.37). Néanmoins, contrairement au cas précédent, la dérivée de μ n'intervient pas dans l'expression de la loi de commande IV.1. De ce fait, une fonction de classe $\mathcal{C}^0$ suffit pour définir μ convenablement. Nous considérons donc une simple variation linéaire pour μ lorsque le robot se trouve entre les enveloppes ξ_0 et ξ_+ . μ s'exprime alors comme suit :

$$\mu(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d > d_0 + \varepsilon \\ 1 & \text{si } d < d_0 \\ \frac{-d+d_0+\varepsilon}{\varepsilon} & \text{si } d \in]d_0, d_0 + \varepsilon[\end{cases} \quad (IV.68)$$

La stratégie de commande envisagée se déroule comme suit : lorsque le véhicule se trouve loin des obstacles, μ est fixé à zéro, et le robot est commandé par le correcteur $\dot{q} = \dot{q}_{AV}$. Il réalise donc la tâche référencée vision tout en régulant la cinquième articulation du bras autour de sa valeur de référence.

Par contre, lorsqu'il pénètre dans la zone de danger définie par l'enveloppe ξ_+ , μ varie continûment de 0 vers 1, et le "nez" du robot est progressivement asservi

sur l'enveloppe de sécurité ξ_0 . μ tend alors vers 1, sans toutefois atteindre cette valeur du fait de la régulation exponentielle de d vers d_0 . Le robot exécute à la fois l'asservissement visuel et l'évitement, garantissant ainsi la non collision et la conservation en vue de la cible durant la phase de contournement. Notons que la réalisation simultanée de ces deux tâches différencie clairement cette approche de celles proposées dans la section IV.2. Dans ces méthodes, en effet, le robot n'étant pas redondant, le découplage base/platine devient obligatoire pour continuer à suivre la cible pendant le contournement de l'obstacle.

Enfin, il est nécessaire de quitter l'enveloppe de sécurité avant que la tâche référencée vision et l'évitement ne deviennent incompatibles. En effet, contrairement au cas précédent où la sortie se faisait naturellement grâce à la régulation à zéro de l'erreur "mixte" $(1 - \mu)(q_5 - q_5^*) + \mu(d - d_0)$, ici, lorsque μ tend vers 1, seul $\dot{q}_{EV}$ commande le système. De ce fait, si aucune condition de sortie n'est introduite, le robot va suivre l'enveloppe ξ_0 jusqu'à ce que J_{EV} devienne singulière, i.e., jusqu'à ce que les deux tâches ne puissent plus s'exécuter simultanément. Il est donc nécessaire de détecter l'instant à partir duquel l'obstacle n'est plus dangereux pour le robot en définissant une condition de sortie. Celle-ci est satisfaite lorsque la direction pointée par la première partie du bras définie par le segment O_1O_5 sur la figure II.4 devient tangente à l'enveloppe ξ_0 . Elle se traduit mathématiquement par l'égalité $q_1 = \pi/2$ d'après le choix des repères effectué au chapitre II. Dès que cette condition est vérifiée, le robot doit quitter l'enveloppe. Une variation linéaire de μ pouvant s'avérer insuffisante, nous forçons ce paramètre à diminuer exponentiellement vers zéro. Ainsi, lorsque la condition précédente est remplie, μ doit vérifier:

$$\mu = e^{-k_\mu(d-d'_s)} \text{ où } d'_s = d_s + \frac{\ln(\mu_s)}{k_\mu} \quad (\text{IV.69})$$

où d_s et μ_s représentent respectivement la distance entre le robot et l'obstacle et la valeur de μ lorsque la condition de sortie est satisfaite. La définition de d'_s a juste pour objectif de conserver la continuité de μ quand le robot s'apprête à quitter l'enveloppe de sécurité. Enfin, k_μ est un gain positif définissant la vitesse de convergence de μ vers zéro.

La stabilité de l'équation IV.1 est comme précédemment déduite de la stabilité des correcteurs $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$. Les commentaires étant similaires à ceux développés dans la section IV.2, nous ne les reprenons pas ici. D'autre part, la non collision et la conservation en vue de la cible sont garanties de par la structure de commande considérée. Enfin, la saturation des actionneurs est prise en compte a posteriori de la même manière que dans le cas de la fusion à la tâche. Notons qu'il serait également possible de traiter ce phénomène de la même manière que dans la

section précédente. Finalement, si le gain λ est choisi suffisamment faible pour que les limites physiques du robot ne soient pas violées, la faisabilité de la tâche - qui repose sur l'ensemble de ces propriétés - est garantie.

Résultats de simulation

Nous présentons maintenant quelques résultats de simulation, la tâche considérée consistant toujours à positionner la caméra embarquée face à une cible en environnement encombré. Nous reprenons les mêmes paramètres de simulation que dans le cas de la fusion des objectifs primaires au niveau de la tâche.

La trajectoire du robot obtenue est représentée sur la figure IV.47. La caméra, tout comme dans le cas précédent, reste contrainte sur un "rail virtuel" pendant toute l'exécution de la tâche. L'évolution des indices visuels décrite sur la figure IV.48 n'est donc pas affectée par le mouvement de contournement de la base mobile. Ce phénomène est relativement logique, puisque chacune des commandes $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ intègre l'asservissement visuel à réaliser, et en outre est déterminé de manière à ce que la vitesse de décroissance de l'erreur $C(s - s^*)$ n'évolue pas lorsque l'on bascule d'une commande vers l'autre (λ reste en effet constant).

Les résultats présentés ici sont sensiblement similaires à ceux obtenus dans le cas de la fusion des objectifs primaires au niveau de la tâche. Comme précédemment, l'évolution de μ représentée sur la figure IV.49 met en exergue les trois phases de l'exécution de la mission : d'abord, la convergence vers la cible tant que le robot n'entre pas dans la zone d'influence de l'obstacle, puis la réalisation simultanée de la tâche référencée vision et de l'évitement afin de garantir la non collision et la conservation en vue des indices visuels, et enfin la sortie de l'obstacle et la reprise de l'asservissement visuel. C'est d'ailleurs à ce niveau que se situe la différence principale entre l'approche "fusion à la tâche" et celle "fusion à la commande". En effet, dans le premier cas, le robot quitte l'enveloppe de sécurité *naturellement*, grâce à la régulation à zéro de la deuxième composante de e mentionnée précédemment. Ici, par contre, nous avons dû introduire une condition de sortie. Celle-ci intervient plus tôt que dans le cas précédent, modifiant légèrement la trajectoire du robot par rapport à celle obtenue dans le cas de la fusion au niveau de la tâche (cf. figure IV.38). Cette technique semble donc induire un comportement du robot *moins réactif* que précédemment. De ce point de vue, la modélisation proposée apparaît moins naturelle.

Enfin, les commandes calculées par l'équation IV.1 sont présentées sur les figures IV.50, IV.51, IV.52 et IV.53. Aucune d'entre elles ne violent les contraintes cinématiques du robot, λ étant choisi suffisamment faible. Notons que nous nous sommes assurés a posteriori que les contraintes dynamiques du véhicule et du bras n'étaient pas remises en cause.

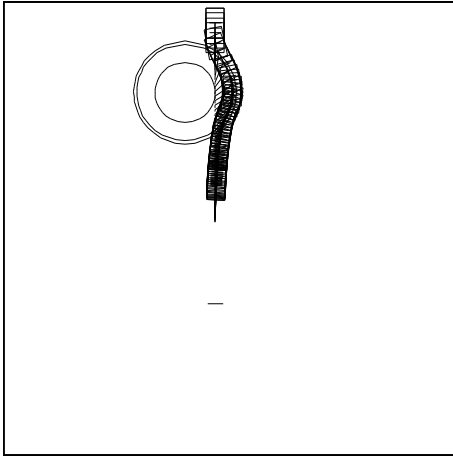


FIG. IV.47 – *Trajectoire du robot pour la fusion des objectifs primaires à la commande*

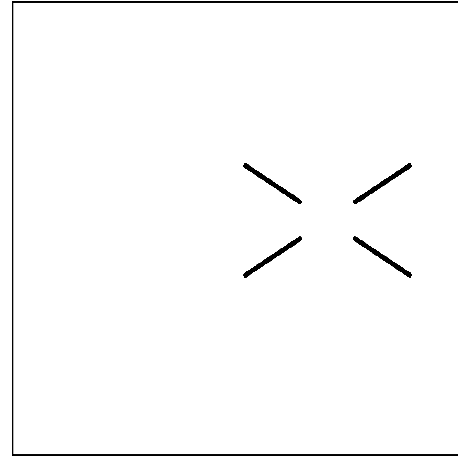


FIG. IV.48 – *Evolution des indices visuels pour la fusion des objectifs primaires à la commandee*

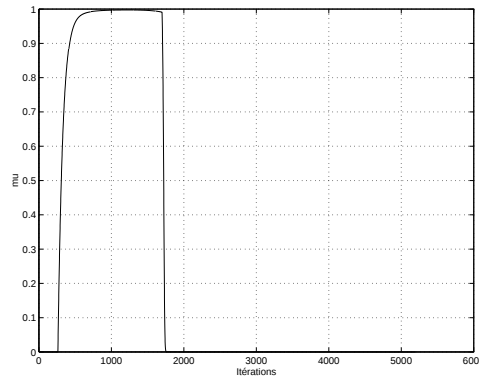


FIG. IV.49 – *Evolution de μ pour la fusion des objectifs primaires à la commande*

Nous avons présenté ici deux méthodes permettant à un robot mobile muni d'une caméra montée sur un bras manipulateur plan à deux degrés de liberté de réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Elles sont basées sur la définition de deux objectifs primaires, l'un modélisant l'asservissement visuel, l'autre caractérisant l'exécution simultanée de ce dernier et de l'évitement. Elles se différencient par le niveau de combinaison de ces deux objectifs puisqu'ils sont fusionnés soit au niveau de la tâche, soit au niveau de la commande. Les résultats obtenus dans chacun de ces deux cas sont relativement similaires, mais permettent de souligner la limitation majeure de ces deux approches : la nécessaire compatibilité de l'asservissement visuel et de l'évitement.

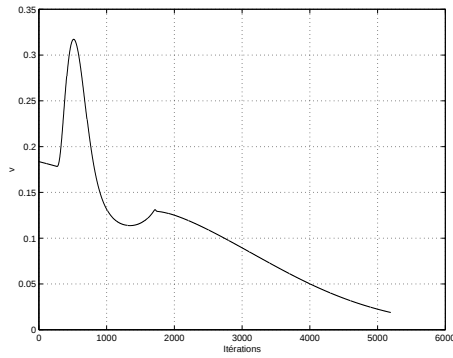


FIG. IV.50 – *Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la commande*

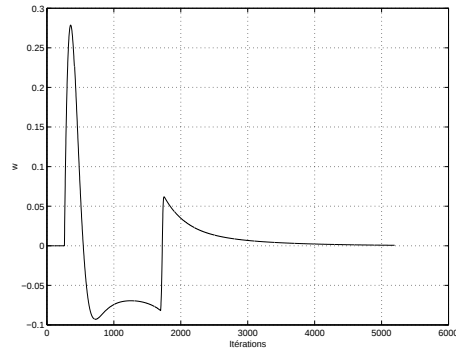


FIG. IV.51 – *Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion des objectifs primaires à la commande*

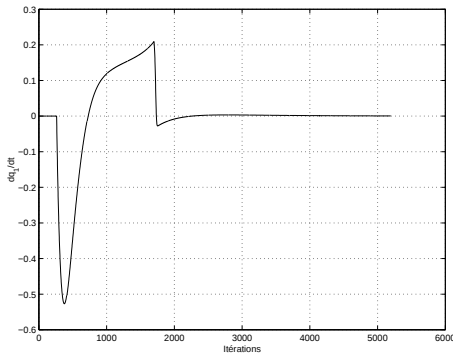


FIG. IV.52 – *Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la commande*

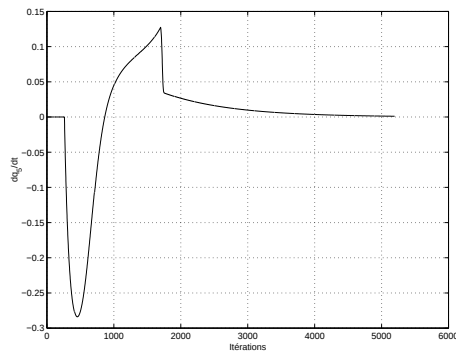


FIG. IV.53 – *Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion des objectifs primaires à la commande*

En effet, la tâche référencée vision est extrêmement contraignante et limite les mouvements de contournement permis à la base. De ce fait, seuls des obstacles peu encombrants ou peu gênants peuvent être évités. Ces travaux démontrent donc l'importance du choix de la liaison virtuelle imposée par l'asservissement visuel dans la qualité de l'exécution d'une tâche robotique quelconque. Ainsi, pour un robot mobile, l'ajout de degrés de liberté mécaniques semble mal approprié pour effectuer simultanément un évitement d'obstacle et une tâche référencée vision. La redondance introduite par le bras est en effet beaucoup plus pertinente dans le cadre de manipulations où les déplacements sont limités que dans notre cas où elle n'offre que de faibles possibilités de contournement. Néanmoins, ces travaux montrent qu'il est possible d'exploiter cette redondance mécanique pour

réaliser - avec des garanties sur la faisabilité - une tâche référencée multi-capteurs en considérant un torseur global unique, répondant ainsi au problème que nous nous sommes posés.

IV.3.2 Méthodes exploitant le formalisme des tâches redondantes

Dans les travaux précédents, nous avons cherché à réaliser *simultanément et parfaitement* la tâche référencée vision et le contournement de l'obstacle. Les méthodes ainsi développées sont valides tant que ces deux tâches restent compatibles. Lorsqu'elles ne le sont plus, il devient nécessaire de découpler le mouvement du bras de celui de la base comme dans les approches proposées dans la section IV.2. Au contraire, dans les travaux que nous présentons maintenant, nous souhaitons nous affranchir de ces contraintes de compatibilité tout en continuant à exécuter simultanément l'asservissement visuel et l'évitement. Le formalisme des tâches redondantes que nous avons rappelé au chapitre II permet de modéliser parfaitement ce type de problème. En effet, considérons une tâche principale *redondante* à réaliser en priorité, et une fonction de coût caractérisant l'exécution d'un objectif secondaire. Ce formalisme consiste à définir une tâche globale de telle sorte que sa régulation à zéro minimise ce critère sous la contrainte que la tâche primaire soit *parfaitement* réalisée. L'objectif secondaire ainsi modélisé est donc réalisé *au mieux* compte tenu des degrés de liberté laissés vacants par la tâche primaire. Plusieurs approches utilisant ce principe ont permis de réaliser des tâches référencées vision tout en exécutant une tâche secondaire. Celle-ci peut consister à suivre des trajectoires prédéfinies comme dans [Chaumette 90] ou [Rives & Borrelly 97], ou bien éviter des singularités ou des butées [Marchand *et al.* 96]. Cette approche n'est évidemment pas limitée à l'exécution de tâches principales référencées vision. Il est également possible de considérer des objectifs primaires définis à partir de données capteur de nature différente. Par exemple, dans [Espiau *et al.* 90], la tâche robotique envisagée utilise un capteur d'effort et consiste à piloter un bras manipulateur de telle sorte qu'il suive une surface plane avec une force constante. De nombreux exemples de tâches secondaires sont également proposés dans [Samson *et al.* 91]. Le problème de l'évitement d'obstacle pour un bras manipulateur y est même brièvement abordé.

Dans les travaux présentés ici, nous cherchons à réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Cette tâche consistant à positionner la caméra contraint seulement trois actionneurs sur les quatre disponibles. Elle est donc redondante, et permet de réaliser une tâche secondaire. Nous proposons deux types d'approches : la première consiste à définir deux tâches globales : l'une, valide

dans l'espace libre, considère la tâche référencée vision comme objectif primaire, tandis que l'autre, prépondérante dans le voisinage des obstacles, définit l'évitement comme tâche principale. Bien que cette approche ait le mérite de garantir la non collision, nous verrons qu'elle se trouve limitée par l'impossibilité de définir une vitesse linéaire de contournement pour le robot, une fois que celui-ci a atteint l'enveloppe de sécurité. De grands gains sont alors nécessaires pour assurer la réalisation de la tâche robotique désirée, ce qui n'est pas souhaitable. Aussi, avons-nous développé une deuxième approche où nous modélisons l'évitement sous la forme d'un coût secondaire à minimiser sous la contrainte que la tâche référencée vision soit parfaitement réalisée. Dans ce cas, le mouvement du robot est imposé par l'asservissement visuel pendant toute la tâche, et le phénomène précédent ne peut plus se produire. Néanmoins, cette nouvelle méthode présente les inconvénients de ses avantages puisque, compte tenu de la liaison virtuelle imposée, l'optimisation de ce critère sera parfois difficile et ne pourra suffire pour garantir la non collision. Nous présentons maintenant les deux types de méthodes envisagées.

IV.3.2.1 Définition de deux tâches globales et fusion à la commande

La garantie de non collision apparaissant comme essentielle, il semble naturel de modéliser l'évitement comme une tâche principale qui doit être réalisée prioritairement au voisinage des obstacles. Aussi, définissons-nous deux tâches globales, l'une notée e_{AV} ¹⁷ caractérisant l'asservissement visuel, l'autre notée e_{EV} modélisant l'évitement. Ainsi, lorsque le robot se trouve loin des obstacles, la tâche principale à réaliser est donnée par la tâche référencée vision. Comme elle est redondante, il est possible de définir une tâche secondaire que nous choisissons pour maintenir le bras manipulateur loin de ses butées articulaires. Cette tâche est modélisée par le coût h_{AV} suivant :

$$h_{AV} = \frac{1}{2} (q_{bras} - q_{bras}^*)^T (q_{bras} - q_{bras}^*) \quad (IV.70)$$

où $q_{bras} = [q_1 \ q_5]^T$ et $q_{bras}^* = [q_1^* \ q_5^*]^T$ représentent respectivement les coordonnées généralisées courantes et désirées du bras manipulateur. Afin d'assurer l'évitement des butées minimales et maximales, q_{bras}^* est défini comme dans [Marchand *et al.* 96] par la valeur des angles q_1 et q_5 correspondant au milieu du premier et cinquième axes du bras. Par application directe du formalisme des tâches redondantes, e_{AV} s'écrit :

$$e_{AV} = W_{AV}^+ C (s - s^*) + \beta_{AV} (I - W_{AV}^+ W_{AV}) g_{AV} \quad (IV.71)$$

17. Nous utilisons des notations identiques à celles employées dans la sous-section IV.3.1 pour définir les objectifs primaires.

où β_{AV} est un scalaire positif à fixer et W_{AV} une matrice telle que $\text{Ker}(W_{AV}) = \text{Ker}(CL_{bras}J_{bras})$. g_{AV} désigne quant à lui le gradient de h_{AV} par rapport à l'état du robot $q = [s_c \ \theta \ q_1 \ q_5]^T$, et est donné par l'équation ci-après :

$$g_{AV} = [0 \ 0 \ q_1 - q_1^* \ q_5 - q_5^*]^T \quad (\text{IV.72})$$

De la même manière, lorsque le robot se trouve au voisinage des obstacles, la tâche principale est définie par l'évitement, tandis que l'asservissement visuel apparaît plutôt comme une tâche secondaire. La seule condition requise pendant cette phase est de conserver la cible dans le champ de vision de la caméra. Pour cela, nous définissons le critère suivant, noté h_{EV} :

$$h_{EV} = \frac{1}{2} (s - s^*)^T (s - s^*) \quad (\text{IV.73})$$

L'introduction de ce critère garantit le suivi de la cible pendant le contournement de l'obstacle, du moins tant que la parfaite réalisation de ce mouvement le permet. Nous abandonnons donc ici l'exécution simultanée de la tâche référencée vision de positionnement classique et de l'évitement. Celui-ci consistant à asservir le robot sur une enveloppe de sécurité ξ_0 située à une distance d_0 de l'obstacle, la tâche principale s'exprime comme l'erreur $d - d_0$ où d est définie comme sur la figure IV.34 et représente la distance entre le point O_0 du robot et l'obstacle. En appliquant encore une fois le formalisme des tâches redondantes, nous obtenons l'expression de e_{EV} suivante :

$$e_{EV} = W_{EV}^+ (d - d_0) + \beta_{EV} (I - W_{EV}^+ W_{EV}) g_{EV} \quad (\text{IV.74})$$

où β_{EV} est un réel positif, tandis que W_{EV} désigne une matrice telle que $\text{Ker}(W_{EV}) = \text{Ker}(J_d)$ où $J_d = \frac{\partial d}{\partial q^T}$ est donné par l'équation IV.58. Notons que la tâche principale d'évitement est redondante puisque sa jacobienne J_d est de rang plein 1. L'introduction d'une tâche secondaire est donc tout à fait possible. Enfin, g_{EV} représente le gradient de h_{EV} par rapport à l'état du robot et s'exprime comme suit :

$$g_{EV} = \frac{\partial h_{EV}}{\partial q} = ((s - s^*)^T L_{bras} J_{bras})^T \quad (\text{IV.75})$$

Il reste alors à fusionner ces deux tâches pour réaliser l'asservissement visuel en environnement encombré. Cette fusion ne peut se faire au niveau de la tâche sur le modèle de l'équation IV.60. En effet, le formalisme des tâches redondantes permet de définir une tâche globale e de manière à ce que sa régulation à zéro soit équivalente à la minimisation d'un critère sous contrainte égalité. Or, l'écriture IV.60 ne vérifie plus cette propriété, car il est difficile de déterminer le problème

d'optimisation correspondant à l'annulation de la tâche globale définie par cette relation. C'est pourquoi, les tâches IV.71 et IV.74 seront combinées au niveau de la commande sur la base de l'équation IV.1. La détermination de la loi de commande globale requiert donc la synthèse des deux correcteurs $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$. Celle-ci nécessite en premier lieu le calcul des matrices W_{AV} et W_{EV} . Pour cela, nous appliquons directement les résultats établis dans [Samson *et al.* 91] et que nous avons rappelés dans le chapitre II. Ces deux matrices doivent vérifier respectivement :

$$\begin{cases} \text{Ker}(W_{AV}) &= \text{Ker}(CL_{bras}J_{bras}) \\ CL_{bras}J_{bras}W_{AV}^T &> 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \text{Ker}(W_{EV}) &= \text{Ker}(J_d) \\ J_dW_{EV}^T &> 0 \end{cases} \quad (\text{IV.76})$$

Un choix simple permettant de satisfaire les deux systèmes ci-dessus consiste à imposer $W_{AV} = CL_{bras}J_{bras}$ et $W_{EV} = J_d$. Dans ce cas, si les scalaires β_{AV} et β_{EV} sont choisis suffisamment faibles, les matrices jacobienues $J_1 = \frac{\partial e_{AV}}{\partial q^T}$ et $J_2 = \frac{\partial e_{EV}}{\partial q^T}$ sont définies positives. La ρ -admissibilité des deux tâches associées est dès lors garantie. Ce résultat s'avère en outre de quelque utilité dans la synthèse de la loi de commande. En effet, nous imposons, comme dans le cas de l'asservissement visuel classique, une décroissance exponentielle pour e_{AV} et e_{EV} . Nous définissons donc la dynamique suivante pour chacune des deux tâches concernées :

$$\dot{e}_{AV} = \frac{\partial e_{AV}}{\partial q^T} \dot{q}_{AV} = -\lambda_{AV} e_{AV} \quad \text{et} \quad \dot{e}_{EV} = \frac{\partial e_{EV}}{\partial q^T} \dot{q}_{EV} = -\lambda_{EV} e_{EV} \quad (\text{IV.77})$$

où λ_{AV} et λ_{EV} sont des gains positifs définissant respectivement les vitesses de décroissance à zéro de e_{AV} et e_{EV} . Les jacobienues J_1 et J_2 s'avérant difficiles à déterminer, nous considérons en lieu et place de ces matrices deux estimées notées respectivement $\hat{J}_1$ et $\hat{J}_2$. Les correcteurs correspondants s'écrivent alors :

$$\dot{q}_{AV} = -\lambda_{AV} \hat{J}_1^{-1} e_{AV} \quad \text{et} \quad \dot{q}_{EV} = -\lambda_{EV} \hat{J}_2^{-1} e_{EV} \quad (\text{IV.78})$$

Le système rebouclé par chacune de ces lois sera stable si les produits $J_1 \hat{J}_1^{-1}$ et $J_2 \hat{J}_2^{-1}$ sont strictement positifs [Samson *et al.* 91]. Or, les matrices W_{AV} et W_{EV} ayant été choisies de manière à satisfaire le système IV.76, les jacobienues J_1 et J_2 sont elles-mêmes positives. Donc, un choix simple garantissant la convergence de la loi précédente consiste à les prendre égales à la matrice identité. Le correcteur s'exprime finalement comme suit :

$$\dot{q}_{AV} = -\lambda_{AV} e_{AV} \quad \dot{q}_{EV} = -\lambda_{EV} e_{EV} \quad (\text{IV.79})$$

Remarque 18 *L'estimation en ligne du torseur d'interaction L s'avère difficile puisqu'il est nécessaire d'avoir accès à une information supplémentaire de profondeur [Chaumette 90]. Aussi, considérons-nous ici un torseur constant calculé à*

la position désirée $s = s^*$. C étant choisie telle que $C = L_{bras|s=s^*}^+$, l'expression de W_{AV} se réduit à J_{bras} . W_{AV} ne vérifie donc les équations du système IV.76 qu'au voisinage de la position désirée, et il est alors difficile de conclure quant à la positivité de J_1 . Néanmoins, les résultats de simulation montrent que la convergence n'est pas remise en cause, même lorsque la caméra est éloignée de la configuration finale. Naturellement, elle n'est plus exponentielle.

Afin de déterminer complètement la loi de commande IV.1, il reste à définir l'évolution de μ . Pour cela, une petite analyse du comportement du robot piloté par le correcteur global IV.1 s'avère nécessaire. Lorsque le robot évolue dans l'espace libre, μ est fixé à 0, et le robot réalise la tâche e_{AV} . Il converge donc vers la cible tout en maintenant le bras loin de ses butées. Par contre, au voisinage des obstacles, μ passe à 1, et le véhicule est piloté par $\dot{q}_{EV}$. Il s'asservit sur l'enveloppe de sécurité, et, dès cet instant, la tâche principale de e_{EV} est satisfaite. Il ne reste plus alors qu'à minimiser le critère h_{EV} sous cette contrainte afin de conserver la cible en vue. Comme l'erreur $s - s^*$ est dans l'absolu relativement faible, et que le gradient du critère est projeté sur le noyau de J_d , l'influence de la tâche secondaire sur le mouvement du robot devient minime, et ne permet plus de produire une vitesse linéaire lui permettant de suivre l'enveloppe de sécurité. Le véhicule s'immobilise alors pratiquement sur cette dernière. Nous rencontrons donc ici un problème similaire à celui apparu dans la méthode des potentiels classiques, où l'obstacle ne peut être contourné qu'avec l'aide d'un potentiel attractif. C'est pourquoi, afin de bénéficier de l'apport de l'asservissement visuel en termes de vitesse linéaire, nous définissons une enveloppe ξ_- située à une distance $d_- = d_0 - \varepsilon$ de l'obstacle où ε représente la largeur du couloir entre ξ_0 et ξ_- . Nous proposons alors le profil suivant pour μ :

$$\begin{cases} \mu = 0 & \text{si } d > d_0 \\ \mu = \frac{d_0 - d}{\varepsilon} & \text{si } d \in]d_0 - \varepsilon, d_0[\\ \mu = 1 & \text{si } d < d_0 - \varepsilon \end{cases} \quad (\text{IV.80})$$

Néanmoins, lorsque le robot se trouve entre les deux enveloppes, μ augmente progressivement, limitant ainsi l'importance de $\dot{q}_{AV}$. De plus, d est dans l'absolu relativement proche de d_0 . Aussi, sera-t-il nécessaire de choisir un gain λ_{EV} relativement important pour que le robot puisse suivre l'enveloppe de sécurité. Ainsi, pendant la phase de contournement, le véhicule sera commandé par une combinaison linéaire des deux correcteurs. Il n'est donc plus possible de conclure quant à la stabilité du système rebouclé. D'autre part, pour la même raison, définir une condition de sortie n'est plus nécessaire, le robot quittant naturellement le voisinage de l'enveloppe de sécurité lorsque les effets attractif et répulsif des

correcteurs $\dot{q}_{AV}$ et $\dot{q}_{EV}$ s'additionnent. Enfin, notons que, si la non collision est garantie du fait de la définition de la tâche globale e_{EV} , l'évolution des indices visuels sera perturbée contrairement aux autres méthodes mises en oeuvre jusqu'ici. Néanmoins, la cible sera conservée dans le champ de vision de la caméra dans la mesure où le mouvement de contournement le permet grâce à la minimisation sous contrainte du critère h_{EV} .

Nous présentons maintenant quelques résultats de simulation. La configuration initiale du robot est définie par : $x = 0.9$ mètre, $y = 7$ mètres, $\theta = 0$, $q_1 = 90$ degrés, et $q_5 = 0$. L'obstacle est comme précédemment un cylindre centré en $(3, 6)$ et de rayon 1 mètre. Autour de cet obstacle, nous définissons les deux enveloppes ξ_- et ξ_0 situées respectivement à 0.5 et 0.6 mètre. Les paramètres β_{AV} et β_{EV} sont pris égaux à 0.1, tandis que les gains λ_{AV} et λ_{EV} sont respectivement fixés à 0.1 et 20. Enfin, les bornes maximales des vitesses sont les suivantes : $v < 0.9$ m/s, $\omega < 1$ rad/s, $\dot{q}_1 < 1.4$ rad/s, et $\dot{q}_5 < 2$ rad/s.

La trajectoire du robot est présentée sur la figure IV.54. Au début de la tâche, le véhicule se trouve hors de la zone dangereuse, et μ est fixé à 0 (cf. figure IV.56). Le robot exécute la tâche référencée vision et commence à converger vers la cible. Comme la caméra est positionnée correctement initialement, le robot tourne très peu (cf. figures IV.58, IV.59, et IV.60). Ensuite, il franchit l'enveloppe ξ_0 et entre dans la zone dangereuse. μ augmente progressivement, mais du fait de la valeur de λ_{EV} , il n'atteint jamais la valeur 1. Le robot est alors soumis à une combinaison linéaire des deux commandes. Comme l'obstacle est dangereux, les vitesses linéaires produites par les tâches globales e_{AV} et e_{EV} sont opposées. Le robot freine donc à l'entrée de la zone de contournement¹⁸ comme le montre l'évolution de la vitesse linéaire représentée sur la figure IV.57. Durant cette phase, la variation des indices visuels décrite sur la figure IV.55 se trouve naturellement perturbée puisque d'une part le robot est commandé par une combinaison linéaire de chacun des correcteurs, et que d'autre part, le suivi de la cible en phase d'évitement est modélisé par un critère qui est minimisé au mieux. Enfin, lorsque le robot est orienté à peu près parallèlement à l'obstacle, celui-ci ne présente plus de danger majeur, et les vitesses linéaires produites par la régulation à zéro des deux fonctions de tâche s'ajoutent. Le véhicule quitte alors le voisinage de la zone de sécurité en accélérant, et achève la tâche référencée vision, la décroissance des indices visuels reprenant une évolution "normale". Finalement, notons que les commandes produites ne saturent pas, et que les contraintes dynamiques du robot ne sont pas violées.

18. Un tel comportement peut d'ailleurs entraîner l'apparition de puits de potentiel comme dans le cas de la méthode des potentiels classiques.

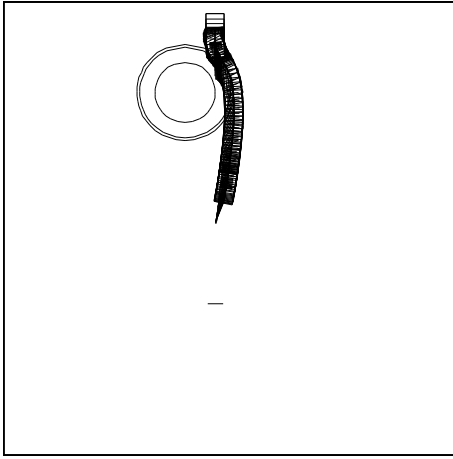


FIG. IV.54 – Trajectoire du robot pour la fusion de tâches globales

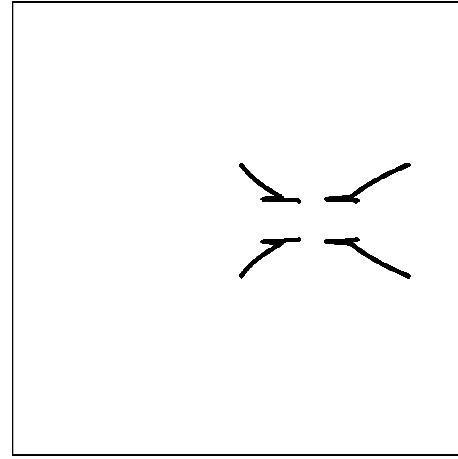


FIG. IV.55 – Evolution des indices visuels pour la fusion de tâches globales

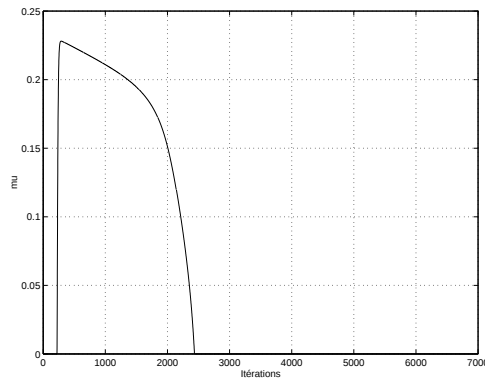
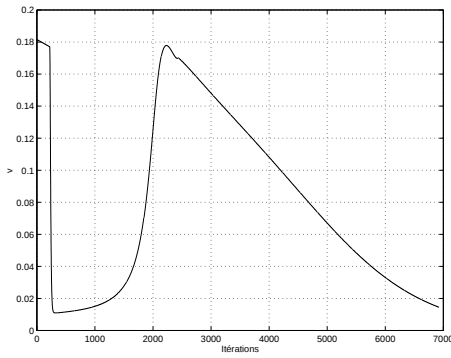
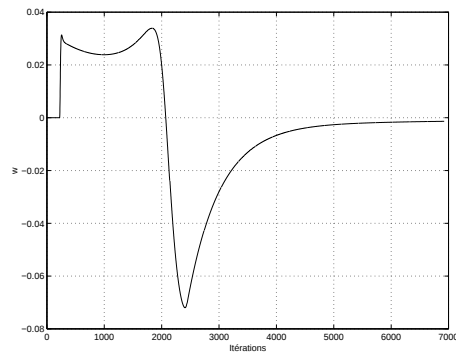
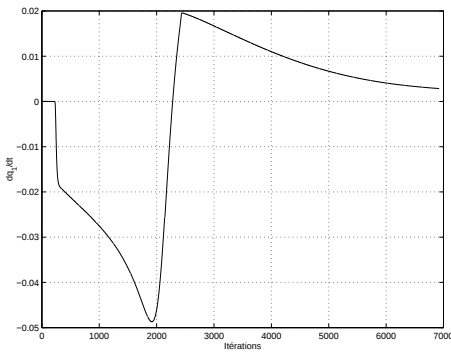
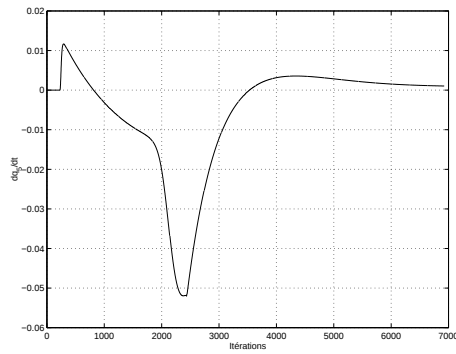


FIG. IV.56 – Evolution de μ pour la fusion de tâches globales

Enfin, nous terminons en montrant sur la figure IV.61 un exemple d'échec lorsque le gain λ_{EV} n'est pas choisi suffisamment important. Le robot pénètre alors davantage dans la zone dangereuse, mais est difficilement ramené vers l'enveloppe de sécurité du fait de la faible différence entre d et d_0 . Dans ce contexte, il semblerait donc judicieux d'introduire dans l'expression de e_{EV} un coefficient permettant d'amplifier l'erreur $d - d_0$. Néanmoins, son choix ne serait guère aisé et dépendrait fortement du contexte de l'exécution de la tâche. En outre, cela ne définirait pas davantage une vitesse linéaire sur l'enveloppe de sécurité.

Nous avons présenté ici une méthode permettant à un robot mobile de réaliser une tâche référencée vision tout en évitant des obstacles. Elle repose sur la

FIG. IV.57 – *Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion tâches globales*FIG. IV.58 – *Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion de tâches globales*FIG. IV.59 – *Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion de tâches globales*FIG. IV.60 – *Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion de tâches globales*

définition de deux tâches globales, la première réalisant l'asservissement visuel, la seconde effectuant l'évitement. La non collision est alors garantie, tandis que la conservation de la cible en vue est assurée tant que le mouvement de contournement le permet. Cette méthode apparaît tout de même mal adaptée au problème posé. En effet, nous rencontrons un problème similaire à celui des potentiels classiques où l'évitement ne peut se faire qu'avec l'aide d'un potentiel attractif. Il est alors nécessaire de sacrifier la garantie de stabilité pour pouvoir réaliser la tâche robotique. De plus, la qualité de son exécution est étroitement liée au choix des gains de la loi de commande.

Les travaux que nous avons développés montrent donc que cette approche requiert la spécification séparée de la vitesse linéaire du robot, exactement comme dans le cas du suivi de chemin où cette variable n'est plus une commande mais

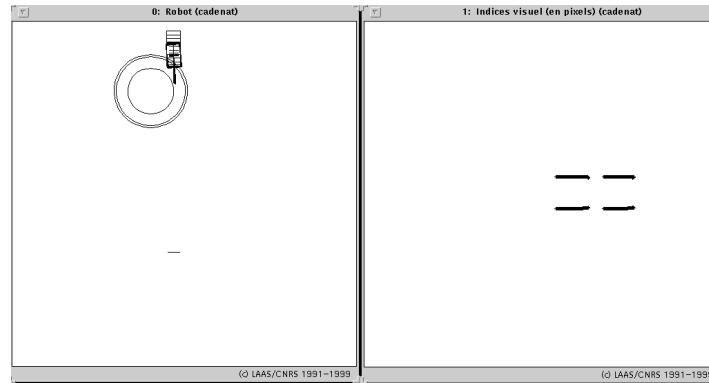


FIG. IV.61 – *Echec de l'exécution de la tâche robotique*

seulement un paramètre non nul fixé a priori. Ainsi, une amélioration notable de cette technique consisterait à définir séparément une vitesse linéaire de contournement, les autres commandes étant déterminées sur un principe similaire à celui que nous avons présenté ici. Il ne resterait plus ensuite qu'à définir la fonction μ de manière à gérer le basculement d'un correcteur vers l'autre, tout en assurant leur exclusion mutuelle. Un profil semblable à ceux que nous avons déjà proposés dans les approches précédentes pourrait convenir, une condition de sortie devant néanmoins être définie. La technique ainsi développée serait alors philosophiquement similaire à celle présentée dans la section IV.2.2.3

IV.3.2.2 Définition de deux tâches secondaires et fusion à la tâche

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons développé une seconde méthode permettant de définir une vitesse linéaire de contournement pour le robot. Nous considérons maintenant la tâche référencée vision comme un objectif primaire, à réaliser en priorité. L'évitement apparaît dès lors comme une tâche secondaire et est donc défini par un critère à minimiser. Comme précédemment, deux stratégies de commande sont mises en oeuvre selon que le robot est proche ou loin des obstacles. Dans l'espace libre, l'asservissement visuel ne permet pas de définir complètement le mouvement du robot à cause de la redondance mécanique introduite par le bras. D'autre part, la tâche de contournement n'est significative qu'au voisinage des obstacles. Aussi, afin de satisfaire la propriété de ρ -admissibilité et poser correctement le problème de commande, il est nécessaire de déterminer une deuxième tâche secondaire, valable dans l'espace libre. Nous proposons de définir deux critères :

- Le premier sera actif lorsque le robot se trouve loin des obstacles, et per-

mettra de maintenir le bras loin de ses butées. Il sera donc donné par le coût h_{AV} défini par l'équation IV.70.

- Le deuxième noté $\bar{h}_{EV}$ sera prépondérant au voisinage des obstacles, et modélisera l'évitement. Comme précédemment, celui-ci consiste à asservir le robot sur une enveloppe de sécurité ξ_0 située à une distance d_0 de l'obstacle. Le coût correspondant s'écrit :

$$\bar{h}_{EV} = \frac{1}{2} k_d (d - d_0)^2 \quad (\text{IV.81})$$

où d est définie comme sur la figure IV.34 et représente la distance entre le point O_0 du robot et l'obstacle. $k_d \in \mathbb{R}^{+*}$ désigne quant à lui un gain constant permettant d'amplifier la différence $d - d_0$, de telle manière qu'elle influence significativement le mouvement du robot pendant la phase d'évitement. Nous reviendrons sur le choix de ce gain dans la suite de ce manuscrit.

Afin d'appliquer le formalisme des tâches redondantes, il est nécessaire de définir un critère unique valable aussi bien dans l'espace libre qu'au voisinage des obstacles. Pour cela, nous combinons les deux fonctions de coût h_{AV} et $\bar{h}_{EV}$ de la même manière que pour la fusion des objectifs primaires au niveau de la tâche. Nous introduisons donc un paramètre μ vérifiant le profil présenté sur la figure IV.36, et exprimons le critère global comme suit :

$$h = (1 - \mu) h_{AV} + \mu \bar{h}_{EV} \quad (\text{IV.82})$$

où h_{AV} , $\bar{h}_{EV}$ et μ sont respectivement définis par l'équation IV.70, IV.81, et IV.61.

Rappelant que l'objectif principal est défini par l'asservissement visuel, la tâche globale e est définie par application directe du formalisme des tâches redondantes et s'écrit :

$$e(q) = W^+ C(s - s^*) + \beta (I - W^+ W) g \quad (\text{IV.83})$$

où β est un réel positif et W une matrice telle que $\text{Ker}(W) = \text{Ker}(C L_{bras} J_{bras})$. g désigne le gradient du critère global h par rapport à l'état du robot q et s'exprime comme suit :

$$g = \frac{\partial h}{\partial q} = (1 - \mu) g_{AV} + \mu \bar{g}_{EV} + (h'_{EV} - h_{AV}) g_\mu \quad (\text{IV.84})$$

où g_{AV} , $\bar{g}_{EV}$, et g_μ représentent respectivement les gradients des fonctions h_{AV} , $\bar{h}_{EV}$, et μ par rapport à q . Tandis que g_{AV} est donné par l'équation IV.72, $\bar{g}_{EV}$ et g_μ sont définis par :

$$\begin{cases} \bar{g}_{EV} &= k_d (d - d_0) J_d^T \\ g_\mu &= \frac{\partial \mu}{\partial d} J_d^T \end{cases} \quad (\text{IV.85})$$

où $J_d = \frac{\partial d}{\partial q^T}$ est défini par la relation IV.58, tandis que $\frac{\partial \mu}{\partial d}$ est obtenu en dérivant l'équation IV.61 par rapport à d .

Il reste maintenant à définir la matrice W . Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, celle-ci doit vérifier les deux relations suivantes afin de simplifier la synthèse de la loi de commande :

$$\begin{cases} \text{Ker}(W) &= \text{Ker}(CL_{bras}J_{bras}) \\ CL_{bras}J_{bras}W^T &> 0 \end{cases} \quad (\text{IV.86})$$

Dans la lignée de l'approche précédente, nous choisissons $W = CL_{bras}J_{bras}$. La relation IV.86 est alors satisfaite, et, si le scalaire β est choisi suffisamment faible, la jacobienne de la tâche J_T est strictement positive. La ρ -admissibilité de la tâche globale est alors garantie. De plus, comme nous l'avons mentionné précédemment, ce résultat permet de simplifier la synthèse de la loi de commande puisqu'il est alors possible d'approximer J_T par la matrice identité, sans perdre la stabilité du système rebouclé. Notons néanmoins que la remarque 18 reste encore valable dans ce cas. En imposant comme précédemment une décroissance exponentielle pour cette fonction de tâche, et rappelant que J_T est approximée par l'identité, le correcteur s'exprime comme suit :

$$\dot{e} = \dot{q} = -\lambda e \quad (\text{IV.87})$$

où λ désigne la vitesse de décroissance de la fonction de tâche e à zéro.

La stratégie envisagée est identique à celle développée pour la fusion des objectifs au niveau de la tâche, et est représentée sur la figure IV.37. Elle se déroule comme suit : tant que le robot reste loin des obstacles, μ est fixé à 0, et le véhicule réalise la tâche référencée vision en minimisant le critère h_{AV} . Il converge donc vers la cible tout en maintenant le bras loin de ses butées articulaires. Ensuite, dès qu'il pénètre dans la zone dangereuse délimitée par ξ_+ , μ augmente progressivement pour atteindre 1, une fois l'enveloppe de sécurité ξ_0 franchie. Le critère global h se réduit alors à $\bar{h}_{EV}$, et le robot continue à exécuter *parfaitement* la tâche référencée vision tout en s'écartant *au mieux* de l'obstacle. L'évolution des indices visuels et la conservation de la cible dans le champ de vision de la caméra sont donc garanties. Par contre, la non collision ne peut plus être assurée. En effet, l'évitement ayant été modélisé sous la forme d'un coût secondaire n'est réalisé que sous la contrainte que la tâche référencée vision soit parfaitement exécutée. Ainsi, dans certaines configurations (obstacles volumineux), la minimisation du critère $\bar{h}_{EV}$ peut ne plus suffire pour réaliser le contournement. Le problème est alors mal posé, et la non collision ne peut plus être garantie. Dans ce contexte, le choix de certains paramètres comme la distance de sécurité d_0 ou le gain k_d

devient important. En effet, fixer d_0 trop faible réduit le temps de réaction du robot et accroît d'autant plus le risque de collision que l'évitement est réalisé au mieux compte tenu des degrés de liberté laissés libres par l'asservissement visuel. En outre, la différence $d - d_0$ doit être suffisamment importante pour influencer significativement le mouvement du robot. C'est pourquoi, nous avons introduit le gain k_d dans le critère $\bar{h}_{EV}$. Celui-ci doit donc être choisi suffisamment grand pour que la minimisation de ce critère permette de contourner l'obstacle sans collision. On comprend que le choix de ce gain est extrêmement difficile a priori, et nécessite un certain nombre de réglages successifs.

Nous présentons maintenant quelques résultats de simulation. La configuration initiale du robot est définie par : $x = 0.5$ mètre, $y = 7$ mètres, $\theta = 0$, $q_1 = 80$ degrés, et $q_5 = -10$ degrés. L'obstacle considéré est un cylindre de rayon 1 mètre et centré en $(3, 6)$. La distance d_0 est fixée à 0.9 mètre, et la largeur du couloir défini entre les enveloppes ξ_0 et ξ_+ est égale à 0.1 mètre. Le coefficient β est fixé à 0.1, tandis que le gain k_d a été choisi égal à 1000 afin d'amplifier suffisamment l'erreur $d - d_0$. Enfin, les bornes des vitesses sont les suivantes : $v < 0.9$ m/s, $\omega < 1$ rad/s, $\dot{q}_1 < 1.4$ rad/s, et $\dot{q}_5 < 2$ rad/s. Si les commandes produites par la loi IV.87 dépassent ces limites, elles sont fixées à leur valeur maximale comme dans les deux simulations précédentes. Le gain λ a donc été choisi de manière à satisfaire ces contraintes et pris égal à 0.1. Finalement, les valeurs désirées pour les première et cinquième articulations du bras ont été fixées respectivement à 90 et 0 degrés.

La trajectoire du robot est proposée sur la figure IV.62. Au début de la tâche, μ est fixé à zéro (cf. figure IV.64) et le robot exécute la tâche référencée vision tout en maintenant le bras loin des butées. Ensuite, il franchit l'enveloppe ξ_+ et commence à contourner l'obstacle¹⁹ tandis que le bras s'oriente pour suivre la cible et continuer à exécuter la tâche référencée vision. L'évolution des indices visuels n'est donc pas affectée (cf. figure IV.63). Par contre, contrairement aux cas précédents, l'évitement est de moindre qualité et est conditionné par les choix du gain k_d , et de la distance de contournement d_0 . La non collision ne peut donc être garantie. Notons que lorsque l'obstacle est dépassé mais que le véhicule est encore dans la zone délimitée par ξ_0 , le robot a tendance à ramener le bras manipulateur en arrière pour minimiser le critère $\bar{h}_{EV}$. En effet, un bras positionné vers l'avant de la base rapprocherait le point O_0 de l'obstacle au lieu de l'en écarter, et n'optimiserait donc pas la fonction de coût considérée. Un tel comportement peut induire des problèmes vis à vis des butées articulaires. Une solution peut

19. Notons ici que le sens de contournement est fixé par l'asservissement visuel puisqu'il définit la tâche principale à réaliser en priorité.

consister à diminuer k_d pour réduire l'influence du terme $d - d_0$ dans la tâche globale e , avec les incertitudes sur la garantie de non collision que cela comporte.

Les commandes sont présentées sur les figures IV.65, IV.66, IV.67, et IV.68. Elles ne violent pas les limites cinématiques et dynamiques du robot et sont donc valides. De plus, elles permettent de visualiser clairement les différentes phases de l'exécution de la tâche robotique précédente, puisque les vitesses de rotation de la base et du bras sont presque nulles initialement, le robot étant presque en face de la cible. Elles augmentent de manière à réaliser la tâche référencée vision et le contournement de l'obstacle pendant la phase d'évitement. Enfin, lorsque le robot a quitté la zone dangereuse, elles décroissent vers zéro (de même que la vitesse linéaire), faisant converger les indices visuels vers leur consigne tout en minimisant l'écart entre les variables articulaires du bras et leurs valeurs désirées.

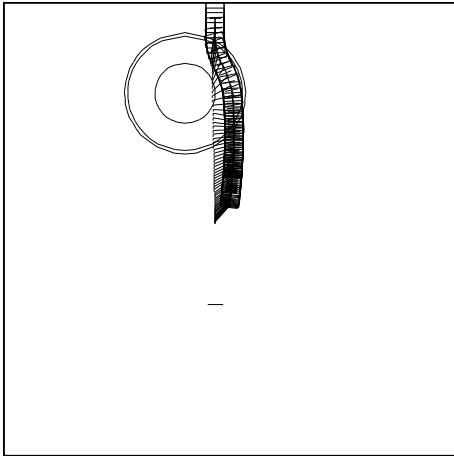


FIG. IV.62 – *Trajectoire du robot pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche*

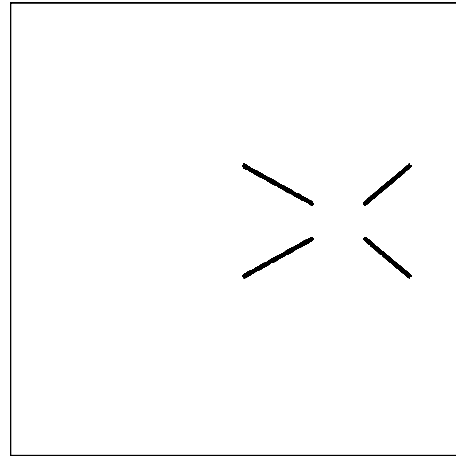
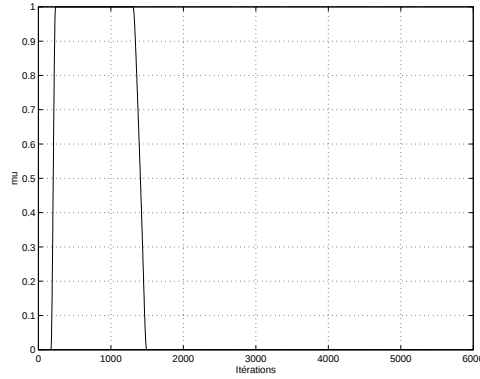
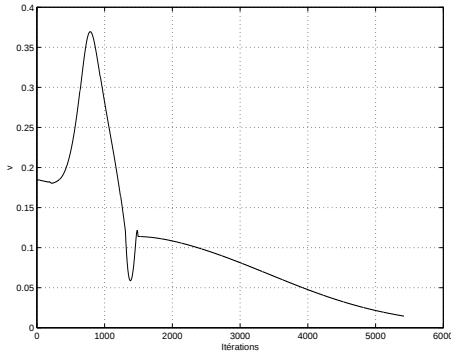
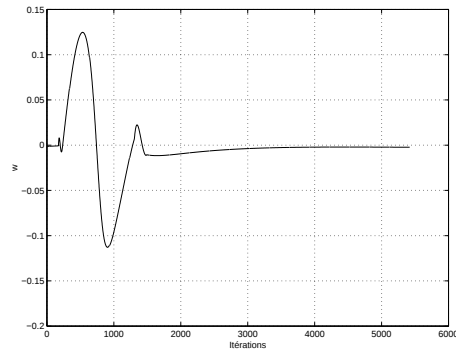


FIG. IV.63 – *Evolution des indices visuels pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche*

Nous proposons ci-après deux autres résultats de simulation : le premier représenté sur la figure IV.69 réalise une seconde tâche de positionnement, tandis que le deuxième décrit sur la figure IV.70 met en exergue les limites de notre approche en montrant un cas d'échec. Dans cette dernière simulation, le problème est mal posé et la minimisation du critère $\bar{h}_{EV}$ ne permet plus d'assurer l'évitement, la liaison virtuelle imposée par la tâche référencée vision étant alors beaucoup trop contraignante.

La technique proposée ici permet à un robot redondant de réaliser une tâche référencée vision en environnement encombré. Elle s'appuie sur le formalisme des

FIG. IV.64 – *Evolution de μ pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche*FIG. IV.65 – *Vitesse linéaire du robot mobile pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche*FIG. IV.66 – *Vitesse angulaire du robot mobile pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche*

tâches redondantes, et consiste à modéliser l'asservissement visuel comme une tâche principale, tandis que l'évitement est décrit par un coût à minimiser sous la contrainte que l'objectif primaire soit parfaitement exécuté. La conservation en vue de la cible est dès lors garantie pendant tout le mouvement du robot. Par contre, l'évitement étant réalisé au mieux compte tenu des degrés de liberté laissés libres par la tâche référencée vision, la non collision ne peut plus être assurée. Celle-ci dépend de la qualité de la minimisation sous contrainte du critère $\bar{h}_{EV}$, et est donc liée d'une part au choix de certains paramètres que nous avons déjà discuté, et d'autre part à l'existence d'une solution "acceptable" au problème d'optimisation précédent. Dans ce contexte, le choix de la tâche référencée vision est important. Celle-ci doit être choisie de manière à laisser libres suffisamment de degrés de liberté pour que l'optimisation du critère puisse être efficace. Or,

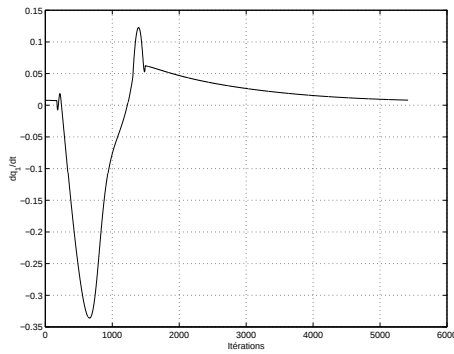


FIG. IV.67 – Vitesse angulaire de la première liaison du bras pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche

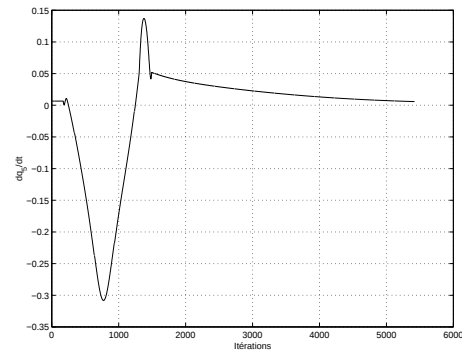


FIG. IV.68 – Vitesse angulaire de la cinquième liaison du bras pour la fusion des objectifs secondaires à la tâche

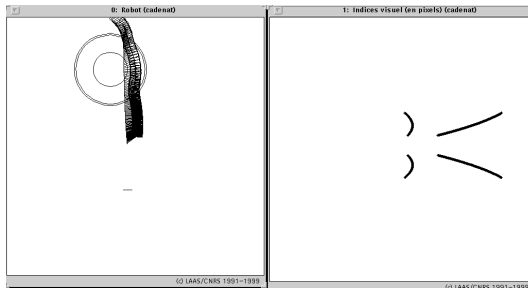


FIG. IV.69 – Réalisation d'une deuxième tâche référencée multi-capteurs par fusion de tâches secondaires

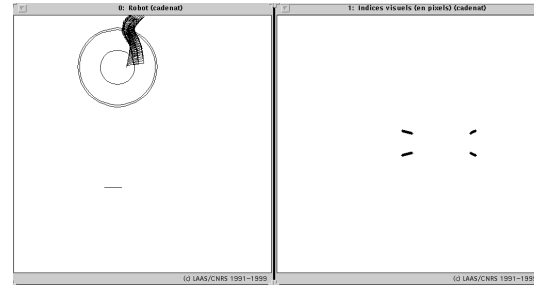


FIG. IV.70 – Echec de l'exécution de la tâche référencée multi-capteurs par fusion de tâches secondaires

dans notre cas, nous avons imposé une liaison virtuelle rigide, très contraignante, de telle sorte que seuls des obstacles peu gênants ou peu volumineux peuvent être contournés. Une amélioration substantielle de cette méthode pourrait donc consister à définir une tâche principale moins contraignante, libérant ainsi davantage de degrés de liberté pour “mieux” minimiser la fonction de coût secondaire. Dans ce contexte, une modélisation similaire à celle proposée dans la sous-section IV.2.3 pourrait convenir. Notons cependant que le fait de définir l'évitement par une fonction de coût secondaire ne peut permettre d'assurer la non collision quelle que soit la tâche principale considérée. Néanmoins, l'approche proposée démontre qu'il est possible de définir deux objectifs secondaires, l'un valable loin des obstacles, l'autre significatif dans leur voisinage, et de les fusionner directement au sein d'une même tâche globale pour réaliser une tâche référencée multi-capteurs.

Nous avons proposé ici deux méthodes basées sur le formalisme des tâches redondantes développé dans [Samson *et al.* 91]. La première approche consiste à modéliser l'asservissement visuel et l'évitement par deux tâches globales séparées. Dans ce cas, la non collision est garantie, mais la méthode proposée ne permet pas de définir une vitesse linéaire de contournement pour le robot. C'est pourquoi, nous avons développé une deuxième technique où l'évitement est modélisé sous la forme d'une tâche secondaire et est réalisé au mieux compte tenu des degrés de liberté laissés libres par la tâche principale. De ce fait, la non collision ne peut être garantie.

La modélisation proposée dans ces deux méthodes semblent donc être mal adaptée au problème auquel nous nous intéressons : l'asservissement visuel en présence d'obstacles. En effet, dans un cas, c'est l'asservissement visuel qui reste maître d'oeuvre au voisinage de l'obstacle, donnant au robot la vitesse linéaire nécessaire pour le contourner, mais supprimant de ce fait la garantie de non collision. Dans l'autre, au contraire, nous satisfaisons cette dernière propriété, mais perdons la capacité motrice de contournement. Ces travaux montrent donc toute l'importance de la phase de modélisation dans les problèmes de commande. Ils ont également le mérite de prouver qu'il est possible de considérer des informations sensorielles de nature différente au sein d'une tâche globale, définissant ainsi une tâche référencée multi-capteurs.

IV.3.3 Conclusion

Dans l'ensemble des travaux développés dans cette section, nous avons cherché à exploiter au mieux la redondance mécanique introduite par le bras manipulateur pour réaliser l'asservissement visuel et l'évitement simultanément. Nous avons proposé deux classes de méthodes, la première reposant sur la spécification de deux objectifs primaires, la seconde s'appuyant sur le formalisme des tâches redondantes. Les résultats obtenus ont mis en exergue l'importance du choix de la tâche référencée vision à exécuter pendant la phase d'évitement. En effet, plus celle-ci définit une liaison virtuelle contraignante, plus les mouvements de contournement permis à la base mobile sont réduits. Dans ce contexte, l'ajout mécanique de degrés de liberté pour réaliser simultanément une tâche référencée vision de positionnement et un évitement d'obstacle présente peu d'intérêt. Il semble en effet plus judicieux, du moins dans ce cas, de relaxer la liaison virtuelle imposée, de manière à libérer les degrés de liberté nécessaires au contournement. Par contre, naturellement, dans le cadre d'une toute autre tâche robotique consistant par exemple à suivre des cibles positionnées à des hauteurs différentes, l'introduction d'un bras manipulateur reste incontournable.

Quoi qu'il en soit, nous avons démontré à travers les diverses méthodes proposées qu'il était possible de considérer au sein d'un même vecteur de mesures ou d'une même tâche globale des informations sensorielles de nature différente, et de les fusionner de manière à définir des lois de commande référencées multi-capteurs. Dans la section suivante, nous nous intéressons à l'exécution d'une tâche robotique quelconque, et exploitons l'ensemble des résultats obtenus dans les sections IV.2 et IV.3 pour définir la notion de tâche élémentaire.

IV.4 Discussion

Dans cette section, nous récapitulons les différentes techniques mises en œuvre dans ce chapitre, et les comparons en termes de stabilité, performances et intérêt par rapport à la tâche robotique à exécuter. Nous résumons ensuite ces conclusions dans les tableaux IV.1 et IV.2. Puis, sur la base de ces résultats, nous nous intéressons à l'enchaînement de tâches référencées multi-capteurs et introduisons la notion canonique de tâche élémentaire.

IV.4.1 Comparaison des différentes approches

Dans les sections IV.2 et IV.3, nous avons développé un ensemble de méthodes permettant à un robot mobile de réaliser une tâche référencée vision de positionnement en environnement encombré. Nous avons d'abord considéré le cas d'une base mobile munie d'une platine commandable en lacet et proposé trois méthodes distinctes, les deux premières étant basées sur les champs de potentiel, la dernière reposant sur le suivi de chemin.

L'approche développée dans le paragraphe IV.2.2.1 s'appuie sur le formalisme des potentiels classiques et se trouve limitée du fait de l'interaction, pendant la phase d'évitement, des correcteurs réalisant l'asservissement visuel et le contournement de l'obstacle. Cette approche revient en effet à forcer le robot à exécuter ces deux tâches simultanément, c'est-à-dire à effectuer une tâche globale, alors que sa structure mécanique ne le lui permet pas puisqu'il n'est pas redondant par rapport à la tâche référencée vision de positionnement. Ainsi, pendant l'évitement, deux lois de commande à vocation contradictoire agissent en même temps sur le véhicule, et il est difficile de garantir la faisabilité de la tâche (risque d'instabilité, de puits de potentiel, de perte de la cible, de collision, etc...). Cette technique n'offre donc aucune garantie quant à la qualité de l'exécution de la tâche de positionnement en environnement encombré et, de ce fait, ne sera pas retenue pour réaliser une telle tâche. D'où le symbole "—" dans le tableau IV.1.

Pour supprimer ce problème et garantir la faisabilité de la tâche, nous avons proposé dans les sous-sections IV.2.2.2 et IV.2.2.3 deux nouvelles méthodes reposant sur l'exécution *séquentielle* de la tâche référencée vision de positionnement et de l'évitement. Le basculement entre chacune de ces tâches est géré en fonction de la distance à l'obstacle. Dans ce cas, il est nécessaire de redéfinir la tâche d'évitement de manière à ce qu'elle intègre d'une part le contournement de l'obstacle lui-même et d'autre part le suivi continu de la cible pendant toute cette phase. Cette approche requiert donc l'abandon de la tâche de positionnement au profit d'une autre tâche référencée vision, beaucoup moins contraignante, permettant de centrer les indices visuels dans l'image. Celle-ci ne contraignant que le mouvement de la platine peut être réalisée simultanément avec le contournement de l'obstacle et n'intervient plus sur la base mobile. Elle garantit ainsi la séparation des effets attractif et répulsif de chaque loi de commande, dans la mesure où la méthode d'évitement choisie permet de fournir au robot une vitesse linéaire de contournement. La faisabilité de la tâche est alors assurée pour les deux méthodes proposées, du moins tant que les enveloppes de basculement restent suffisamment proches. Ces deux techniques permettent donc de garantir une exécution correcte de la tâche robotique envisagée et présentent des performances similaires. Néanmoins, l'approche proposée dans la sous-section IV.2.2.3 où le contournement est réalisé par suivi de chemin offre des conditions suffisantes permettant de guider le choix du gain de la loi de commande d'évitement et prend en compte explicitement la saturation des actionneurs. En ce sens, elle apparaît comme la méthode la plus complète, et se voit donc attribuer deux "+" dans le tableau récapitulatif IV.1, au lieu d'un seul pour la technique basée sur le potentiel rotatif développée dans la sous-section IV.2.2.2.

Remarque 19 *L'utilisation de ces deux dernières méthodes requiert la spécification précise du comportement du robot du fait de la séparation de l'asservissement visuel et de l'évitement. Il est ainsi nécessaire de définir une condition de sortie, définition inutile dans la technique basée sur les potentiels classiques où le robot quitte naturellement l'enveloppe de sécurité.*

Les techniques précédentes reposent sur l'exécution séquentielle de l'asservissement visuel et de l'évitement. Nous avons développé par la suite de nouvelles méthodes permettant de réaliser simultanément ces deux tâches et nécessitant la redondance du robot. Comme nous l'avons vu, celle-ci peut provenir soit de la définition de la tâche référencée vision, soit de la structure mécanique du robot. Nous avons proposé deux approches distinctes, la première consistant à relaxer les contraintes de déplacement imposées par la tâche de positionnement, la seconde

reposant sur l'introduction de degrés de liberté supplémentaires par le biais d'un bras manipulateur.

Ainsi, dans la sous-section IV.2.3, nous avons défini une tâche référencée vision moins contraignante, valable lorsque le robot se trouve loin de la cible, et exploité la redondance ainsi introduite pour réaliser l'évitement simultanément avec l'asservissement visuel. Nous avons proposé deux techniques différentes qui garantissent toutes deux la faisabilité de la tâche. La première - qui consiste à définir complètement le vecteur de commande - s'avère très sensible au choix des gains de commande puisqu'ils ne peuvent être fixés arbitrairement comme nous l'avons montré dans le paragraphe IV.2.3.1. La seconde, au contraire, repose sur la spécification externe de la vitesse linéaire et est de ce fait plus robuste vis à vis de ces gains. Elle semble donc plus facile à mettre en œuvre. De plus, la première méthode ne reste valable que tant que la tâche référencée vision et le contournement restent compatibles (compatibilité d'ailleurs fortement liée au choix des différents gains). Lorsque cette propriété n'est plus vérifiée, il y a singularité de la matrice jacobienne associée, et la loi de commande d'évitement ne peut plus être synthétisée. La deuxième technique ne souffre pas de ce type de problème comme nous l'avons montré dans le paragraphe IV.2.3.2, et est de ce fait mieux adaptée que la première pour réaliser la tâche robotique envisagée. Les inconvénients de la première méthode ne s'avérant pas rhédibitoires, les deux approches seront retenues avec une préférence pour la seconde, ce qui se traduit par la présence de deux "+" pour cette technique dans le tableau IV.1.

L'approche proposée dans la sous-section IV.2.3 consiste donc à rendre le robot redondant en redéfinissant la tâche référencée vision. Nous avons également montré dans la section IV.3 qu'il était possible de continuer à considérer la tâche de positionnement complète pendant la phase d'évitement. Cette tâche contraint les trois actionneurs du système mécanique composé de la base mobile munie d'une platine. La redondance ne peut donc être obtenue qu'en introduisant des degrés de liberté supplémentaires par le biais d'un bras manipulateur plan à deux degrés de liberté. Nous avons proposé deux classes de méthodes reposant sur ce principe, la première consistant à définir la tâche référencée vision et l'évitement comme deux objectifs primaires à réaliser parfaitement simultanément, la seconde s'appuyant sur le formalisme des tâches redondantes.

Dans la première classe de méthodes envisagée, l'asservissement visuel et l'évitement sont parfaitement exécutés au voisinage de l'obstacle, garantissant ainsi la faisabilité de la tâche. Par contre, leur compatibilité est un problème plus préoccupant que dans l'approche précédente. La tâche référencée vision de positionnement contraint en effet davantage le déplacement du robot et limite les mouvements d'évitement possibles. De ce fait, seuls des petits obstacles peuvent

Méthodes	Avantages	Inconvénients	Intérêt
<i>Potentiel répulsif classique</i>	. Pas de condition de sortie	. Stabilité . Minima locaux . Suivi cible non garanti . Risque de collision	–
<i>Potentiel répulsif rotatif</i>	. Pas de minima locaux . Suivi cible garanti . Non collision assurée	. Condition de sortie . Saturation liée au choix des gains	+
<i>Suivi de chemin</i>	. Idem . Saturation gérée par un algorithme	. Condition de sortie	++
<i>Détermination du vecteur de commande complet</i>	. Exploitation redondance . Suivi cible garanti . Non collision assurée	. Condition de sortie . Sensibilité aux choix des gains . Risque de singularité	+
<i>Contrôle externe de la vitesse linéaire</i>	. Exploitation redondance . Pas sensible au choix des gains	. Condition de sortie	++

TAB. IV.1 – Comparaison des méthodes élaborées pour le robot muni de la platine

être contournés. De meilleurs résultats auraient été obtenus en considérant une tâche référencée vision moins contraignante comme dans la sous-section IV.2.3. Il est important de noter que la prise en compte des six degrés de liberté du bras n'auraient pas modifié cette conclusion. Donc, *pour la tâche canonique considérée ici*, l'introduction du robot manipulateur n'est pas significative. Cependant, il est clair que, dans le cadre d'une application robotique beaucoup plus large impliquant par exemple des tâches de manipulations ou de positionnement vis à vis d'amers qui peuvent être occultés, les degrés de liberté apportés par le bras deviennent essentiels. Les deux méthodes proposées sont extrêmement intéressantes car elles permettent de traiter au même niveau des informations sensorielles de nature différente. Elles seront donc retenues. Néanmoins, elles peuvent être améliorées et, de ce fait, ne reçoivent qu'un seul "+" dans le tableau IV.2.

La condition de compatibilité s'avérant très contraignante pour les deux techniques précédentes, nous avons développé deux autres méthodes exploitant le formalisme des tâches redondantes où cette propriété est satisfaite par construction de la tâche globale. Ainsi, dans la première approche, l'asservissement visuel et l'évitement sont spécifiés comme deux tâches principales à réaliser en priorité. Comme nous l'avons vu, cette approche est limitée par le fait que la fonction de

tâche modélisant l'évitement ne peut à elle seule fournir une vitesse linéaire de contournement au robot, ce dernier s'immobilisant sur l'enveloppe de sécurité. Une amélioration pourrait donc consister à définir la vitesse linéaire de manière externe comme dans la sous-section IV.2.3. Nous avons en outre proposé une autre approche où l'évitement est décrit sous la forme d'une tâche secondaire à réaliser *au mieux* sous la contrainte que la tâche de positionnement soit parfaitement exécutée. De ce fait, la non collision ne peut être garantie avec cette méthode, même en considérant une tâche référencée vision moins contraignante. Ainsi, ces deux dernières techniques souffrent d'un problème de modélisation qui ne leur permet pas d'assurer la faisabilité de la tâche. Elles ne seront donc pas retenues, ce qui se traduit par un symbole "–" dans le tableau IV.2.

Méthodes	Avantages	Inconvénients	Intérêt
<i>Fusion des objectifs primaires à la tâche</i>	. Réalisation parfaite et simultanée des deux tâches . Sortie naturelle	. Analyse difficile . Risque de singularité . Limitée à des obstacles petits ou peu gênants . Saturation liée au choix des gains	+
<i>Fusion des objectifs primaires à la commande</i>	. Réalisation parfaite et simultanée des deux tâches . Condition de sortie . Analyse plus simple	. Analyse difficile . Risque de singularité . Limitée à des obstacles petits ou peu gênants . Saturation liée au choix des gains	+
<i>Définition de deux tâches globales et fusion à la commande</i>	. Pas de problème de singularité . Non collision garantie . Sortie naturelle	. Pas de vitesse linéaire de contournement . Suivi cible non garanti . Saturation liée au choix des gains	–
<i>Définition de deux tâches secondaires et fusion à la commande</i>	. Pas de problème de singularité . Suivi cible assuré . Saturation liée à v . Sortie naturelle	. Risque de collision	–

TAB. IV.2 – Comparaison des méthodes élaborées pour le robot équipé du bras

Remarque 20 Naturellement, comme le bras constitue une extension mécanique de la platine, toutes les tâches qui peuvent être réalisées avec la platine peuvent

également être effectuées avec le bras manipulateur plan. Dans le tableau IV.2, nous jugeons l'intérêt de rajouter des degrés de liberté mécaniques. L'analyse comparative des résultats obtenus pour les deux types d'ensembles mécaniques montre que l'introduction du bras manipulateur ne présente pas un grand intérêt pour réaliser notre tâche canonique de navigation. C'est la raison pour laquelle les méthodes développées pour le bras manipulateur sont notées avec un seul +.

Finalement, les approches qui nous paraissent les mieux adaptées pour réaliser la tâche référencée vision de positionnement en environnement encombré sont les méthodes basées sur :

- le potentiel répulsif rotatif (paragraphe IV.2.2.2),
- le suivi de chemin (paragraphe IV.2.2.3),
- la détermination du vecteur de commande complet (paragraphe IV.2.3.1),
- le contrôle externe de la vitesse linéaire (paragraphe IV.2.3.2),
- la fusion des objectifs primaires au niveau de la tâche (paragraphe IV.3.1.2),
- la fusion des objectifs primaires au niveau de la commande (paragraphe IV.3.1.3).

Notons que les techniques qui reposent sur la redondance du robot présentent l'avantage de pouvoir réaliser simultanément l'asservissement visuel et l'évitement. Cependant, il faut apporter un soin tout particulier à leur modélisation car elles se trouvent limitées dès que le problème est mal posé (singularité de la jacobienne de la tâche ou impossibilité de minimiser correctement le critère). Dans ces cas-là, il est impossible de continuer à exécuter conjointement la tâche référencée vision et le contournement de l'obstacle. Il s'avère alors nécessaire de revenir à des méthodes similaires à celles développées dans les sous-sections IV.2.2.2 et IV.2.2.3 où ces deux tâches sont effectuées séquentiellement. Ces dernières techniques semblent donc avoir un domaine de validité plus large que celles basées sur la redondance du robot. Naturellement, le choix définitif entre les différentes méthodes proposées ne peut être fait qu'en fonction du robot dont on dispose et de la tâche (ou des tâches) à exécuter. Il semble néanmoins judicieux de chercher en priorité à profiter de la redondance pour effectuer plusieurs tâches simultanément avant de basculer vers des approches mieux adaptées dès qu'une singularité est détectée.

L'ensemble des travaux menés jusqu'ici a donc permis de mettre en exergue les limites de l'exploitation de la redondance, démontrant qu'il n'est pas toujours possible de réaliser deux tâches simultanément. Dans ces cas-là, la tâche robotique à exécuter ne peut plus être modélisée sous la forme d'une *tâche globale*, et il est nécessaire de la décomposer en *sous-tâches* ou *tâches élémentaires*. Se posent dès lors un certain nombre de questions : d'abord, jusqu'à quel point peut-on considérer une seule tâche globale? ensuite, quand doit-on la décomposer en tâches élémentaires? enfin, comment définir ces tâches élémentaires? Nous nous appuyons sur les conclusions précédentes pour donner quelques éléments de réponse à ces questions dans la section suivante.

IV.4.2 Enchaînement de tâches référencées capteur

Les lois de commande développées dans cette thèse reposent sur le formalisme des fonctions de tâche. Ce formalisme a été essentiellement exploité pour modéliser des tâches robotiques simples exprimées en termes d'informations provenant d'un seul type de capteur. Notre contribution majeure a consisté à appliquer ces résultats de manière à pouvoir considérer des données capteur de nature différente pour permettre à un robot mobile de naviguer dans un environnement encombré. Plus particulièrement, nous nous sommes restreint à l'exécution d'une tâche canonique consistant à positionner la caméra face à une cible en dépit des obstacles présents dans la scène. Nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure il était possible d'effectuer simultanément cette tâche référencée vision de positionnement et l'évitement.

Un premier résultat dans ce sens a été de montrer qu'une tâche de navigation évoluée ne pouvait être réalisée par la régulation à zéro d'une seule fonction de tâche par le biais d'un difféomorphisme global. Au contraire, la propriété de ρ -admissibilité ne peut être obtenue que localement et le domaine de validité de la tâche est défini par l'inversibilité de la jacobienne. En effet, si nous considérons notre tâche canonique, les informations télémétriques ne sont significatives qu'au voisinage de l'obstacle. La définition de la tâche à réaliser évolue donc en fonction de la position du robot dans l'environnement. En outre, les approches basées sur la redondance du robot nous ont permis de mettre en évidence l'importance de la propriété de ρ -admissibilité et du conditionnement de la matrice jacobienne de la tâche pour réaliser deux tâches simultanément. Il apparaît donc qu'une application robotique évoluée doit être définie comme la succession de tâches simples ou encore tâches élémentaires. Chacune d'entre elles sera caractérisée par une fonction de tâche de même dimension que l'état du robot, un difféomorphisme local et un domaine de validité correspondant (cf. figure IV.72). Ainsi, les données

sensorielles prises en compte pour la réalisation d'une tâche élémentaire sont nécessairement spécifiques à cette tâche.

L'étape de planification consiste donc ici à déterminer une séquence de tâches élémentaires. Elle s'oppose à l'approche classique qui consistait à planifier un chemin dans l'espace libre [Latombe 91] [Laumond *et al.* 94], puis à synthétiser un retour d'état permettant de stabiliser le robot le long de ce chemin de référence [Samson 92] [De Luca *et al.* 98] [Hamel *et al.* 97]. En outre, la détermination de lois de commande référencées capteur dédiées à la réalisation de chacune de ces tâches élémentaires permet de réduire le problème de planification à un problème topologique contrairement à l'approche classique où il s'agissait de caractériser précisément la trajectoire solution par rapport à une métrique globale.

D'autre part, comme, dans cette approche, la tâche globale est définie par un enchaînement de tâches élémentaires, les domaines de validité de deux tâches consécutives doivent être en intersection, de telle sorte que les domaines de validité successifs recouvrent une composante connexe de l'espace libre contenant les configurations initiale et finale du robot. De cette manière, il sera possible de basculer d'une tâche élémentaire vers la suivante et donc d'exécuter la tâche globale. L'enchaînement de tâches référencées vision a déjà été abordé par R. Pissard-Gibollet [Pissard-Gibollet 93], et, au LAAS, par R. Swain [Swain 99]. Nous présentons d'ailleurs sur la figure IV.71 un de ses résultats de simulation consistant à réaliser une tâche référencée vision évoluée définie par une suite de tâches élémentaires (suivi de mur, rotation autour d'un angle, évitement d'obstacles, convergence finale vers une cible). D'autres approches de navigation référencée vision ont également été proposées dans la littérature : on retiendra notamment les travaux de J. Kosecka [Kosecka 96] et ceux de C. Rasmussen [Rasmussen 95] où le séquençage des tâches est défini par la recherche d'un chemin dans un graphe dont les nœuds correspondent aux amers accessibles à partir de la position courante.

Enfin, il est important de noter que le recouvrement de l'espace libre par les domaines de validité successifs peut être interprété comme un atlas différentiable si l'on considère que le difféomorphisme existant sur chacun des domaines définit en fait une carte locale à l'intérieur de laquelle la régulation de chaque fonction de tâche élémentaire est réalisée. Il semble donc que l'idée de conférer à l'espace libre une structure de variété différentielle puisse aider à modéliser le problème de navigation d'un robot mobile par enchaînement de tâches élémentaires référencées multi-capteurs. Le basculement entre ces différentes tâches peut alors être géré par les transformations différentielles existant entre chaque carte.

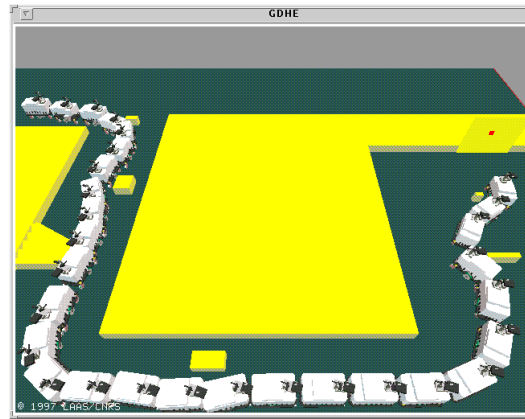


FIG. IV.71 – *Enchaînement de tâches référencées vision*

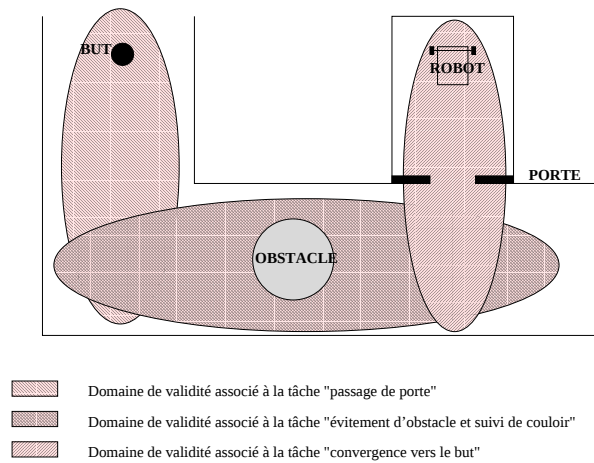


FIG. IV.72 – *Enchaînement de tâches élémentaires référencées multi-capteurs*

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande référencée multi-capteurs et avons proposé plusieurs méthodes permettant à un robot mobile muni d'une caméra et d'un laser SICK 2D de naviguer dans un environnement encombré. Nous avons plus particulièrement porté nos efforts sur la réalisation d'une tâche consistant à positionner la caméra face à une cible fixe malgré les différents obstacles présents dans la scène. Deux hypothèses sous-tendent notre travail : d'une part, la cible est supposée avoir une hauteur constante égale à celle du centre optique de la caméra ; d'autre part, les obstacles rencontrés sont nécessairement statiques et ne peuvent occulter la cible. Nous nous sommes particu-

lièrement inspirés des résultats obtenus en commande référencée vision et avons centré nos travaux autour du formalisme des fonctions de tâches. Nous avons proposé deux grandes classes de techniques : dans le premier type d'approches, le robot est non redondant par rapport à la tâche référencée vision considérée. L'asservissement visuel et l'évitement doivent alors être exécutés séquentiellement, et le contournement de l'obstacle requiert la désolidarisation de la base et de la platine. Le deuxième type d'approche, au contraire, exploite la redondance du robot obtenue soit à partir de la redéfinition de la tâche référencée vision, soit à partir de l'introduction du bras manipulateur. Dans ce cas, il est possible d'effectuer les deux tâches simultanément, du moins tant que la propriété de ρ -admissibilité est satisfaite, démontrant ainsi l'importance de cette propriété dans la définition du domaine de validité des tâches. Nous avons également comparé ces diverses méthodes en termes de performances, et mise en œuvre, et retenu les plus intéressantes pour notre application. Enfin, sur la base de ces résultats, nous avons proposé quelques pistes de modélisation pour l'enchaînement de tâches référencées multi-capteurs en établissant un lien entre le séquençement de ces tâches et la géométrie différentielle.

Chapitre V

CONCLUSION

Les travaux menés dans cette thèse ont porté sur la synthèse de lois de commande référencées multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile en environnement encombré. Nous avons centré nos travaux autour du formalisme des fonctions de tâche dont nous avons rappelé les propriétés essentielles dans le chapitre II. Dans ce même chapitre, sur la base des résultats obtenus par F. Chaudette et R. Pissard-Gibollet, nous avons montré comment adapter cette approche à la commande référencée vision d'un robot mobile non holonome, et synthétisé des lois de commande permettant au véhicule de positionner la caméra embarquée dans l'espace libre. Dans le chapitre suivant, après avoir présenté des travaux préliminaires sur l'évitement d'obstacles pendant la phase transitoire d'un suivi de chemin, nous avons décrit notre contribution majeure consistant essentiellement à l'élaboration d'un ensemble de techniques permettant à un véhicule de réaliser une tâche référencée vision de positionnement dans un environnement encombré. Nous avons notamment montré qu'il était possible de réaliser l'asservissement visuel et l'évitement simultanément ou séquentiellement, et mis en évidence les différentes manières d'exploiter la redondance soit au niveau de la définition de la tâche référencée vision, soit au niveau de la structure mécanique du robot. Nous avons également dégagé les avantages et inconvénients de chacune des techniques proposées. Ces travaux ont donc permis de mettre en exergue des points essentiels, tels que l'importance de la phase de modélisation dans les différentes approches envisagées et les limites de l'exploitation de la redondance définies par

la propriété de ρ -admissibilité. Enfin, ces résultats nous ont également permis d'entamer une réflexion sur la modélisation d'une tâche robotique complexe par les outils de géométrie différentielle. En effet, les recherches menées sur le thème précis de la réalisation (conjointe ou non) de l'asservissement visuel et de l'évitement ont conduit naturellement à définir la notion de tâche élémentaire et à étudier précisément la transition entre deux tâches de nature complètement différente. La définition d'un coefficient de basculement μ dépendant des données télémétriques permet ainsi d'abandonner une tâche pour une autre en fonction de l'environnement du robot. Ce paramètre gère la transition entre les tâches élémentaires successives, chacune d'entre elles étant valide dans un domaine à l'intérieur duquel la propriété de ρ -admissibilité est satisfaite.

Ces travaux ont été volontairement restreints à la réalisation d'une tâche référencée vision canonique consistant à positionner la caméra face à une cible fixe dans un environnement statique simple. Une extension naturelle consisterait donc à exploiter les lois de commande précédemment synthétisées pour effectuer d'autres types de tâches référencées vision. De plus, il serait également souhaitable de s'affranchir des hypothèses contraignantes concernant la hauteur de la cible et des obstacles considérés, et de pouvoir prendre en compte, outre les occultations éventuelles de la caméra, le cas d'obstacles ou de cible mobiles. L'introduction du bras manipulateur complet à six degrés de liberté serait alors bénéfique.

D'autre part, les résultats proposés ont été obtenus en simulation. Ils devront donc être validés expérimentalement sur notre plate-forme mobile H2bis équipée d'un bras manipulateur six axes, le GT6A. Il serait également intéressant de disposer d'une interface graphique générale dédiée à la simulation des lois de commande référencées multi-capteurs.

D'un point de vue plus automatique, l'amélioration des lois de commande proposées dans cette thèse passe, d'une part par l'intégration des saturations cinématiques et dynamiques du robot directement dans l'étape de synthèse, et d'autre part, par le développement de lois robustes prenant en compte entre autres les erreurs de modélisation et de mesure. Dans ce contexte, il semble intéressant d'essayer d'établir un lien entre le formalisme des fonctions de tâche et l'automatique classique.

Références bibliographiques

- [Bemporad *et al.* 96] A. Bemporad, A. De Luca & G. Oriolo. *Local incremental planning for a car-like robot navigating among obstacles*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'96), pages 1205–1211, Minneapolis, Minnesota, USA, 1996.
- [Bensalah 96] F. Bensalah. *Estimation du mouvement par vision active*. PhD thesis, Université de Rennes 1, Rennes, France, July 1996.
- [Bouilly 97] B. Bouilly. *Planification de stratégies de déplacements robustes pour robot mobile*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, January 1997.
- [Brockett 83] R.W. Brockett. Asymptotic stability and feedback stabilization. Differential Geometric Control Theory, Birkhauser, 1983.
- [Cadenat *et al.* 99a] V. Cadenat, P. Souères & M. Courdesses. *An hybrid control for avoiding obstacles during a vision-based tracking task*. In Proceedings of the European Control Conference (ECC' 99), Karlsruhe, Germany, September 1999.
- [Cadenat *et al.* 99b] V. Cadenat, R. Swain, P. Souères & M. Devy. *A controller to perform a visually guided tracking task in a cluttered environment*. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS' 99), Kyongju, Korea, October 1999.
- [Canudas de Wit *et al.* 94] C. Canudas de Wit, H. Khenrouf, C. Samson & O.J. Sordalen. Nonlinear control design for mobile robots in mobile robots. Mobile Robots World Scientific Publisher (Zeng editor), 1994.
- [Chaumette 90] F. Chaumette. *La relation vision commande : théorie et application à des tâches robotiques*. PhD thesis, Université de Rennes I, Rennes, France, July 1990.

- [Chiacchio *et al.* 91] P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciavicco & B. Siciliano. *Closed-loop inverse kinematics schemes for constrained redundant manipulators with task space augmentation and task priority strategy*. International Journal of Robotics Research, vol. 10, pages 410 – 425, 1991.
- [Corke 96] P.I. Corke. Visual control of robots : High performance visual servoing. Research Studies Press LTD, 1996.
- [Crétual 98] A. Crétual. *Asservissement visuel à partir d'informations de mouvement dans l'image*. PhD thesis, Université de Rennes I, Rennes, France, November 1998.
- [De Luca & Oriolo 90] A. De Luca & G. Oriolo. *Kinematic resolution of redundancy via joint-space decomposition*. In 8th CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots (RoManSy'90), pages 64–71, Krakow, Poland, 1990.
- [De Luca & Oriolo 94a] A. De Luca & G. Oriolo. *Local incremental planning for nonholonomic mobile robots*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'94), pages 104–110, San Diego, California, USA, 1994.
- [De Luca & Oriolo 94b] A. De Luca & G. Oriolo. *The reduced gradient technique for solving redundancy in robot arms*. Robotersysteme, vol. 7, pages 117–122, 1994.
- [De Luca *et al.* 98] A. De Luca, G. Oriolo & C. Samson. Feedback control of a nonholonomic car-like robot. Lecture Notes in Control and Information Sciences 229 (Springer Verlag), 1998.
- [De Medio & Oriolo 91] C. De Medio & G. Oriolo. Robot obstacle avoidance using vortex fields. S. Stifter and J. Lenar Eds Advances in robot kinematics (Springer Verlag), 1991.
- [Dedieu *et al.* 99] D. Dedieu, V. Cadenat & P. Souères. *Mixed camera-laser based control for mobile robot navigation*. Rapport technique 99387, LAAS/CNRS, France, October 1999.
- [Doyle *et al.* 89] J. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar & B. Francis. *State space solutions to standard $\mathcal{H}_2$ and $\mathcal{H}_\infty$ control problems*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 8, pages 831–847, August 1989.

- [Durieu *et al.* 96] C. Durieu, M.J. Aldon & D. Meizel. *La fusion de données multisensorielles pour la localisation de robots mobiles*. Traitement du signal, vol. 13, no. 2, 1996.
- [Espiau *et al.* 90] B. Espiau, J-P. Merlet & C. Samson. *Force-feedback control and non-contact sensing: a unified approach*. In Proceedings of the eighth CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RoManSy'90), Cracovia, Poland, July 1990.
- [Espiau *et al.* 92] B. Espiau, F. Chaumette & P. Rives. *A new approach to visual servoing in robotics*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, no. 3, June 1992.
- [Foulon 98] G. Foulon. *Génération de mouvements coordonnés pour un ensemble constitué d'une plate-forme mobile à roues et d'un bras manipulateur*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, Octobre 1998.
- [Gorla & Renaud 84] B. Gorla & M. Renaud. *Modèles des robots manipulateurs - application à leur commande*. Cépaduès-éditions, 1984.
- [Hamel & Meizel 96] T. Hamel & D. Meizel. *Robust control laws for wheeled mobile robots*. International Journal of Systems Science, vol. 27, no. 8, pages 695–704, 1996.
- [Hamel *et al.* 97] T. Hamel, P. Souères & D. Meizel. *A two-steps robust path-following controller for wheeled robots*. In Proceedings of the 5th Symposium on Robot Control, (SYROCO'97), Nantes, France, September 1997.
- [Hamel 96] T. Hamel. *Sur la robustesse et la précision du contrôle des déplacements de robots mobiles à roues*. PhD thesis, Université de technologie de Compiègne, Compiègne, France, January 1996.
- [Hutchinson *et al.* 96] S. Hutchinson, G.D. Hager & P.I. Corke. *A tutorial on visual servo control*. Rapport technique, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, May 1996.
- [Huynh 98] F. Huynh. *Manipulation assistée par la vision pour des tâches de poursuite d'un objet mobile et de saisie d'un objet fixe*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, February 1998.

- [**Kanayama *et al.* 90**] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Myazaki & T. Noguchi. *A stable tracking control method for a non-holonomic mobile robot*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA' 90), pages 384–389, Cincinnati, Ohio, USA, 1990.
- [**Khatib 86**] O. Khatib. *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. The International Journal of Robotics Research, vol. 5, no. 1, January 1986.
- [**Khatib 96**] M. Khatib. *Contrôle du mouvement d'un robot mobile par retour sensoriel*. PhD thesis, LAAS CNRS, Toulouse, France, December 1996.
- [**Kosaka & Kak 92**] A. Kosaka & A. Kak. *Fast vision guided mobile robot navigation using model-based reasoning and predict of uncertainties*. CVGIP - Image Understanding, vol. 56, no. 3, November 1992.
- [**Kosecka 96**] J. Kosecka. *Visually guided navigation*. In Proceedings of the 4th International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS'96), pages 301–308, Lisbon, Portugal, July 22-26 1996.
- [**Krogh 84**] B.H. Krogh. *A generalized potential field approach to obstacle avoidance control*. In Robotics Research: The next five years and beyond, SME Conference Proceedings, Bethlehem, PA, 1984.
- [**Latombe 91**] J.C. Latombe. Robot motion planning. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [**Laumond *et al.* 94**] J.P. Laumond, P. Jacobs, M. Taïx & R. Murray. *A motion planner for non-holonomic mobile robot*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, 1994.
- [**Luenberger 84**] D.G. Luenberger. Linear and non linear programming. Addison Wesley, 1984.
- [**Malis 98**] E. Malis. *Contribution à la modélisation et la commande en asservissement visuel*. PhD thesis, Université de Rennes I, Rennes, France, November 1998.
- [**Marchand *et al.* 96**] E. Marchand, F. Chaumette & A. Rizzo. *Using the task function approach to avoid robot joint limits and kinematic singularities in visual servoing*. In Proceedings of the International Confe-

- rence on Intelligent Robots and Systems (IROS' 96), pages 1083–1090, Osaka, Japan, November 1996.
- [Martinet *et al.* 97] P. Martinet, N. Daucher, J. Gallice & M. Dhome. *Robot control using monocular pose estimation*. In Proceedings of Workshop on New Trends in Image-Based Robot Servoing (IROS' 97), pages 1–12, Grenoble, France, September 1997.
- [Martinet *et al.* 98] P. Martinet, C. Thibaud, B. Thuilot & J. Gallice. *Robust controller synthesis in automatic guided vehicles applications*. In Proceedings of Advances in Vehicle Control and Safety, pages 395–401, Amiens, France, July 1998.
- [Nelson & Cox 88] W.L. Nelson & I.J. Cox. *Local path control for autonomous vehicle*. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'88), pages 1504–1510, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1988.
- [Ohya *et al.* 98] A. Ohya, A. Kosaka & A. Kak. *Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle avoidance using single-camera vision and ultrasonic sensing*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 6, December 1998.
- [Pissard-Gibollet & Rives 91] R. Pissard-Gibollet & P. Rives. *Asservissement visuel appliqué à un robot mobile : état de l'art et modélisation cinématique*. Rapport technique 1577, INRIA, France, 1991.
- [Pissard-Gibollet & Rives 95] R. Pissard-Gibollet & P. Rives. *Applying visual servoing techniques to control a mobile hand-eye system*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA' 95), pages 166–171, Nagoya, Japan, May 1995.
- [Pissard-Gibollet *et al.* 95] R. Pissard-Gibollet, K. Kappalos, P. Rives & J.J. Borrelly. *Real-time programming of mobile robot actions using advanced control techniques*. In Proceedings of the 4th International Symposium on Experimental Robotics (ISER' 95), Stanford, California, USA, June-July 1995.
- [Pissard-Gibollet 93] R. Pissard-Gibollet. *Conception et commande par asservissement visuel d'un robot mobile*. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris, Paris, France, December 1993.

- [Rasmussen 95] C. Rasmussen. *Visual servoing and mobile robot navigation*. Computer Science, vol. 690, June 1995.
- [Renaud 86] M. Renaud. *Calcul analytique itératif des modèles d'un robot manipulateur*. Rapport technique 86159, LAAS/CNRS, France, June 1986.
- [Rives & Borrelly 97] P. Rives & J-J. Borrelly. *Underwater pipe inspection task using visual servoing formalism*. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS' 97), Grenoble, France, 1997.
- [Rives et al. 93] P. Rives, R. Pissard-Gibollet & K. Kappalos. *Development of a reactive mobile robot using real time vision*. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Experimental Robotics (ISER' 93), pages 91–109, Kyoto, Japan, October 1993.
- [Sampei et al. 91] M. Sampei, T. Tamura, T. Itoh & M. Nakamichi. *Path tracking control of trailer-like mobile robot*. In Proceedings of the International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS' 91), pages 193–198, Osaka, Japan, 1991.
- [Samson & Ait-Abderrahim 90] C. Samson & K. Ait-Abderrahim. *Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space*. Rapport technique 1288, INRIA, France, October 1990.
- [Samson et al. 91] C. Samson, M. Le Borgne & B. Espiau. *Robot control: The task function approach*. Clarendon Press, Oxford, England, 1991.
- [Samson 92] C. Samson. *Path following and time-varying feedback stabilization of a wheeled mobile robot*. In Proceedings of ICARCV'92, pages pp RO–13.1.1–13.1.5, Singapore, September 1992.
- [Samson 95] C. Samson. *Control of chained systems. Application to path-following and time-varying point stabilization of mobile robots*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 40, no. 1, January 1995.
- [Sanderson & Weiss 80] A.C. Sanderson & L.E. Weiss. *Image based visual servo control using relational graph error signal*. In Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society, pages 1074–1077, Cambridge, October 1980.

- [Santos *et al.* 95] A. Santos, B. Espiau, P. Rives & V. Rigaud. *Sensor-based control of holonomic autonomous underwater vehicles*. Rapport technique 2609, INRIA, France, July 1995.
- [Sciavicco & Siciliano 88] L. Sciavicco & B. Siciliano. *A solution algorithm to the inverse kinematic problem for redundant manipulators*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 4, pages 403 – 410, 1988.
- [Souères *et al.* 98a] P. Souères, T. Hamel & V. Cadenat. *A path following controller for wheeled robots which allows to avoid obstacles during the transition phase*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 1998.
- [Souères *et al.* 98b] P. Souères, T. Hamel, V. Cadenat & A. Dzul. *A reactive path following controller for mobile robots*. In Proceedings of the Advances in Vehicles Control and Safety conference, July 1998.
- [Swain *et al.* 99] R. Swain, M. Devy & V. Cadenat. *Controlling the execution of a visual servoing task*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 25, no. 4, August 1999.
- [Swain 99] R. Swain. *Contrôle de tâches référencées vision pour la navigation d'un robot mobile en milieu structuré*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Juin 1999.
- [Tsakiris *et al.* 96] D.P. Tsakiris, C. Samson & P. Rives. *Vision-based time-varying stabilization of a mobile manipulator*. In Proceedings of the 4th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV' 96), Westin Stanford, Singapore, December 1996.
- [Tsakiris *et al.* 97a] D.P. Tsakiris, K. Kapellos, C. Samson, P. Rives & J.J. Borrelly. *Experiments in real-time vision-based point stabilization of a nonholonomic mobile manipulator*. In Proceedings of the 5th International Symposium on Experimental Robotics (ISER' 97), Barcelona, Spain, June 1997.
- [Tsakiris *et al.* 97b] D.P. Tsakiris, P. Rives & C. Samson. *Applying visual servoing techniques to control non-holonomic mobile robots*. In Proceedings of the workshop on new trends in image-based robot servoing (IROS'97), Grenoble, France, September 1997.

Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile

Une première approche du problème de la commande des robots mobiles repose sur la synthèse de lois de commande en boucle fermée sur l'état du robot. La mise en oeuvre de telles lois nécessite la localisation du robot par rapport à un repère fixe, étape coûteuse en temps calcul et source d'erreurs. L'utilisation de capteurs plus performants a permis l'émergence d'une nouvelle approche dans laquelle la tâche robotique est spécifiée dans l'espace capteur : la commande référencée capteur. Celle-ci consiste à définir des boucles de commande directement à partir des données sensorielles, sans avoir à relocaliser le robot. Dans ce contexte, la richesse du signal vidéo a permis le développement de l'asservissement visuel qui repose sur la régulation des indices visuels dans l'image. Toutefois, comme de nombreuses tâches robotiques ne peuvent être spécifiées seulement de cette manière, il apparaît nécessaire de considérer dans la commande des informations provenant de capteurs de nature différente. Les travaux menés dans cette thèse s'inscrivent dans cette problématique et visent à étendre les techniques d'asservissement visuel. Plus précisément nous nous sommes focalisés sur la commande d'un robot mobile équipé d'un télémètre laser et d'une caméra. Notre contribution a consisté à élaborer un ensemble de stratégies de commande, en boucle fermée sur les informations visuelles et télémétriques, pour réaliser une tâche de navigation en milieu encombré. Nous proposons une analyse comparative des différentes méthodes, ainsi qu'une simulation des stratégies correspondantes. De plus, notre travail nous a conduit à définir la notion canonique de tâche élémentaire référencée multi-capteurs sur laquelle repose la navigation référencée capteurs. Ces résultats nous ont donc permis d'aborder le problème de l'enchaînement de tâches de nature différente, spécifiées en termes d'informations sensorielles, afin de réaliser une tâche complète de navigation dans un environnement structuré.

Mots clés : Robots non holonomes, Navigation, Commande, Asservissement visuel, Commande référencée capteur.

Multi-sensor-based control for mobile robot navigation

A classical way to deal with mobile robot control is to synthesize state feedbacks. As a consequence, such methods require the state estimation and the localization of the vehicle. However, this localization step is time-consuming and introduces errors in the control law. The recent development of high performance sensors allows to express the robotic task in the sensor space rather than in the configuration space, giving rise to a new approach known as sensor-based control. The control laws are then defined as output feedbacks and the localization step can therefore be avoided. Among these methods, as CCD cameras provide high-rate meaningful data, visual servoing has been particularly investigated. This method which relies on the interaction between the camera and the visual features movements consists of regulating an error in the image plane. Nonetheless, as numerous robotic tasks cannot be expressed as a sole regulation of visual datas, different kind of sensory informations has to be used when defining control laws. The works developed in this thesis are highly related to the sensor-based control field and aim at extending the visual servoing techniques. More precisely, we are interested in controlling a mobile robot equipped with a camera and a laser range sensor. From these data, we have elaborated several control strategies allowing such a robot to perform a visual servoing task in a cluttered environment. We have compared one another and presented corresponding simulation results. Moreover, we have defined the notion of elementary task, key-notion for sensor-based navigation. Therefore, the proposed results allow us to deal with the problem of connecting different kind of robotic tasks in order to perform a complex navigation task in a structured environment.

Keywords : Nonholonomic robots, Navigation, Control, Visual servoing, Sensor-based control.