

Université Blaise Pascal
Clermont-Ferrand

Ecole Doctorale SPI

Rapport d'Habilitation

présentée par

Philippe Martinet

Maîtres de Conférences à l'UBP-CUST

pour obtenir

L'Habilitation à Diriger des Recherches

Titre : ASSERVISSEMENT VISUEL

soutenue le 20 janvier 1999 devant le jury composé de:

Messieurs	Bernard Espiau	<i>Président Examineur</i>
	François Chaumette	<i>Rapporteur</i>
	Philippe Coiffet	<i>Rapporteur</i>
	Jean Gallice	<i>Rapporteur</i>
	Giulio Sandini	<i>Rapporteur</i>
	Michel Dhome	<i>Examineur</i>
	Michel Berducat	<i>Invité</i>

Table des matières

1	Généralités	7
1.1	Introduction	7
1.2	Asservissement visuel 3D	8
1.3	Asservissement visuel 2D	9
1.4	Approche fonction de tâche	10
1.5	Les outils en asservissement visuel	11
1.6	Nos recherches en asservissement visuel	14
2	Asservissement visuel 2D	15
2.1	Introduction	15
2.2	Robotique manipulatrice	18
2.3	Robotique mobile	23
3	Asservissement visuel 3D	37
3.1	Introduction	37
3.2	Robotique mobile	42
3.3	Robotique manipulatrice	48
4	Bilan et Perspectives	53

Table des figures

1.1	Asservissement visuel 3D ” <i>Position based Visual Servoing</i> ”	9
1.2	Asservissement visuel 2D ” <i>Image based Visual Servoing</i> ”	9
1.3	Système de vision parallèle WINDIS	12
1.4	Schémas équivalents simplifiés : cas $3D$ et $2D$	13
1.5	Simplifications : cas $3D$ et $2D$	13
2.1	Scène sphérique : couplage laser/caméra	18
2.2	Enchaînement de tâches autour d’un cube	21
2.3	Construction de la primitive invariante	22
2.4	Type d’objets complexes	23
2.5	Modèle bicyclette	25
2.6	Site expérimental	27
2.7	Evolution du paramètre a et de l’écart latérale x	29
2.8	La moissonneuse-batteuse et son modèle	31
2.9	Modèle du réseau de neurone retenu	32
2.10	Effet de la pente sur la position et orientation du véhicule	33
2.11	Effet de la pente sur la modélisation de la scène	33
2.12	Nouveau schéma d’asservissement visuel - Principe de l’adaptation	34
2.13	Résultats simulés et expérimentaux en présence de pente	35
3.1	Tondeuse à gazon : architecture hydraulique et prototype	42
3.2	Tondeuse à gazon : modélisation par un essieu rigide	43
3.3	Tondeuse à gazon : génération de trajectoire	43
3.4	Plan image $2D$ - Schéma d’asservissement visuel $3D$	44
3.5	Agriculture de précision : cycle annuel et système de communication	45
3.6	Evaluation d’un système GPS cinématique	46
3.7	Profil de route et de champ	47
3.8	Objet $3D$ - Capteur $3D$	48
3.9	Les différents repères utilisés	50

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Dans son livre *Robot habilis - Robot sapiens* (Coiffet, 1993), Philippe Coiffet présente un historique et fait un bilan sur les développements de la robotique. Il introduit les notions d'*homme assisté par robot* et de *robot assisté par l'homme* afin de bien montrer que la perception de l'environnement d'un robot est loin d'être un problème résolu (nécessitant une coopération humaine), qu'il est indispensable d'inclure l'homme dans le concept de robotique, et que l'on ne sait pas encore comment dire qui doit prendre la décision entre un robot et un homme (en supposant bien sur, que le robot puisse la prendre!).

Percevoir l'environnement est l'une des facultés qui caractérisent l'homme et bien d'autres organismes vivants (insectes, cétagés, oiseaux, ...). Pour augmenter l'autonomie des robots en environnement structuré ou non structuré, des recherches ont donc été nécessaires sur les capteurs et les traitements associés, et la notion de système robotique a dû évoluer. En effet, on parle aujourd'hui de système ou de robot autonome dans un environnement donné. Par conséquent, le système robotisé inclut non seulement le robot et son électronique de commande mais également l'environnement dans lequel il évolue. Ainsi, un robot pourra être équipé de caméra, de télémètre laser, de radar, de capteurs d'ultra-sons, de capteurs d'effort, ou bien d'autres types de capteurs permettant de faciliter la perception et l'action avec l'environnement.

En ce qui concerne le capteur de vision, les premiers travaux concernant l'utilisation d'un capteur de vision pour la commande de robots manipulateurs remontent dans les années 70. Par exemple, on peut citer les travaux de Robert Bolles et Richard Paul (Bolles and Paul, 1973), de Y. Shirai et H. Inoue (Shirai and Inoue, 1973) sur des tâches d'assemblage utilisant une caméra fixe et définissant des actions de type "look and move". Parmi les premiers travaux sur l'asservissement visuel 3D, on peut noter ceux présentés par G.J. Agin (Agin, 1979) où la caméra est embarquée sur l'effecteur du robot afin d'estimer une erreur de position.

Au début des années 80, Arthur C. Sanderson et Lee E. Weiss (Sanderson and Weiss, 1980; Sanderson and Weiss, 1983; Weiss, 1984; Weiss, Sanderson and Neuman, 1987) ont introduit une importante classification des schémas d'asservissement visuel basée principalement sur deux critères: *l'espace de contrôle du robot* et *la présence ou non d'une boucle interne* au niveau des actionneurs du robot.

Pour l'espace de contrôle, deux possibilités sont proposées : l'espace cartésien ou opérationnel du robot, ou bien l'espace du capteur (l'espace image pour une caméra). Dans le premier cas, on parlera d'**asservissement visuel 3D** et dans le second d'**asservissement visuel 2D**. Une présentation générale de ces deux approches est proposée dans les paragraphes 1.3 et 1.2 et la mise en œuvre de ces techniques fait l'objet de nos travaux de recherche synthétisés tout au long de ce rapport.

L'existence ou non d'une boucle *interne* d'asservissement en position dans l'espace articulaire devient importante dès lors que la boucle d'asservissement *externe* est rapide. En l'absence de boucle interne, peu de travaux ont été engagés en asservissement visuel pour les robots manipulateurs. Nous pouvons citer par exemple les travaux de Koichi Hashimoto (Hashimoto, Ebine and Kimura, 1996) portant sur la mise en œuvre d'une technique de commande optimale de type LQ, et de J.A. Gangloff (Gangloff, Mathelin and Abba, 1998) sur la mise en œuvre d'un contrôleur prédictif généralisé prenant en compte la dynamique totale du système robot caméra. Les dernières expérimentations développées par J.A. Gangloff utilisent une caméra rapide et la boucle de commande possède un période d'échantillonnage inférieure à 10 ms.

Nos activités de recherche en asservissement visuel reposent principalement sur la mise en œuvre de méthodes 2D ou 3D avec des applications pour les robots mobiles et les robots manipulateurs. Après un rapide état de l'art permettant de situer nos travaux dans la communauté internationale, nous développerons les outils mis en œuvre et les résultats acquis sur l'**asservissement visuel 2D** et sur l'**asservissement visuel 3D**.

1.2 Asservissement visuel 3D

La première approche proposée par Arthur C. Sanderson et Lee E. Weiss (Sanderson and Weiss, 1980) est basée sur le contrôle du robot dans son espace opérationnel. Dans ce cas, les signaux capteurs $\underline{s}(t) = \underline{r}(t)$ à réguler représentent l'attitude (position et orientation) de l'effecteur du robot dans l'espace opérationnel. On parlera d'estimateur de *Pose* ou de mesure indirecte de *Pose*. Lorsque le capteur caméra est embarqué sur l'effecteur du robot, le retour visuel constitue un **Capteur de Pose 3D** (figure 1.1) généralement de l'objet dans le repère caméra. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre un algorithme de localisation et de reconstruction de l'objet observé utilisant, comme entrées, les mesures dans l'image $\underline{f}(t)$ et le modèle de l'objet à reconstruire.

Parmi les avantages liés à l'utilisation d'une telle approche, on peut citer celui de l'espace de contrôle qui est équivalent à l'espace opérationnel du robot, et qui permet de simplifier la définition de la tâche robotique. Parmi les inconvénients les plus cités, on peut noter le problème lié à la modé-

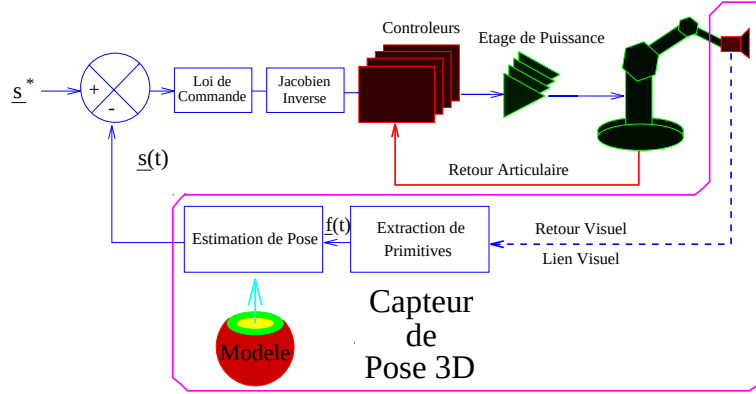


FIG. 1.1 – Asservissement visuel 3D "Position based Visual Servoing"

lisation de l'objet, celui lié à la reconstruction et au calibrage de la caméra (paramètres intrinsèques et extrinsèques), le temps de calcul nécessaire à l'obtention de la mesure de la *Pose*, le délai introduit par ce même calcul, les cas singuliers liés à l'algorithmie de reconstruction ou à la représentation des primitives dans l'image, l'influence de la précision de détection des primitives sur le calcul de la *Pose*, pour ne citer que les plus importants et les plus discutés.

1.3 Asservissement visuel 2D

La seconde approche, couramment appelée "*Image based Visual Servoing*", définit le contrôle dans l'espace du capteur (plan image pour une caméra). Les signaux capteurs $\underline{s}(t)$ sont constitués de primitives extraites de l'image caractérisant une forme observée dans l'image. Le schéma d'asservissement visuel correspondant est donné par la figure 1.2.

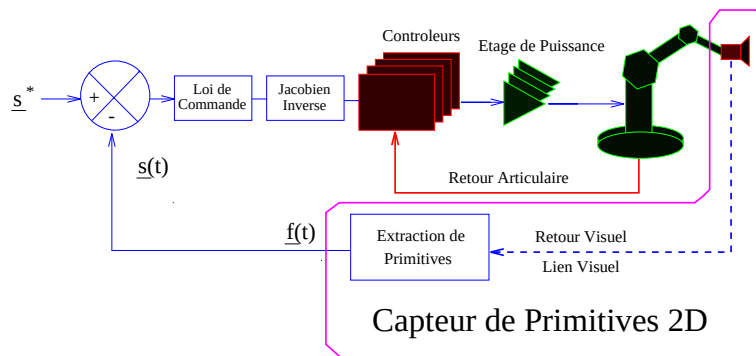


FIG. 1.2 – Asservissement visuel 2D "Image based Visual Servoing"

Cette approche est la plus naturelle car elle formalise des lois de commande directement dans

l'espace du capteur, ce qui pour les automaticiens est évident. Une des principales difficultés de cette approche est sa mise en œuvre, dans le sens où il faut savoir définir une tâche robotique dans l'espace de ce capteur. Outre l'aspect modélisation nécessaire à son implémentation, l'interprétation de l'évolution des signaux capteurs pour une tâche donnée est loin d'être évidente. Parmi les avantages, nous pouvons citer la rapidité d'extraction des primitives visuelles (vraie pour les primitives simples, discutable pour les primitives complexes comme le flot optique), et la modélisation partielle de l'objet à l'aide de primitives élémentaires (points, segments, ellipses, ...)

Une majorité des travaux réalisés en asservissement visuel 2D sont basés sur l'approche **Fonction de tâche** (Samson, Le Borgne and Espiau, 1991) proposée par Claude Samson et B. Espiau à la fin des années 80. Son adaptation au cas particulier de la vision a été réalisée au début des années 90 par François Chaumette (Chaumette, 1990; Espiau, Chaumette and Rives, 1992). Nous allons maintenant présenter brièvement cette approche car nos travaux en **asservissement visuel** reposent essentiellement sur cette approche.

1.4 Approche fonction de tâche

Plusieurs travaux réalisés sur la commande ont permis d'initialiser le formalisme de la *Commande Référencée Capteur* (Samson et al., 1991). Parmi ceux-ci, on peut citer les travaux de Bernard Espiau sur la commande proximétrique dans les années 85. L'approche proposée par Claude Samson est basée sur la définition d'une fonction de tâche qui représente une fonction d'erreur $\underline{e}(t)$ telle que :

$$\underline{e}(t) = C.(\underline{s}(\underline{r}, t) - \underline{s}^*) \quad (1.1)$$

où C est une matrice de combinaison des signaux capteurs $\underline{s}(\underline{r}, t)$ et $\underline{s}^*$ la valeur désirée de $\underline{s}$ lorsque la tâche est réalisée.

Dans le cas d'une cible fixe, une loi de commande $\mathcal{T}_c$ possible est la suivante :

$$\mathcal{T}_c = -\lambda. \widehat{L_s^T}^+ . (\underline{s}(\underline{r}, t) - \underline{s}^*) \quad (1.2)$$

Cette loi de commande proportionnelle est synthétisée en imposant comme hypothèse une décroissance exponentielle de la dite fonction de tâche $\dot{\underline{e}} = -\lambda.\underline{e}$. Elle permet de réaliser une tâche robotique de positionnement.

Considérons m , la dimension du vecteur du signal capteur $\underline{s}$, et n le nombre de degré de liberté à commander. Lorsque le rang de la matrice L_s^T est inférieur à n , alors tous les degrés de liberté ne sont pas contraints pour réaliser la tâche de positionnement. Dans ce cas, il est possible d'utiliser les axes non contraints pour réaliser une tâche secondaire. Cette tâche secondaire peut, par exemple, minimiser une fonction de coût h_s . Dans ce cas, on peut construire une fonction de tâche hybride globale telle que :

$$\underline{e} = W^+ \underline{e}_1 + \alpha (\mathbf{I}_n - W^+ W) g_s^T \quad (1.3)$$

où

- W est une matrice telle que son noyau soit égal à celui du jacobien de tâche $J_1 = \frac{\partial e_1}{\partial \underline{r}}$ définissant la tâche primaire e_1 ($Ker(W) = Ker(J_1)$),
- g_s représente le gradient de la fonction de coût h_s ($g_s = \frac{\partial h_s}{\partial \underline{r}}$),
- $\mathbf{I}_n - W^+W$ représente l'opérateur de projection orthogonale sur le noyau de W (donc de J_1).
- α est un scalaire défini positif permettant de régler l'importance de la tâche secondaire par rapport à la tâche primaire

Ainsi, on peut définir une loi de commande globale permettant de réaliser la fonction de tâche hybride:

$$\mathcal{T}_c = -\lambda.W^+W.\widehat{L_{\underline{s}}^{T+}}.(\underline{s}(t) - \underline{s}^*) - \lambda.\alpha(\mathbf{I}_n - W^+W).g_s^T - W^+\frac{\partial \widehat{e_1}}{\partial t} - \alpha(\mathbf{I}_n - W^+W)\frac{\partial g_s^T}{\partial t} \quad (1.4)$$

où les termes munis d'un $\widehat{}$ traduisent une estimation de ces termes.

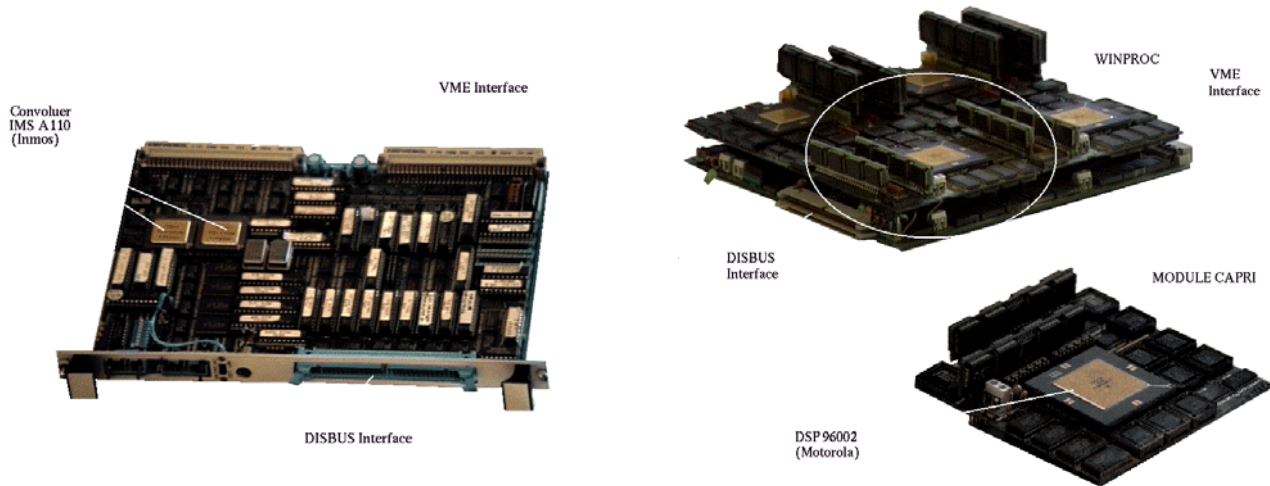
1.5 Les outils en asservissement visuel

Une des particularités rencontrées en asservissement visuel 2D ou 3D porte sur les outils à mettre en œuvre pour assurer une boucle fermée: algorithmes d'extraction de primitives, architecture dédiée, modélisation de la boucle d'asservissement, et mise en œuvre de simulateurs et de démonstrateurs.

Architecture dédiée à l'asservissement visuel

L'extraction temps réel de primitives visuelles pertinentes et précises est une des contraintes strictement nécessaire à l'élaboration d'un schéma d'asservissement visuel. Cette contrainte s'efface peu à peu face à l'évolution technologique des processeurs, et l'on oublie parfois de garantir le côté déterministe de cette extraction. Les algorithmes d'extraction sont de plus en plus complexes et font appel à des circuits électroniques dédiés, ou à des processeurs de dernière génération mettant en œuvre des techniques de parallélisme intégré et de calcul câblé.

Faisant suite à plusieurs problèmes "temps réel" rencontrés dans le cadre d'un contrat avec le constructeur automobile Peugeot SA, en 1991 nous avons étudié une architecture dédiée aux applications d'asservissement visuel. La figure 1.3 montre les cartes électroniques que nous avons développées. Cette machine de vision parallèle (Martinet, Rives, Fickinger and Borrelly, 1991; Fickinger, 1992; Rives, Borrelly, Gallice and Martinet, 1993), appelée **Windis**, a fait l'objet d'une collaboration avec l'INRIA de Sophia-Antipolis (P. Rives et J.J. Borrelly). Le but de ce contrat était

FIG. 1.3 – *Système de vision parallèle WINDIS*

le *guidage latéral d'un véhicule par vision*. Aussi, une des premières applications implantées sur le système *Windis* a été de montrer la faisabilité temps réel d'une segmentation polygonale et d'interprétation de scènes routières (Jurie, Martinet and Gallice, 1995) par la mise en œuvre de réseaux d'hypothèses développées dans la thèse de Frédéric Jurie (Jurie, 1993). Le résultat de l'implantation a été validée à la cadence de 240 ms sur la machine *Windis*.

L'originalité de cette machine porte sur la notion de fenêtres actives (taille et position variables, traitements bas et moyen niveaux programmables), et sur le parallélisme mis en œuvre à chaque niveau de traitement. Un gestionnaire dynamique de fenêtres actives, appelé *Winman*, permet de simplifier l'implantation temps réel d'applications sur cette machine parallèle. Deux prototypes ont été développés et sont opérationnels depuis 1993.

Une autre application a été implantée en temps réel (Montagne, Alizon, Martinet and Gallice, 1994) et concerne le suivi d'amers visuels pour l'estimation de l'écart relatif entre deux véhicules qui se suivent (navigation en convoi par exemple). Commencée durant la thèse d'Eric Montagne (Montagne, 1996), le but est la mise en œuvre d'une technique de localisation du véhicule situé à l'avant, à partir de la détection et le suivi de trois amers lumineux dans une séquence d'images. Ces travaux se poursuivent actuellement dans le cadre de la thèse de François Marmoiton et ont fait l'objet d'une communication (Marmoiton, Collange, Martinet and Derutin, 1998).

La modélisation de la boucle en asservissement visuel

Le processus de commande est un processus discret dont la période d'échantillonnage est le plus souvent constante. Actuellement, cette période d'échantillonnage tend à devenir de plus en plus faible

par la mise en œuvre soit de caméra rapide ($T_e < 10ms$) (Gangloff et al., 1998) ou de techniques d'extraction directe ($T_e \simeq 1ms$) de zones d'intérêt sur la matrice CCD (matrice à accès aléatoire) couplée avec des circuits de traitements spécifiques (ASIC) pour la paramétrisation des primitives (Ishii, Nakabo and Ishikawa, 1996). Pour la plupart des travaux à l'heure actuelle, cette période est la cadence vidéo (40 ms).

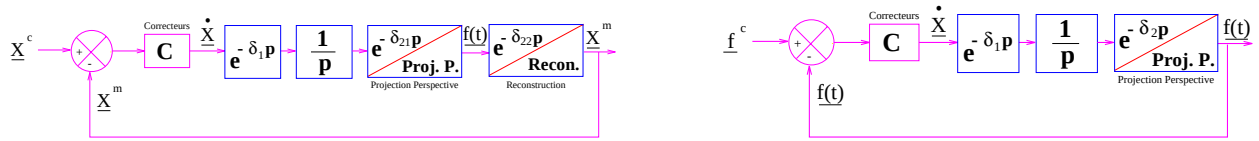


FIG. 1.4 – Schémas équivalents simplifiés : cas 3D et 2D

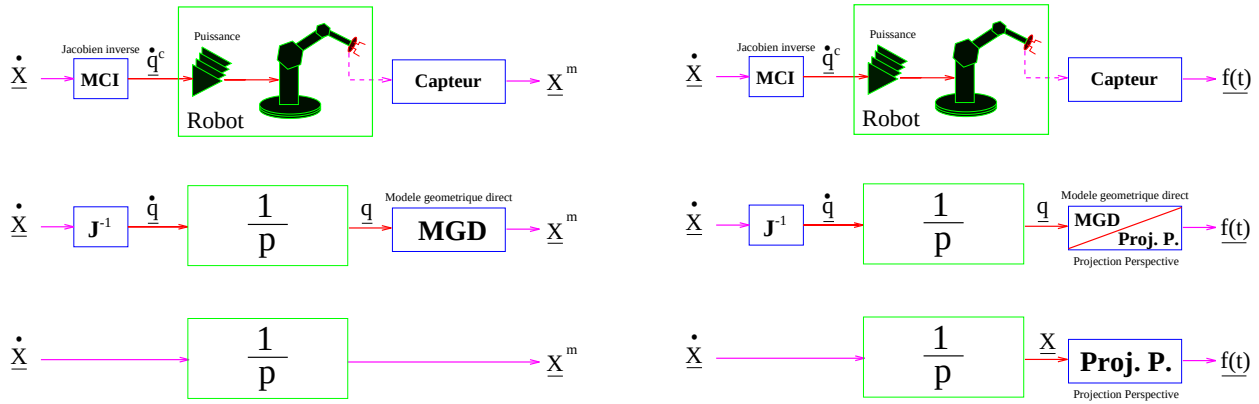


FIG. 1.5 – Simplifications : cas 3D et 2D

Dans le cas continu, la boucle d'asservissement visuel pour un *robot idéal* peut se résumer par les deux synoptiques représentés par la figure 1.4, en utilisant les simplifications de la figure 1.5 amenant au concept de *robot idéal* pour la commande en vitesse à partir d'une mesure de position. Le processus d'intégration est dû au capteur estimant la position, et le retard pur introduit dans la boucle provient de la mise en pipeline éventuelle des algorithmes d'extraction des primitives 2D et/ou 3D utilisés (retard δ_2), et de la communication entre le processus de vision et le processus de commande des actionneurs du robot (retard δ_1). Ce retard pur est loin d'être négligeable et peut entraîner des cas d'instabilité ou de divergence. On notera que peu d'auteurs dans notre communauté, prennent en compte cette caractéristique pour l'élaboration de lois de commande.

Dans le cas 3D parfait continu, on peut rapidement montrer qu'avec un simple retour proportionnel, on arrive à une loi de type décroissance exponentielle de la fonction de tâche $\underline{e} = \underline{X}_c - \underline{X}_m$. Les hypothèses d'un robot idéal ne sont jamais vérifiées, et la diminution de la période d'échantillonnage

pose alors le problème incontournable de la prise en compte du modèle dynamique du robot, pour réaliser des commandes rapides et précises.

Des simulateurs aux démonstrateurs

Au niveau simulateur, nous avons développé (Berry, 1998), en langage C sur station de travail HP, un noyau de simulateur de déplacement de corps solides (intégrant la cinématique). Munis de ce noyau, plusieurs simulateurs ont vu le jour : un simulateur pour la comparaison de loi de commande 2D et 3D (Mezouar, 1998), et un simulateur dédié au problème de contournement d'objet par asservissement visuel (Berry, 1998). D'autres simulateurs dédiés à la robotique mobile ont été développés, et la mise en œuvre récente d'outils comme Matlab nous a permis d'élargir encore plus le champ de la modélisation et de la simulation.

Au niveau des démonstrateurs, nous avons mis en œuvre une plate-forme robotique AFMA avec 6 degrés de liberté au LASMEA, une tondeuse à gazon et une moissonneuse-batteuse au Cemagref.

1.6 Nos recherches en asservissement visuel

Nos recherches en asservissement visuel s'articulent autour des deux approches présentées précédemment. Nous avons pris comme champ d'application la robotique mobile et la robotique manipulatrice. Notre volonté première est la compréhension de la boucle de retour visuel. Dans cette optique, nous avons pensé qu'il était aussi important de maîtriser l'asservissement visuel 2D que l'asservissement visuel 3D.

Nous présenterons dans un premier temps nos développements autour de l'approche 2D. Après un bref état de l'art, les travaux de thèse de Guy Motyl et François Berry pour la robotique manipulatrice, et de Christophe Debain et Djamel Khadraoui, pour la robotique mobile seront abordés.

Dans un second temps, l'approche 3D sera développée. Pour la robotique mobile, les travaux de Christophe Debain et de Lionel Cordesses sur le guidage de véhicules agricoles seront présentés. Les travaux réalisés par Jean Gallice et moi-même, et par Youcef Mezouar durant son DEA dans le cadre de la robotique manipulatrice seront exposés.

Nous finirons ce chapitre en dressant un bilan sur ces différents travaux et nous listerons un certain nombre de perspectives pour les travaux futurs.

Chapitre 2

Asservissement visuel 2D

2.1 Introduction

Les premières manipulations en asservissement visuel débutent dans les années 70. Dans les années 80, la Commande Référencée Capteur est développée par Claude Samson et Bernard Espiau. Son application au capteur caméra, la Commande Référencée Vision, est réalisée par François Chaumette fin des années 80. Depuis ces années jusqu'en 1993 un certain nombre de personnes se sont focalisées sur le problème de l'asservissement visuel. Sans vouloir être totalement exhaustif, nous allons citer quelques travaux dans le domaine.

Certains auteurs se sont intéressés aux différents moyens de calculer la matrice d'interaction. Nous pouvons citer la méthode analytique proposée par François Chaumette dans sa thèse (Chaumette, 1990) et que nous avons développée pour le capteur particulier Laser/Caméra dans le cadre de la thèse de Guy Motyl (Motyl, 1992). Le problème posé par une forme analytique est son utilisation en ligne. Plusieurs approches ont été proposées : l'estimation de la matrice à l'équilibre, ce qui permet d'éviter l'évaluation de la profondeur à chaque itération (cas de la majorité des travaux à ce jour), l'estimation de la matrice en ligne à partir d'une forme analytique et d'un estimateur de profondeur (Dornaika, 1995), l'estimation de la matrice en ligne sans connaissances a priori (Hosoda and Asada, 1994; Jagersand, Fuentes and Nelson, 1997), ou l'estimation de sa valeur numérique par réseau de neurones (Suh, 1993).

Parmi les autres centres d'intérêt, il y a le suivi d'objets mobiles par asservissement visuel. Ainsi, on peut citer les travaux de Won Jang (Jang and Bien, 1991) sur un objet dont la vitesse est supposée constante mais inconnue (robot à 3 degrés de liberté, loi de commande PID). François Chaumette propose la mise en œuvre de la Commande Référencée Vision (Chaumette, Rives and Espiau, 1991) dans le cas du suivi d'un objet plan à partir d'un estimateur de mouvement (robot à 6 degrés de liberté, loi de commande PI), et durant sa thèse Farabi Bensalah (Bensalah, 1996) a mis en œuvre différentes techniques de filtrage de Kalman et de test du GLR (*Generalized Likelihood Ratio*) per-

mettant de détecter, d'estimer et de compenser les ruptures de modèles de mouvements utilisés. Dans (Papanikolopoulos, Khosla and Kanade, 1991; Papanikolopoulos, Khosla and Kanade, 1993; Papanikolopoulos, Nelson and Khosla, 1995), Nikolaos Papanikolopoulos modélise le mouvement de l'objet comme une perturbation déterministe et constante (robot à 6 degrés de liberté, loi de commande PI, Placement de pôles, LQG). Peter K. Allen dans (Allen, Timcenko, Yoshimi and Michelman, 1993) suppose la trajectoire de l'objet connue et met en œuvre un mécanisme de prédiction/planification (robot à 6 degrés de liberté, génération de trajectoire). Koichi Hashimoto dans (Hashimoto, Kimoto, Ebine and Kimura, 1991) propose une loi de commande optimale pour assurer le suivi d'un objet. Pour finir, dans (Corke and Good, 1993) Peter I. Corke propose le suivi d'objet basé sur un modèle d'état à vitesse constante.

Introduit par Yiannis Aloimonos (Aloimonos, Weiss and Bandyopadhyay, 1987; Aloimonos, Weiss and Bandyopadhyay, 1988) et par Ruzena Bajcsy (Bajcsy, 1988), la vision active a incité certains auteurs à utiliser l'asservissement visuel pour imposer des mouvements permettant de conserver certaines propriétés en relation/interaction avec l'environnement ou un objet considéré. On peut citer les travaux effectués par Samia Boukir (Boukir, 1993) puis Eric Marchand (Marchand, 1996) dont le but principal est l'exploration et la reconstruction de scènes statiques. D. Djian dans (Djian and Rives, 1998) présente une stratégie de perception mettant en œuvre des *actions capteurs* afin de faciliter le processus de reconnaissance.

Des primitives visuelles autres que géométriques peuvent être intéressantes en asservissement visuel. Ainsi, certains se sont focalisés sur l'utilisation de primitives dynamiques : Sandini dans (Salganicoff, Metta, Oddera and Sandini, 1993; Questa, Grossmann and Sandini, 1995), Sundareswaran dans (Sundareswaran, Bouthemy and Chaumette, 1994; Sundareswaran, Bouthemy and Chaumette, 1996), Armel Cretual (Cretual and Chaumette, 1997; Cretual and Chaumette, 1998) et François Berry dans (Martinet, Berry and Gallice, 1996a).

Un certain nombre d'auteurs se sont penchés sur les problèmes liés à la navigation par asservissement visuel. La sélection automatique de primitives a fait l'objet de travaux (Feddema, Lee and Mitchell, 1989; Feddema and Lee, 1990; Feddema, Lee and Mitchell, 1991; Janabi - Sharifi and Wilson, 1997; Papanikolopoulos et al., 1993; Pavlidis and Papanikolopoulos, 1996), ainsi que l'enchaînement de tâches d'asservissement visuel (Feddema and Mitchell, 1989; Pissard-Gibollet, 1993; Berry, Martinet and Gallice, 1997; Swain and Devy, 1997).

Certains auteurs travaillent sur l'asservissement visuel à partir d'un système de vision binoculaire. Parmi eux, Greg Hager dans (Hager, Chang and Morse, 1995), Jim Crowley dans (Crowley and Chaumette, 1995), Noriaki Maru dans (Maru, Kase, Yamada, Nishikawa and Miyazaki, 1993), C. Capurro dans (Capurro, Panerai, Grosso and Sandini, 1993), et K. Hosoda dans (Hosoda, Sakamoto and Asada, 1995).

D'autres auteurs se sont intéressés aux problèmes de singularité, de robustesse et de stabilité

liés à l'asservissement visuel 2D. Henri Michel montre l'existence de cas de singularités (Michel and Rives, 1993) du jacobien de tâche dus à la représentation géométrique de l'objet dans le cas particulier de l'utilisation de 3 points. Dans (Marchand, Chaumette and Rizzo, 1996), Eric Marchand propose l'utilisation de tâches secondaires pour l'évitement de butées et de singularités. Espiau dans (Espiau, 1993; Espiau, 1995) analyse l'effet des erreurs de calibrage de caméra sur l'asservissement visuel et propose une étude de cas particuliers de stabilité. Enfin, François Chaumette dans (Chaumette, 1998b) présente une étude sur les problèmes de stabilité et de convergence en asservissement visuel.

En dehors de l'approche Commande Référencée Vision, certains auteurs se sont intéressés à la mise en œuvre de techniques de commande avancées appliquées au cas particulier de l'asservissement visuel. Concernant le contrôle prédictif, on peut citer les travaux de Jacques A. Gangloff (Gangloff et al., 1998) qui propose l'application de techniques contrôle prédictif généralisé (Clarke, Mothadi and Tuffs, 1987) à un système robot/caméra sans bouclage interne. Concernant la commande optimale, Koichi Hashimoto dans (Hashimoto et al., 1991) développe une approche de commande optimale LQ et traite le cas où le nombre de primitives visuelles est redondant dans (Hashimoto et al., 1996), et Nikolaos Papanikolopoulos dans (Couvignou, Papanikolopoulos, Sullivan and Khosla, 1996; Sullivan and Papanikolopoulos, 1996) met en œuvre une technique de contrôle optimal de type LQG appliqué dans le cas d'objets déformables, et dans (Papanikolopoulos and Khosla, 1993) il développe une technique de commande adaptative. Peter Corke dans ses travaux (Corke, 1996) utilise un retour d'état avec placement de pôles. Pour notre part, Djamel Khadraoui durant sa thèse (Khadraoui, 1996) a appliqué des techniques de placement de pôles et de commande robuste H_∞ pour le contrôle latéral de robots mobiles.

Depuis ces cinq dernières années, l'asservissement visuel connaît un essor important. Pour un état de l'art sur ce sujet, je recommande aux lecteurs l'étude bibliographique réalisée par Peter Corke (Corke, 1993) dans le livre *Visual Servoing* écrit par Koichi Hashimoto (Hashimoto, 1993), le livre de Peter Corke (Corke, 1996), le tutorial présenté par Seth Hutchinson, Greg Hager et Peter Corke (Hager, Hutchinson and Corke, 1996), les numéros spéciaux des journaux IJRA (12(5):1996) et IJCV (to appear:1999) dédiés à l'asservissement visuel. Pour des sujets connexes à l'asservissement visuel, il est tout aussi intéressant de lire l'ouvrage de Yiannis Aloimonos (Aloimonos, 1993) sur la *perception active*.

Notre contribution porte sur deux types d'application : la robotique manipulatrice et la robotique mobile. Dans un premier paragraphe, nous présenterons nos activités en asservissement visuel 2D pour les robots manipulateurs et dans un second, comment nous avons mis en œuvre l'asservissement visuel 2D pour le contrôle latéral de robots mobiles.

2.2 Robotique manipulatrice

Nos travaux en asservissement visuel 2D débutent fin des années 90, par la thèse de Jean-Philippe Urban (Urban, 1990) sur l'utilisation d'un retour visuel pour le contrôle d'un robot à 5 degrés de liberté ASEA-IRB5 et se poursuivent par la modélisation de primitives visuelles pour le cas particulier du capteur Caméra/Laser (Motyl, 1992).

Depuis 1995, nous nous intéressons au Contournement d'objets complexes par asservissement visuel (Berry, 1998). Le but étant de construire une boîte englobante autour de l'objet à partir de la recherche des axes principaux de ce même objet. A cette fin, nous mettons en œuvre une boucle d'asservissement visuel.

Couplage Caméra/laser

L'utilisation du couplage rigide entre une caméra avec un ou plusieurs plans laser est intéressante à plusieurs titres. En effet, en ambiance industrielle l'utilisation d'une caméra CCD n'est pas toujours évidente en raison de la luminosité ambiante. La projection d'un faisceau lumineux sur la scène, et en particulier sur les objets avec lesquels le robot doit entrer en action, permet de réduire l'information visuelle au paramétrage de la trace détectée dans l'image de l'intersection entre les faisceaux plan laser et l'objet. De plus, elle permet d'enrichir le contenu des informations difficilement extractibles à partir d'une image seule.

Dans le cadre des travaux de thèse de Guy Motyl (Motyl, 1992), nous nous sommes intéressés à la modélisation des informations visuelles les plus simples et utiles pour l'élaboration de tâches robotiques : les primitives points de discontinuité, segments et ellipses.

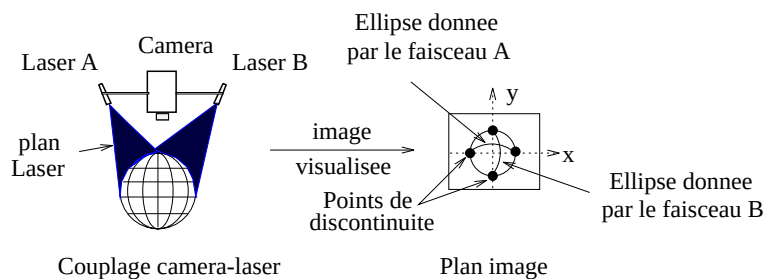


FIG. 2.1 – *Scène sphérique : couplage laser/caméra*

Pour cela nous avons défini deux types de scènes : scènes polyhédriques et scènes sphériques (figure 2.1). Pour le premier type de scène, nous avons établi les matrices d'interaction correspondant aux primitives points et segments en utilisant un ou deux plans laser. Pour le cas de la scène de

type sphérique, nous avons établi la matrice d'interaction pour une primitive de type ellipse en utilisant d'une part un paramétrage par les moments d'inertie, et d'autre part un paramétrage par les points de discontinuité (figure 2.1). Les résultats de ces différentes modélisations sont développés dans (Motyl, 1992; Khadraoui, Motyl, Martinet, Gallice and Chaumette, 1995c).

Nous avons mis en œuvre avec succès ces différents types de modélisations sur un robot ASEA de type IRB5 (5 degrés de liberté), muni d'une caméra montée sur son effecteur. Le traitement d'image a été simplifié à sa plus simple expression : seuillage d'image avec extraction des points les plus brillants. A partir de la liste de ces points, le paramétrage de la primitive visuelle recherchée est mis en œuvre.

Pour l'ensemble de ces manipulations de positionnement par rapport à un objet parallélépipédique (censé représenter une batterie de voiture), ou à une sphère, la matrice d'interaction a été calculée à l'équilibre.

Nous avons également mis en œuvre une tâche secondaire dans le cas d'une scène sphérique. En effet, lorsque l'on souhaite effectuer un positionnement par rapport à une sphère, seuls trois degrés de liberté sont nécessaires. Nous en avons utilisé un quatrième pour effectuer une tâche secondaire qui consiste en une rotation Ω_y laissant invariant les primitives visuelles sélectionnées pour la réalisation de la tâche primaire. Cette tâche secondaire minimise la fonction de coût h_s suivante :

$$h_s = \frac{1}{2}(\theta - \theta_0 - \Omega_y t)^2 \quad (2.1)$$

où θ_0 est l'orientation initiale de la caméra. On en déduit une loi de commande $\mathcal{T}_c$:

$$\mathcal{T}_c = -\lambda W^+ C(\underline{s} - \underline{s}^*) - \frac{\lambda \alpha}{(z^{2*} + 1)} \begin{pmatrix} -z^*(\theta - \theta_0 - \Omega_y t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ (\theta - \theta_0 - \Omega_y t) \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{\alpha}{(z^{2*} + 1)} \begin{pmatrix} -z^* \Omega_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Omega_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Comme nous le constatons dans cette expression, le mouvement engendré par la tâche secondaire, apparaît également sur la translation en X afin de laisser invariantes les informations visuelles régularisées par la fonction de tâche primaire. Une expérimentation sur le robot ASEA-IRB5 a permis de valider cette loi de commande.

Ces travaux de recherche ont donné lieu à la rédaction d'un rapport interne INRIA (Khadraoui et al., 1995c), deux revues (Urban, Motyl and Gallice, 1994; Khadraoui, Motyl, Martinet, Gallice and Chaumette, 1996), trois congrès (Urban, Motyl and Gallice, 1990; Motyl, Chaumette and Gallice, 1992; Motyl, Martinet and Gallice, 1993), et une présentation orale au Pôle SARTA (Journée Asservissement visuel au LRP en 1991).

Contournement d'objets complexes par asservissement visuel

Les travaux de recherche de François Berry (Berry, 1998) concernent le contournement d'objets complexes ou inconnus (faiblement modélisables) par asservissement visuel. Cette approche devrait permettre de générer des mouvements autour d'objets complexes ou inconnus afin d'en effectuer un premier apprentissage, et de répondre à des problèmes d'initialisation de processus de perception/reconnaissance/action pour des objets complexes ou inconnus. En effet, cette approche peut conduire à élaborer un ensemble de points de vue de l'objet pertinents permettant d'en améliorer sa perception, son inspection, voire sa reconnaissance. Cette thématique de recherche est relativement ambitieuse car elle nécessite d'aborder au moins la liste des points suivants :

- génération de trajectoires de la caméra contrôlées dans l'espace image
- enchaînement de trajectoires, donc de tâches d'asservissement visuel
- décomposition multi-vues d'un objet complexe ou inconnu
- gestion ou stratégie de perception pour assurer la navigation dans l'espace des vues
- recherche des déplacements optimaux entre vues dans l'espace des vues
- ...

Nos premiers travaux dans ce domaine ont porté sur le contrôle de la trajectoire de la caméra par rapport à un objet simple et partiellement connu. La connaissance de l'objet s'est limitée aux deux hypothèses suivantes :

- représentation de l'objet par un ensemble de vues $\underline{\mathcal{V}} = \{\underline{\mathcal{V}}_i\}$,
- paramétrage des vues $\{\underline{\mathcal{V}}_i\}$ par une liste $\{\underline{\mathcal{P}}_i\}$ de primitives visuelles pertinentes pour permettre le paramétrage d'un lien rigide entre la caméra et l'objet lors du déplacement.

L'objet que nous avons choisi est un cube dont les faces sont repérées par 4 amers lumineux. Lors d'un mouvement autour de l'objet, du point de vue perception la première difficulté réside dans l'extraction simultanée de plusieurs listes de primitives $\{\underline{\mathcal{P}}_i\}$ rattachées à la vue courante $\{\underline{\mathcal{V}}_c\}$ mais aussi aux vues ayant une connexion directe (gauche, droite, haut, bas) avec la vue courante dans l'espace des vues $\underline{\mathcal{V}}$.

Ce problème théorique de stratégies de perception par vues et listes de primitives n'a pas encore été abordé dans la thèse de François Berry. Dans la communauté scientifique, il existe certaines méthodes de reconnaissances (Grandjean, 1991) qui sont basées sur une représentation de l'objet par un "mapping" de vues. De même, en navigation de robots mobiles, une représentation par cartes locales est proposée par Ivan Collin dans sa thèse (Collin, 1995). Les travaux de Roger Pissard-Gibollet (Pissard-Gibollet, 1993) et Laurence Pelletier (Rives, Pissard-Gibollet and Pelletier, 1996) portent sur les stratégies de navigation et l'enchaînement de tâches en introduisant la notion de visibilité.

Pour le contrôle de la trajectoire de la caméra, nous avons utilisé une méthode de suivi de trajectoires dans l'espace capteur comme le suggère Claude Samson dans (Samson, 1991). Dans ce cadre, nous avons adapté le formalisme de la *Commande Référencée Vision* dans le cas particulier où le signal de référence varie dans le temps. En conservant les mêmes hypothèses - *décroissance exponentielle de la fonction de tâche* $e(\underline{r}, t) = C.(\underline{S}(\underline{r}, t) - \underline{S}^*(t))$ - on obtient la loi de commande suivante :

$$\mathcal{T}_c = -\lambda \hat{L}^{T+} \cdot (\underline{S}(\underline{r}, t) - \underline{S}^*(t)) + \hat{L}^{T+} \frac{d\underline{S}^*(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Deux actions sont présentes dans l'expression analytique de cette loi de commande : une commande de maintien en positionnement (lien rigide) de la caméra par rapport à l'objet, et une action dérivée sur la consigne permettant d'assurer une tâche de suivi de la trajectoire.

Le but de cette approche est de générer une trajectoire $\underline{r}(t)$ de la caméra par le contrôle d'une trajectoire équivalente dans l'espace image $\underline{S}(t)$. Il est clair que cela impose l'existence d'une bijection entre l'espace de représentation dans l'image et celui associé dans l'espace cartésien. En d'autres termes, la matrice $\hat{L}^T = \frac{\partial \underline{S}}{\partial \underline{r}}$ doit être de rang plein tout au long de la trajectoire suivi par la caméra. Ce point est loin d'être évident et nécessite de connaître la meilleure représentation $\underline{S}$ dans l'espace capteur pour le type de mouvement et le type d'objet considéré. A l'heure actuelle, des recherches sont en cours sur les représentations optimales mais peu de résultats sont connus.

En assurant l'hypothèse de l'équivalence précédente, un autre point important porte sur la robustesse de cette approche au regard des problèmes de calibrage et de mesure. En effet, étant en boucle ouverte sur la position de la caméra, le respect du suivi de la trajectoire désirée ne peut être garanti que si l'on dispose d'une bonne estimée de la matrice $\hat{L}^T$ calculée à chaque itération.

Nous n'avons pas abordé ces deux points, cependant nous avons pu constater, tant sur le plan simulé que sur le plan expérimental, la nécessité d'estimer en ligne la profondeur. Cette estimation nous permet ainsi de calculer la matrice d'interaction $\hat{L}_S^T$ à chaque itération. En l'absence d'estimateur précis, des cas d'instabilité ont été rencontrés provenant essentiellement de chute de rang de la matrice d'interaction $\hat{L}_S^T$ occasionnée par une singularité de représentation.

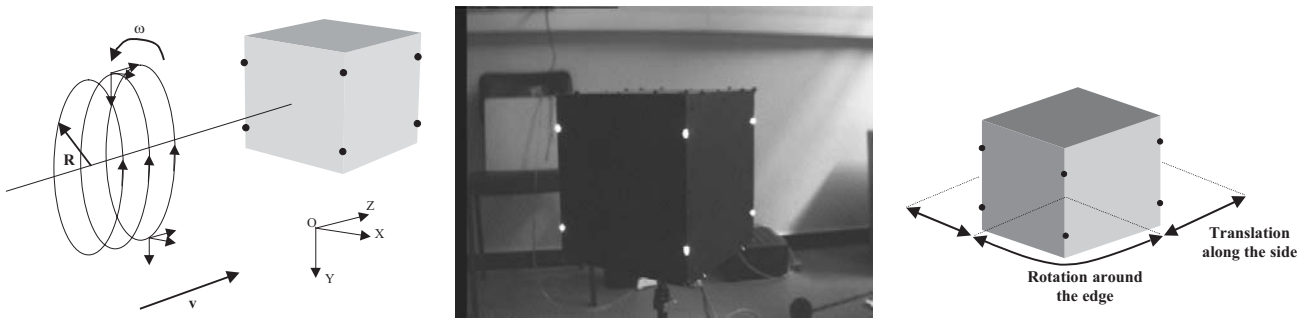


FIG. 2.2 – Enchaînement de tâches autour d'un cube

La mise en œuvre de cette loi de commande a été effectuée et validée sur des trajectoires élémentaires (translation, rotation), puis sur des trajectoires plus complexes (hélicoïde figure 2.2).

Nous avons également mis en œuvre une technique d'enchaînement de tâches référencées capteur (figure 2.2) par l'utilisation de sigmoïdes. Cette technique a également été utilisée dans les travaux de Ricardo Swain (Swain and Devy, 1997) pour un problème de navigation de robot mobile. Une autre technique a été proposée il y a quelques années par Roger Pissard-Gibollet (Pissard-Gibollet, 1993), principalement basée sur un enchaînement de tâches utilisant un mixage de fonctions de tâche.

Actuellement, nous travaillons sur l'apprentissage d'une boîte englobante de l'objet par asservissement visuel (figure 2.3).

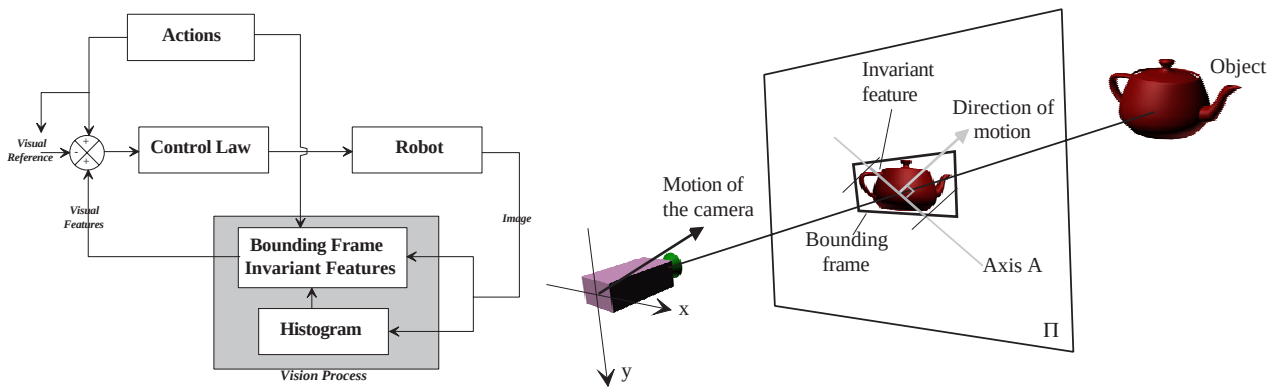


FIG. 2.3 – Construction de la primitive invariante

Dans un premier temps, nous avons défini une fonction de tâche et une loi de commande associée permettant de faire des mouvements par rapport à un objet inconnu. L'idée principale est d'asservir la caméra sur un segment d'orientation constante en maintenant sa position et sa longueur constantes dans l'image. L'orientation du segment est choisie en fonction du déplacement souhaité de la caméra. Au niveau vision, le segment est obtenu en projetant chaque point du contour de l'objet dans la direction orthogonale au déplacement. Un algorithme de vision temps réel a été mis en œuvre pour cette application sur le système Windis. De plus, pour l'extraction du contour un algorithme de calcul de seuil adaptatif (Tsai, 1985) a été implanté. La loi de commande comporte une tâche primaire pour le positionnement du segment dans l'image et une tâche secondaire pour générer les mouvements de contournement de l'objet tout en laissant invariant ce segment (figure 2.3).

Cette approche a été testée sur les plans simulés et expérimentaux avec succès sur 2 types d'objets complexes (figure 2.4).

Dans un second temps, nous nous sommes focalisés sur la recherche des axes principaux de l'objet par la mise en œuvre conjointe de techniques de minimisation et d'asservissement visuel. Cette étude est actuellement en cours et nous n'avons pas encore de résultats significatifs.

FIG. 2.4 – *Type d'objets complexes*

Ces travaux de recherche (Berry, 1998) ont donné lieu à la rédaction d'articles acceptés dans un congrès international (Berry et al., 1997) et un workshop international (Berry, Martinet and Gallice, 1998), et à trois présentations orales aux Journées de l'Ecole Doctorale de Clermont-Ferrand en 1996, aux Journées du Pôle SARTA de Clermont-Ferrand en 1995 et aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique en 1997.

2.3 Robotique mobile

En ce qui concerne les applications de l'asservissement visuel 2D pour la robotique mobile, nous avons traité deux cas de robots mobiles : un engin agricole (moissonneuse-batteuse) et un véhicule automobile. Ces travaux ont été menés en parallèle durant les thèses de Christophe Debain (Debain, 1996) en collaboration avec le Cemagref et Djamel Khadraoui (Khadraoui, 1996) suite à une collaboration avec le constructeur automobile français Peugeot SA.

Robots mobiles Automobiles

Le premier projet sur la *route automatisée* date des années 70 aux USA dans l'université de l'Ohio (Fenton, Cosgriff, Olson and Blackwell, 1968; Fenton, Melocik and Olson, 1976). Plusieurs autres auteurs se sont intéressés par la suite au contrôle de véhicule automobile. On retiendra les contributions importantes de C. Thorpe (Thorpe, Hebert, Kanade and Shafer, 1988; Thorpe, 1990) avec le véhicule NAVLAB aux USA et de E.D. Dickmanns (Dickmanns and Zapp, 1985; Dickmanns and Zapp, 1987) en Allemagne avec le véhicule VAMORS.

Ces dernières années, plusieurs grands projets ont vu le jour (Inrets, 1996; PATH, 1997) : les projets SSVS et ARTS au Japon, le projet ITS-AHS aux USA, les projets UDC, SAVE et AC Assist en Europe, Praxitèle en France... De l'analyse de ces différents projets, il ressort la difficulté de mettre

en avant la notion de pilote automatique pour des raisons de société et de responsabilités. Actuellement, on préfère associer la notion de contrôle à celle de sécurité et ainsi définir des fonctions de types sécuritaires qui mettent en jeu des actions sur le véhicule de type freinage, maintien de vitesse, régulation de distance entre véhicules (cas de la navigation en convoi) et des fonctions permettant d'estimer l'état courant du véhicule afin de mettre en œuvre un superviseur orienté comportement.

L'origine de nos travaux sur le guidage d'engins mobiles remonte au début des années 90 où nous étions liés contractuellement avec le fabricant français de voiture Peugeot SA sur le problème du *guidage automatique d'un véhicule automobile*. Deux problèmes avaient été identifiés : la détection et le suivi de la route par vision à partir de la signalisation horizontale, et la commande latérale du véhicule.

Le suivi de route a été traité par Roland Chapuis durant sa thèse (Chapuis, 1991) et amélioré par la suite (Chapuis, Potelle, Brame and Chausse, 1995). La caméra est embarquée dans le véhicule et observe la route depuis le rétroviseur intérieur. A chaque itération (toutes les 40 ms), l'algorithme extrait entre autres la position latérale x , l'orientation ψ du véhicule par rapport à la bande centrale de la chaussée et la courbure C de la route. Il met en œuvre un mécanisme de prédiction vérification afin d'assurer un traitement en temps réel basé sur des zones d'intérêt.

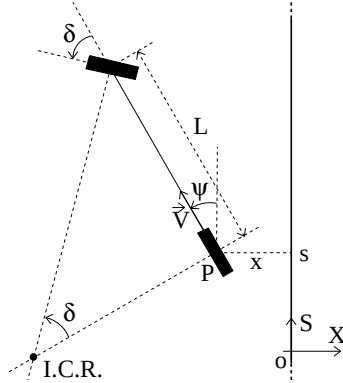
La commande latérale a été traitée par Frédéric Jurie (Jurie, Rives, Gallice and Brame, 1992; Jurie, Rives, Gallice and Brame, 1993; Jurie, 1993; Jurie, Rives, Gallice and J.L.Brame, 1994) en collaboration avec Patrick Rives (Inria Sophia-Antipolis). Dans ce cadre, une modélisation complète du véhicule a été faite. Ayant l'information de localisation du véhicule (x, ψ) , une technique de placement de pôles a permis d'élaborer une loi de commande pour le contrôle de l'angle volant. Des essais en grandeur réelle ont été effectués en 1992 sur circuit à la vitesse de 130 km/h. Ces essais ont démontré la faisabilité du guidage par vision. Néanmoins, des problèmes de robustesse du système de vision/commande relatif aux variations de tangage, hauteur et roulis du capteur caméra ont été mis en évidence. Nous avons alors proposé d'étudier la robustesse de loi de commande de véhicule dans l'espace image.

Les travaux de thèse de Djamel Khadraoui (Khadraoui, 1996) concernent la modélisation et la commande de robots mobiles à roues dans l'espace image. Dans ce cadre nous avons défini deux parties : la modélisation et la commande et l'analyse de la robustesse de la commande en présence de perturbations de type tangage, hauteur et roulis.

La première partie de ces travaux a donc concerné la modélisation cinématique, puis dynamique de l'interaction scène/caméra. Pour cela, deux aspects ont été traités : la modélisation du véhicule et la modélisation de la scène.

Pour le premier aspect, différents travaux existent sur la classification et modélisation des robots mobiles. Parmi eux, on peut citer l'ouvrage rédigé par I.J. Cox et G.T. Wilfong (Cox and Wil-

fong, 1990), les travaux de Brigitte d'Andréa-Novel et G. Campion (Dandrea-Novel, Campion and Bastin, 1992; Campion, Bastin and d'Andrea Novel, 1993), le rapport de recherche de Alonzo Kelly (Kelly, 1994), et les travaux de thèse de Benoit Thuilot (Thuilot, 1995).

FIG. 2.5 – *Modèle bicyclette*

Pour la modélisation du véhicule automobile, nous avons utilisé le modèle bicyclette (voir figure 2.5) représenté par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \frac{V}{L} \cdot \tan \delta \\ \dot{x} = -V \cdot \sin \psi \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \dot{\psi} = \frac{V}{L} \cdot \delta \\ \dot{x} = -V \cdot \psi \end{cases} \quad (2.4)$$

où L représente la distance entre l'essieu arrière et l'essieu avant, V la vitesse longitudinale du véhicule, x et ψ l'écart latéral et l'orientation du véhicule, et δ l'angle des roues.

Pour la modélisation dynamique, nous nous sommes inspirés des travaux sur l'étude de la dynamique du véhicule proposés par Deutsch (Deutsch, 1970), et les travaux de thèse de Ahmed Alloum (Alloum, 1994) sur la sécurité de conduite. D'autres auteurs se sont également investis sur la modélisation et la commande dynamique de véhicules. Parmi eux, on peut citer R. E. Fenton dans (Fenton et al., 1976; Fenton and Mayhan, 1991), E.D. Dickmanns (Dickmanns and Zapp, 1985; Dickmanns and Zapp, 1987), et H. Peng (Peng, Hessburg and Tomizuka, 1992).

Dans nos propres développements de modèles pour la commande, nous n'avons pas tenu compte de manière explicite des contraintes non holonomes liées aux différents robots mobiles que nous avons utilisés. Compte tenu de l'obstruction de Brockett (Brockett, 1983), il n'existe pas de retour d'état continu permettant d'assurer la stabilisation en un point. Cependant, quelques auteurs se sont penchés sur la commande des robots non-holonomes. On peut citer les travaux de Claude Samson sur la commande par retour d'état instationnaire (Samson and Ait-Abderrahim, 1990; Samson and Abderrahim, 1991; Samson, 1991; Pomet and Samson, 1993; Samson, 1993) et sur les systèmes chaînés (Samson, 1995), ceux sur la commande par retour d'état discontinu de Sordalen (Sordalen and

de Wit, 1993) et d'Astolfi (Astolfi, 1995), ceux de Guldner (Guldner and Utkin, 1994), ceux de Tarek Hamel (Tarek, 1996), et ceux de R.M. Murray (Murray and Sastry, 1993). A ma connaissance, seuls les travaux développés à l'INRIA par P. Rives et Dimitri Tsakiris (Tsakiris, Rives and Samson, 1997) sur le contrôle de robots mobiles dans l'espace image prennent en compte ces contraintes non holonomes.

Pour le second aspect, la scène considérée est constituée d'une bande blanche au sol observée par une caméra embarquée dans le véhicule. La projection de cette bande blanche dans l'image est modélisée par une droite 2D que nous avons représentée avec les paramètres $(a, b)^t$ ou $(\rho, \theta)^t$ (coordonnées polaires).

A partir des travaux réalisés par Roland Chapuis (Chapuis, 1991) sur la modélisation de la scène, en utilisant des simplifications aux petits angles et par différenciation du modèle géométrique obtenu, nous avons élaboré un modèle d'interaction liant les variations dans l'espace cartésien et les variations dans l'espace image :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_1 & 0 \\ \xi_2 & \xi_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{pmatrix} \quad avec \quad \begin{cases} \xi_1 = \frac{f_y}{f_x} \cdot h \\ \xi_2 = -\frac{f_y}{f_x} \cdot \alpha \\ \xi_3 = \frac{1}{f_x} \end{cases} \quad (2.5)$$

où f_x, f_y représentent les paramètres intrinsèques de la caméra, h et α la hauteur et l'inclinaison de la caméra respectivement.

De même, à partir des travaux réalisés par François Chaumette (Chaumette, 1990) sur la *Commande Référencée Vision* dans le cas d'une droite pour le paramétrage polaire, nous avons considéré le cas particulier où la référence est centrée dans l'image $\underline{s}^* = (\rho^*, \theta^*)^t = (0, 0)^t$. Dans ce cas, le rang de la matrice d'interaction est de 2, et il suffit de 2 degrés de liberté pour maintenir l'interaction au voisinage du point d'équilibre. Nous avons retenu la translation V_x en x et la rotation Ω_y en y comme degré de commande et considéré le sous-système réduit associé :

$$\underline{\dot{s}} = \begin{pmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = L_{\underline{s}^*}^t \cdot \begin{pmatrix} V_x \\ \Omega_y \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Pour ces deux types de représentation de la droite observée dans l'image, en considérant le modèle cinématique du robot mobile, nous avons établi les modèles d'état correspondant pour des commandes d'angle volant δ (nous considérons que l'angle des roues est identique à l'angle volant) avec un vecteur d'état $\underline{X} = (a, b)^t$ ou $(\rho, \theta)^t$, ou en δ avec un vecteur d'état $\underline{X} = (a, b, \delta)^t$ ou $(\rho, \theta, \delta)^t$. De plus, pour la représentation (a, b) l'utilisation des modèles dynamiques complets ou simplifiés nous a permis d'exprimer des lois de commande dynamiques en δ ou en $\dot{\delta}$.

La synthèse des différentes lois de commande utilise un placement de pôles avec ou sans intégrateurs. Nous avons simulé cette approche sous matlab et validé les principes. N'ayant pas de véhicules automobiles équipés à notre disposition depuis 1992, nous avons décidé d'expérimenter le paramétrage

(a, b) avec la commande cinématique en δ sur notre plate-forme robotique et le paramétrage (ρ, θ) sur une moissonneuse-batteuse en collaboration avec le Cemagref (Khadraoui, Debain, Martinet, Gallice and Berducat, 1995a; Khadraoui, Debain, Rouveure, Martinet, Bonton and Gallice, 1998) (voir le paragraphe concernant la robotique agricole). Nous avons construit une route à l'échelle 1/10 (voir figure 2.6) et programmé le comportement cinématique de notre véhicule sur notre robot cartésien.

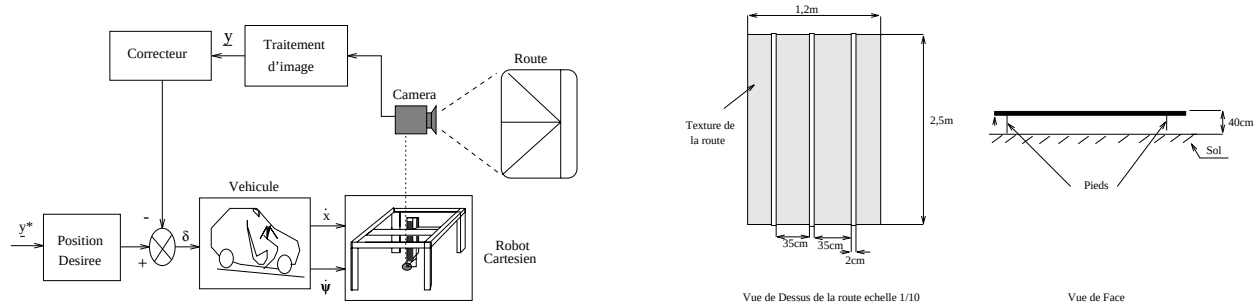


FIG. 2.6 – Site expérimental

Le gros avantage de cette approche est que nous maîtrisons complètement les conditions expérimentales (vision, perturbations, état du "véhicule simulé"), mais le gros inconvénient est que cette *simulation* est peut-être éloignée de la réalité, en particulier pour le rendu des couplages entre les variables $\dot{x}$, V et ψ .

Lorsqu'aucune perturbation n'est présente, le système réagit normalement que l'on choisisse une consigne en a ou en b . En présence de perturbations sur l'inclinaison de la caméra, nous avons montré qu'il existait une erreur statique dans les deux cas. L'ajout d'un intégrateur dans la loi de commande permet de supprimer cette erreur. Cependant, des oscillations et des cas d'instabilités apparaissent lorsque l'angle α est éloigné de sa valeur de référence (fixée à -7 degrés). En dehors du couplage cinématique introduit par notre robot cartésien (simulation du comportement du véhicule), notre système de vision/commande introduit un retard pur de 3 périodes d'échantillonnage T_e ($T_e = 40$ ms).

Les problèmes persistant en imposant une référence sur a ou sur b , nous avons préféré changer d'approche et investir notre temps dans la mise en application de technique de commande robuste. De plus, bien que les modèles cinématiques soient simples, nous cherchions une technique capable de s'appliquer aux cas plus complexes et en particulier pour la commande dynamique.

La seconde partie de nos travaux concerne l'étude de la robustesse de lois de commande vis-à-vis des variations paramétriques du modèle paramétrique utilisé pour la synthèse. N'étant pas spécialistes de telles techniques, nous avons mené une recherche bibliographique sur la commande H_∞ . Développée au début des années 1980 (Doyle and Stein, 1981; Zames and Francis, 1983; Kimura, 1984; Dorato and Li, 1986; Doyle, Glover, Khargonekar and Francis, 1989), elle concerne la synthèse de correcteurs sur des procédés incertains modélisés par une perturbation additive non structurée dans l'espace fréquentiel. Au lieu de considérer la fonction de transfert nominale $F_0(p)$ du procédé,

on considère la fonction de transfert perturbée $F(p) = F_0(p) + \Delta F_0(p)$. Deux problèmes se posent alors : calculer le correcteur et garantir la stabilité en présence de perturbations.

Kimura en 1984 (Kimura, 1984), a énoncé une condition suffisante de stabilité robuste :

$$\|q(p)r(p)\|_\infty < 1 \quad (2.7)$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} |\Delta F_0(j\omega)| \leq |r(j\omega)| \\ \frac{|r(j\omega)|}{F_0(j\omega)} \leq 1 \end{array} \right. \quad \forall \omega \quad \text{et} \quad q(p) = \frac{c(p)}{1 + F_0(p).c(p)} \quad (2.8)$$

où la fonction $r(p)$ borne les variations de la fonction $F_0(p)$ sur tout l'espace fréquentiel, et $c(p)$ représente le correcteur robuste recherché tel que :

$$c(p) = \frac{q(p)}{1 - F_0(p)q(p)} \quad (2.9)$$

La méthode générale de synthèse de correcteurs robustes est décrite dans (Dorato, Fortuna and Muscato, 1992) et a fait l'objet d'un développement dans la thèse de Djamel Khadraoui. Elle consiste à définir une *Fonction Réelle Strictement Bornée* qui vérifie des conditions d'interpolations particulières (problème d'interpolation de Nevanlinna-Pick). Dorato *et al* dans (Dorato and Li, 1986) proposent un algorithme itératif pour résoudre ce problème basé sur la théorie de Youla-Saito (Youla and Saito, 1967).

Quelques applications de cette approche ont été faites en robotique mobile : par exemple, dans (Byrne and Chaouki, 1994; Byrne, Chaouki and Dorato, 1997) H.R. Byrne étudie la robustesse d'un contrôle latéral vis-à-vis des variations des caractéristiques dynamiques du véhicule (masse, inertie, raideur des pneus, vitesse longitudinale).

Dans notre cas d'étude, nous avons considéré les deux fonctions de transfert suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(p) = \frac{b}{\delta} = \frac{V^2 \xi_2 + p \xi_1 V}{\xi_1 p^2 L \xi_3} \\ F_2(p) = \frac{a}{\delta} = \frac{V^2}{\xi_1 L p^2} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

liant la commande de l'angle volant δ à l'évolution du paramètre a ou b dans l'image. Pour ces deux fonctions de transfert, nous avons mis en œuvre la synthèse de correcteur robuste décrite dans (Dorato et al., 1992). Son application au cas particulier de fonctions de transfert avec intégrateurs est abordée dans (Kimura, 1984) et appliquée dans (Byrne and Chaouki, 1994; Martinet, Thibaud, Khadraoui and Gallice, 1998b; Martinet, Thibaud, Thuilot and Gallice, 1998c).

Nous avons calculé plusieurs correcteurs robustes permettant de prendre en compte des variations paramétriques à la fois sur le paramètre α et sur le paramètre h ($\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = 25\%$ et $\frac{\Delta h}{h} = 25\%$). Nous avons mis en évidence que le choix du paramètre a était le meilleur. Dernièrement dans (Martinet et al., 1998c), nous avons redéfini le modèle cinématique et la synthèse du correcteur en normalisant par rapport à la vitesse longitudinale. Cette technique présente l'avantage de découpler la commande

latérale de la commande longitudinale et assure le respect de trajectoire du véhicule quelle que soit la vitesse de celui-ci. La figure 2.7 nous montre deux résultats concernant une comparaison entre un placement de pôles avec intégrateurs et une commande robuste utilisant le paramètre a .

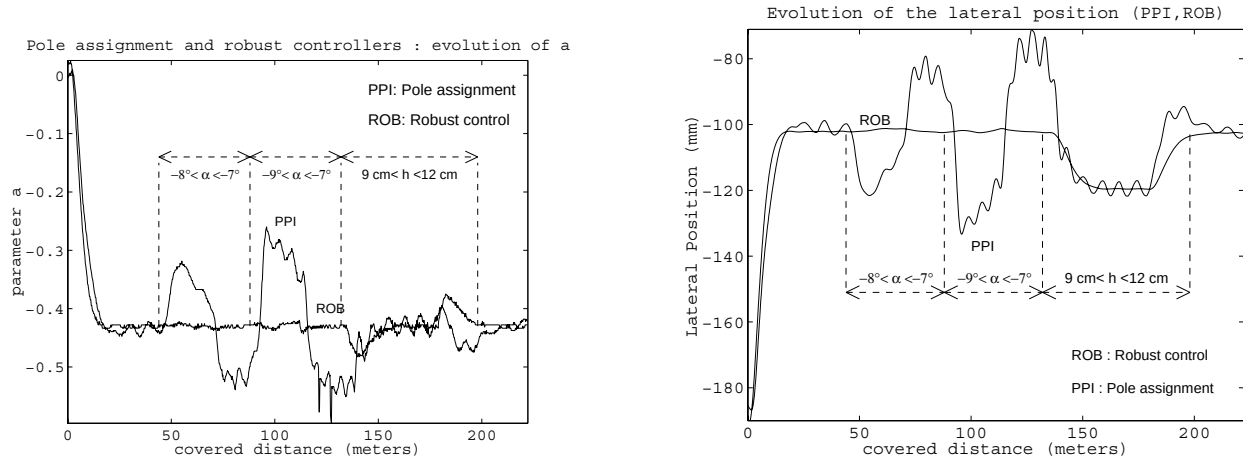


FIG. 2.7 – Evolution du paramètre a et de l'écart latéral x

Comme nous pouvons le constater, la commande robuste reste insensible aux variations de tangage et compense les variations de hauteur. Malheureusement, si l'on observe l'évolution de l'écart latéral, la compensation dans l'image due à un Δh se traduit par une variation non négligeable sur l'écart latéral.

Nous avons également testé l'influence du roulis, mais compte tenu que le modèle d'interaction n'en tient pas compte à l'heure actuelle, les variations de roulis influent sur le comportement dans l'image.

Depuis 1995, la littérature sur la commande robuste est devenue plus abondante : sur la commande CRONE (Oustaloup, 1996), sur la commande H_∞ (Basar and Bernhard, 1995; Grizzle and Kucera, 1996; Kimura, 1997), sur le placement de pôle robuste de (Bernussou, 1996) et plus généralement (Borne, 1996).

Ces travaux de recherche ont donné lieu à la rédaction d'une revue en cours de soumission (Martinet and Thibaud, 2000), quatre congrès (Khadraoui, Martinet and Gallice, 1995b; Martinet, Khadraoui, Thibaud and Gallice, 1997b; Martinet et al., 1998b; Martinet et al., 1998c), et à trois présentations orales dans le cadre du Pôle SARTA (Journée de Compiègne et de Clermont-Ferrand), et d'Orasis (Journée de Clermont-Ferrand).

Robots mobiles Agricoles

L'utilisation de la vision en robotique agricole peut se décomposer autour d'un certain nombre d'applications qui suivent en fait le cycle annuel de culture. Par exemple pour la culture des céréales,

on peut décomposer le cycle par l'enchaînement de travaux de culture, de semence, de fertilisation, de désherbage, de récolte ou d'ensilage et de fourrage.

Dans la communauté, un certain nombre d'applications agricoles utilisant la vision ont été abordées : la récolte de céréales (Ollis and Stentz, 1996; Ollis and Stentz, 1997), la culture des tomates (Sandini, Buemi, Massa and Zucchini, 1990), la collecte des fruits (Nobutaka, 1990; Amat, Battle, Fuertes and Martinez, 1993; Casals, Amat and Grau, 1992; Sevilla, Clavel, Zapata and Dubreuil, 1994), la germination des pommes de terre (Lefebvre, Gil, Baur, Dessimoz and Pun, 1993).

Il faut noter que d'autres travaux utilisent d'autres capteurs comme le télémètre laser (Nishizawa, Ohya, Yuta and Takigawa, 1996), ou le GPS (Global Positioning System) (Elkaim, O'Connor, Bell and Parkinson, 1997).

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux travaux de récoltes de céréales. Une des principales caractéristiques de ces travaux est l'aspect partiellement structuré de l'environnement par le fait que le premier passage d'un engin agricole structure l'environnement, et les passages suivants consistent au guidage par rapport à la trace laissée par le passage précédent. Côté perception, le problème de guidage se résume à la détection par exemple d'un sillon dans le sol pour les travaux de culture, d'une rangée de plantation pour les travaux de désherbage, d'une limite de coupe pour la récolte ou d'un andain pour la fenaison.

Nos travaux concernant la robotique agricole ont été effectués en collaboration avec le Cemagref dans le cadre des thèses de Christophe Debain (Debain, 1996) et de Djamel Khadraoui (Khadraoui, 1996). Le Cemagref s'est intéressé très tôt au guidage d'engins agricoles (tracteur, moissonneuse-batteuse, plate-forme multi-fonctions) et entretiens d'espace verts (tondeuse à gazon). Deux aspects ont été abordés : la perception et la commande.

Pour l'aspect perception, comme nous l'avons dit précédemment, l'idée principale est d'extraire par vision une limite de fauche lorsqu'il s'agit d'un travail de récoltes. Des travaux en ce sens ont débuté au début des années 1990 et se poursuivent à l'heure actuelle (Derras, Berducat and Bonton, 1991; Derras, 1993; Derras, Berducat, Bonton, Gallice and Canals, 1993; Derras, Berducat, Bonton, Gallice and Naudet, 1994a; Derras, Verrat, Berducat and Bonton, 1995).

La première approche a consisté en la mise en œuvre d'un algorithme de segmentation non supervisée basée sur une segmentation markovienne mettant en jeu 4 paramètres (Derras, 1993) (2 paramètres de texture, 2 paramètres niveaux de gris). La seconde est une approche supervisée basée sur la mise en œuvre de techniques de corrélation et de fusion de données (Chateau, Berducat and Bonton, 1997). Le but de cette partie perception est d'extraire un paramétrage de la limite de fauche afin d'assurer le contrôle de l'engin.

Pour l'aspect commande, nous nous sommes intéressés au contrôle latéral d'une moissonneuse-batteuse (figure 2.8) par vision. Une des contraintes que nous nous sommes fixés, est que le contrôle de l'engin soit fait dans l'espace image.

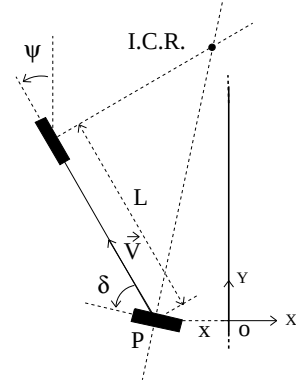


FIG. 2.8 – La moissonneuse-batteuse et son modèle

L'engin possède deux roues directrices à l'arrière et deux roues motrices à l'avant. Sa modélisation cinématique est faite par un modèle de type bicyclette (figure 2.8), comme dans le cas d'un véhicule automobile.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au guidage de la moissonneuse-batteuse par vision sur terrain plat. Dans ce but, nous avons testé 3 lois de commande différentes.

La première approche développée dans le cadre de la thèse de Djamel Khadraoui (Khadraoui, 1996) est basée sur une modélisation de l'interaction engin scène incluant à la fois les modèles cinématiques de l'engin et de l'interaction scène/caméra (voir paragraphe sur la robotique mobile automobile). Dans ce cas, le correcteur est calculé par un placement de pôles à partir de l'expression du modèle d'état du système :

$$\dot{\underline{X}} = A \underline{X} + B \delta \quad (2.11)$$

où $\underline{X} = (\rho, \theta)^t$ représente le vecteur d'état (mesure de la limite de fauche dans l'image), l'angle des roues δ la variable de commande, A et B des matrices constantes. La commande du système est de type retour d'état $\delta = -[g_1 \ g_2]^t \underline{X}$, où les gains g_1 et g_2 sont obtenus par identification du système avec un système de second ordre de caractéristiques (ξ, ω_0) .

La seconde approche développée par Christophe Debain (Debain, 1996) est basée sur l'approche fonction de tâche (Samson, 1991). Elle consiste à définir une fonction de tâche globale $\underline{e}$ considérée comme la somme de deux fonctions tâche $\underline{e}_\rho$ et $\underline{e}_\theta$ permettant de réguler à zéro dans l'image respectivement les paramètres ρ et θ . Pour la loi de commande, on choisit d'introduire une décroissance exponentielle différente pour les deux fonctions de tâches, ce qui nous amène à :

$$\mathcal{T}_c = -\lambda(\beta \underline{e}_\theta + \underline{e}_\rho) \quad (2.12)$$

où λ et β sont des constantes réelles positives. En reprenant le formalisme de la *Commande Référencée Vision*, on obtient :

$$\mathcal{T}_c = -\lambda L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^{T+} B(\underline{s} - \underline{s}^*) \quad (2.13)$$

où $\mathcal{T}_c$ est le torseur cinématique à appliquer à la caméra, $L_{\underline{s}=\underline{s}^*}^{T+}$ représente la pseudo-inverse de la matrice d'interaction calculée à l'équilibre ($\underline{s}^* = (0 \ 0)^t$), $\underline{s} = (\rho, \theta)^t$ représente le signal capteur, et la matrice $B = \begin{pmatrix} \beta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ permet de régler le type de conduite souhaitée ("brusque" ou "coulée"). La commande du véhicule δ est déduite de cette expression ($\delta = -\frac{L}{V} \cdot \Omega_y$), considérant qu'il évolue à vitesse longitudinale constante V .

Enfin, la troisième approche a été développée au Cemagref par Raphael Rouveure (Chargé de Recherche au Cemagref en cours de préparation de thèse) et est basée sur la mise en œuvre d'un réseau de neurones. Le réseau étudié comporte deux couches dont une couche cachée. La figure 2.9 montre le modèle du réseau mis en œuvre. L'apprentissage s'est déroulé en deux étapes. La première

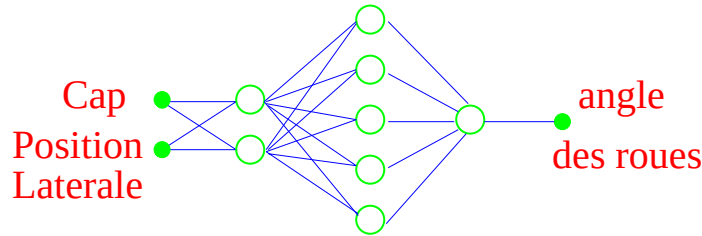


FIG. 2.9 – *Modèle du réseau de neurone retenu*

étape a consisté à faire les mesures des trois valeurs des variables (ρ, θ, δ) aller et retour sur une piste d'essais comportant une courbe, puis une ligne droite. La conduite était assurée par un conducteur expérimenté. La seconde étape a consisté au calcul des différents poids du réseau après l'essai, afin d'éliminer les problèmes liés aux minimas locaux par une technique de rétropropagation.

La mise en œuvre de ces trois lois de commande a été effectuée sur une piste composée d'une courbe, d'un échelon puis d'une ligne droite. Nous avons remarqué que la première loi peut être adaptée en fonction de la vitesse longitudinale, et ne nécessite pas une recherche empirique de gain (cas de la seconde loi). Même si ces deux lois sont robustes au regard des variations de vitesse, on peut noter que nous n'avons pas tenu compte du problème de la non holonomie et qu'elles ont une tendance à couper le virage. Pour la troisième loi, nous avons pu remarquer un très bon comportement tout au long de la piste d'essais mais une très mauvaise robustesse au regard des variations de vitesse (divergence). Les détails sur ces travaux ont fait l'objet d'une publication (Khadraoui et al., 1998).

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au guidage de la moissonneuse-batteuse par vision sur terrain en pente.

L'effet de la pente se traduit par un glissement du véhicule vers le bas de la pente. Ce glissement dépend de la pente, mais aussi des conditions d'adhérence, des paramètres du véhicule, et des réactions du système de contrôle. Nous ne maîtrisons pas les paramètres de nos véhicules qui sont

variables dans le temps et qui seraient coûteux à mesurer en temps réel. De même, les conditions de glissement sont très aléatoires du fait de l'irrégularité du terrain et de la variation des paramètres précédents. La difficulté est donc de corriger l'effet de la pente en utilisant uniquement les informations issues de la caméra.

Lorsqu'un véhicule agricole évolue sur un terrain en pente, on note deux perturbations principales. La première concerne la position et l'orientation du véhicule qui sont modifiées du fait du glissement des roues sur le sol. La seconde qui est liée à la première représentent les nouvelles conditions d'équilibre de la machine ainsi que leur traduction dans l'espace des capteurs de perception.

Nous avons simulé une pente de 20% en utilisant la première loi de commande développée pour terrain plat (deux fonctions de tâches), et observé le comportement du véhicule en particulier son orientation, la position de l'extrémité gauche de la barre de coupe de la moissonneuse (point D), ainsi que l'orientation des roues. La figure 2.10 suivante illustre les résultats.

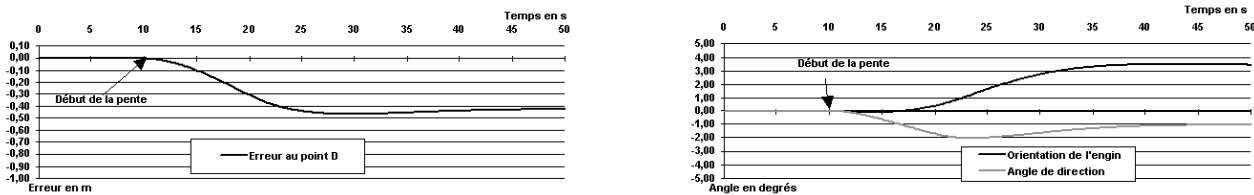


FIG. 2.10 – *Effet de la pente sur la position et orientation du véhicule*

Une analyse qualitative faite dans (Debain, 1996) a montré que l'effet de la pente se traduit par une accélération latérale qui provoque un glissement du véhicule. L'accélération transversale peut être compensée par un angle de braquage des roues directrices équivalant à une orientation du véhicule par rapport à la trajectoire suivie.

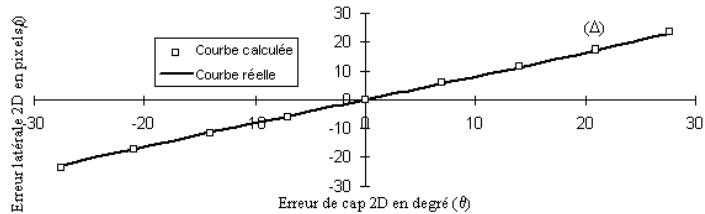
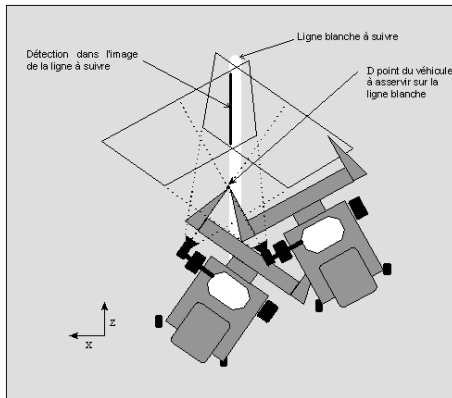


FIG. 2.11 – *Effet de la pente sur la modélisation de la scène*

La figure 2.11 montre l'effet de la pente sur la position d'équilibre et sur la perception de cette

position. Il est relativement simple de calculer les nouvelles valeurs des paramètres image ρ et θ en fonction des différentes orientations de la machine. Sur la partie droite de la figure 2.11, nous avons représenté l'ensemble des couples (ρ, θ) calculés pour un angle du véhicule de -15 à $+15$ degrés par rapport à la ligne à suivre, ainsi que ceux obtenus par expérimentation. Comme nous pouvons le constater, les deux courbes sont pratiquement superposées et peuvent être approximées par une droite (Δ). Cette droite représente l'ensemble des points de fonctionnement, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs (ρ, θ) qui permettent l'équilibre de la position du véhicule pour différentes valeurs de pente. On retrouve le point $(0,0)$ qui correspond à l'asservissement du véhicule sur une ligne droite avec un sol plan et des conditions d'adhérence optimales.

Les résultats présentés dans la figure 2.10 montrent que la trajectoire de la machine se stabilise parallèlement à l'interface. Cette erreur statique est généralement résolue par l'ajout d'un intégrateur au système. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il est nécessaire de compenser la pente. A cette fin, nous avons rajouté un module adaptatif en intégrant la droite (Δ), qui donne l'ensemble des points de fonctionnement et qui définit l'action de la pente sur la trajectoire de la machine. Nous avons proposé le schéma d'asservissement visuel représenté par la figure (2.12).

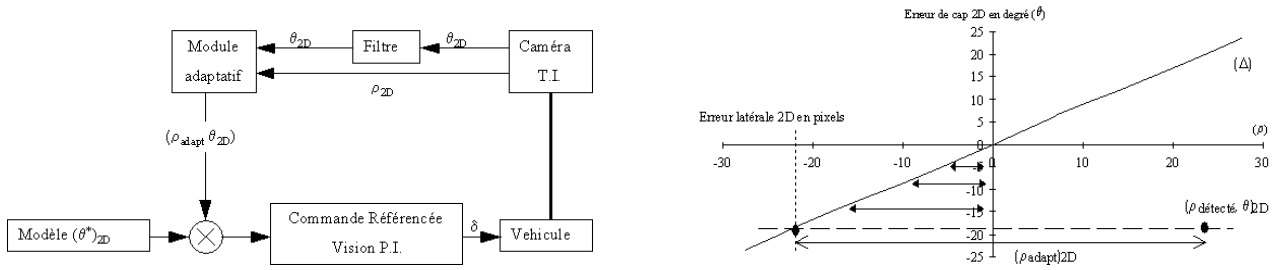


FIG. 2.12 – Nouveau schéma d'asservissement visuel - Principe de l'adaptation

La correction de la trajectoire de la machine en pente ne se fait que par l'intermédiaire du paramètre ρ , et la nouvelle loi de commande peut s'exprimer par (pour $(\rho^*, \theta^*) = (0, 0)$):

$$\delta = -\frac{\lambda L}{V} \left[\beta \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{1 + h^2} \theta + \frac{h^2 + \cos^2 \alpha}{1 + h^2} (\rho_{adapt} + k_2 \cdot \int_0^t \rho_{adapt} du) \right] \quad (2.14)$$

Nous avons simulé et expérimenté cette nouvelle loi de commande. Les résultats sont présentés par la figure 2.13.

La courbe simulée précédente montre que l'effet de la pente est corrigé en 10 s et que l'erreur qu'elle provoque n'excède pas 5 cm. L'expérimentation réelle sur un terrain ayant une pente de 20% est illustrée par la photo.

Ces travaux de recherche ont donné lieu à la rédaction d'une revue (Khadraoui et al., 1998), une revue en cours de soumission (Debain, Chateau, Berducat, Martinet and Bonton, 2000), quatre congrès (Debain, Khadraoui, Derras, Martinet and Bonton, 1995; Debain et al., 1995; Khadraoui et

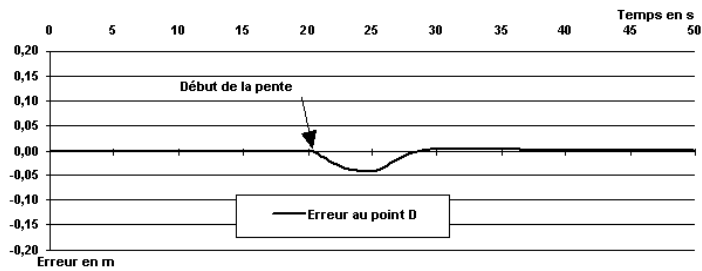


FIG. 2.13 – Résultats simulés et expérimentaux en présence de pente

al., 1995a; Martinet, Bonton, Gallice, Berducat, Debain and Rouveure, 1998a) et à deux présentations orales dans le cadre du Pôle SARTA (Journées de Clermont-Ferrand en 1995) et dans le cadre du Club EEA (Journées Automatique, Agriculture et Agro-alimentaire de Clermont-Ferrand en 1997).

Chapitre 3

Asservissement visuel 3D

3.1 Introduction

Parmi les principales caractéristiques des robots, on distingue les actionneurs permettant aux robots de se mouvoir, les capteurs proprioceptifs et extéroceptifs assurant la perception de l'état du système robotique, et l'environnement dans lequel le robot exécute ses propres tâches. Par conséquent, il existe trois types d'espaces pour définir une tâche robotique : l'espace articulaire qui caractérise les actionneurs du robot, l'espace capteur qui assure la perception de l'état du système robotique (robot + environnement), et l'espace opérationnel (espace cartésien) d'évolution du robot manipulateur ou robot mobile.

Historiquement, les premières tâches robotiques ont été définies dans l'espace articulaire à partir de la connaissance des modèles géométriques et cinématiques (directs et inverses) du robot. Des méthodes de génération de trajectoires, d'optimisation en vitesse et accélération, et de synchronisation ont été développées (Dombre and Khalil, 1988). Parmi les problèmes rencontrés, on peut citer la difficulté d'obtenir des modèles précis, la difficulté d'assurer un calibrage précis de l'outil porté par le robot, et la difficulté d'assurer la stabilité dans le temps de certaines caractéristiques dues à des phénomènes d'usure, d'échauffements ou de chocs.

Le développement des capteurs extéroceptifs (ultra-sons, laser, radar, caméra, CDGPS, ...) ainsi que leur maîtrise, a permis la mise en œuvre de deux types d'approches, comme nous l'avons dit dans la partie 1.

La première, appelée *Commande par calcul de Pose* ou plus couramment *Position Based Control*, consiste à définir les tâches robotiques dans l'espace opérationnel du robot considéré (espace cartésien) et à étudier le contrôle de ces robots dans ce même espace. Cette approche fera l'objet d'un développement plus approfondi dans un prochain paragraphe.

La seconde, couramment appelée *Commande Référencée Capteur* ou *Sensor Based Control*, née dans les années 80, consiste à définir les tâches robotiques dans l'espace du capteur et à étudier le

contrôle de ces robots dans ce même espace. C'est cette approche qui est à l'origine de la *Commande Référencée Vision* que nous avons présentée brièvement dans la première partie de ce chapitre. Elle est également à l'origine de certains travaux de recherche que nous présenterons plus loin.

Du point de vue de la tâche robotique à réaliser, il est naturel de choisir comme espace de description de la tâche, l'espace opérationnel du robot considéré, mais plusieurs problèmes sont à considérer. En effet, l'approche *Position Based Control* nécessite la modélisation complète de la scène considérée, pour permettre la mesure de la pose relative du robot par rapport à la scène, ou de la scène par rapport au robot dans le cas où le capteur est embarqué sur l'effecteur du robot. Ainsi, la localisation du robot par rapport à son environnement nécessite non seulement de connaître les modèles géométriques du robot, mais également le(s) modèle(s) associé(s) à la représentation de la scène. De plus, si le capteur est une caméra il est nécessaire de connaître les paramètres intrinsèques et extrinsèques associés, ce qui nécessite non seulement une étape de calibrage de la caméra, mais également une étape de calibrage bras-œil (si la caméra est embarquée sur l'effecteur du robot) ou scène-œil et scène-robot (si la caméra est fixe par rapport au robot). Enfin, dans l'hypothèse où les modèles et le calibrage sont maîtrisés, il est nécessaire de mettre en œuvre des algorithmes qui permettront l'estimation de la pose relative entre le robot et la scène avec laquelle il doit interagir.

Du point de vue du calibrage de caméra, depuis les travaux de Roger Y. Tsai (Tsai, 1987) et de Faugeras/G. Toscani (Faugeras and Toscani, 1987), des efforts importants ont été réalisés depuis ces dix dernières années. Il est désormais possible d'atteindre des précisions inférieures à 5 %, et d'envisager l'étalonnage à partir de mires, d'objets marqués d'amers ou plus récemment de textures dans l'image. Dans ce but, des outils commencent à voir le jour: on peut citer le logiciel *TotalCalib* développé au sein de l'INRIA.

Au niveau du calibrage bras-œil, les travaux de Sandrine Rémy (Remy, 1998) utilisant la vision monoculaire et ceux de Fadi Dornaika (Dornaika, 1995; Horaud and Dornaika, 1995; Dornaika and Horaud, 1998) ont permis de montrer qu'il était désormais possible d'estimer correctement les paramètres extrinsèques d'une caméra embarquée sur l'effecteur d'un robot. Cependant, selon les méthodes utilisées il faut noter la *connaissance a priori* qui est strictement nécessaire et les conditions d'extraction des primitives visuelles (précisions des détections).

L'estimation de la pose d'objet par vision monoculaire a retenu l'attention de plusieurs chercheurs. En effet depuis les années 80, différentes méthodes de reconstruction ont vu le jour basées sur l'utilisation de primitives visuelles géométriques (point, droite, segment, contour elliptique, limbes, ...) *Shape from Shading or from Contours* ou dynamiques (flot optique) *Shape from Motion*. Plus récemment, c'est l'utilisation de primitives de type texture *Shape from Texture* qui retient l'attention de certains chercheurs. Parmi les travaux effectués sur la reconstruction par vision monoculaire, on peut distinguer deux catégories: la première s'appuie sur l'utilisation de méthodes itératives de minimisation ou d'optimisation de fonction de coût, et la seconde catégorie s'attache à établir des solutions analytiques au problème posé.

En ce qui concerne les travaux de reconstruction à partir de primitives de type points, on peut retenir les contributions de D.G. Lowe (Lowe, 1991), R. M. Haralick (Haralick and Joo, 1988; Haralick, Joo, Lee, Zhuang, Vaidya and Kim, 1989) et plus récemment H. Araujo (Araujo, Carceroni and Brown, 1998) et Chien-Ping Lu (Lu, Hager and Mjolsness, 1998), qui ont mis en œuvre des techniques numériques itératives pour estimer la pose de l'objet considéré dans leur application. Certains auteurs se sont penchés sur la recherche de solutions analytiques au problème de reconstruction à partir de 4 points (Horaud, Conio, Leboulloux and Lacolle, 1989), puis de 3 points (Haralick, Lee, Ottenberg and Nolle, 1991; DeMenthon and Davis, 1992; DeMenthon, 1993). Pour finir sur ce sujet, il ne faut pas oublier la forte contribution de Daniel DeMenthon sur la mise en œuvre de techniques itératives permettant l'estimation rapide de la pose d'un objet à partir de 4 points ou plus non coplanaires (DeMenthon and Davis, 1995), puis à partir de 4 points coplanaires (Oberkampf, DeMenthon and Davis, 1996). Une version améliorée de cette approche a été proposée par Radu Horaud dans (Horaud, Dornaika, Lamiroy and Christy, 1997).

En ce qui concerne les travaux de reconstruction à partir de primitives de type segments, on peut retenir les contributions de Shakunaga (Shakunaga and Kaneko, 1986), de M. Dhome (Dhome, Richetin, Lapresté and Rives, 1989), de H. Chen (Chen, 1991) et M. Ferri (Ferri, Mangili and Viano, 1993) apportant des solutions analytiques au problème de reconstruction. D'autres auteurs ont préféré des méthodes itératives numériques : Thai Quynh Phong (Phong, Horaud, Yassine and Pham, 1995), Rakesh Kumar (Kumar and Hanson, 1994) et Beveridge (Beveridge and Riseman, 1995). Récemment, Radu Horaud a proposé une adaptation de la méthode de DeMenthon modifiée (Horaud et al., 1997) appliquée au cas des segments (Christy and Horaud, 1998).

Pour finir, certains auteurs ont étudié la reconstruction à partir d'invariants. Dans ce cadre, on peut citer les travaux de Forsyth et Mundy (Forsyth, Mundy, Zisserman, Coelho, Heller and Rothwell, 1991; Rothwell, Zisserman, Marinos, Forsyth and Mundy, 1992) qui utilisent des invariants pour la reconnaissance d'objet et proposent une estimation de la Pose entre l'objet et la caméra.

De l'ensemble de ces méthodes qui ont été développées, bien souvent il ressort que la solution à l'estimation de la pose n'est pas unique, qu'il est nécessaire d'avoir une détection de primitives visuelles élémentaires précise et qu'il est nécessaire de maîtriser toute la chaîne de reconstruction. Le problème sur l'unicité est fréquemment éludé par la mise en œuvre d'un filtrage des solutions possibles en ne retenant que la solution permettant un appariement optimal. Des recherches sont en cours à l'heure actuelle pour prouver l'unicité des solutions issues d'un processus de calcul itératif.

Au vue des différents résultats obtenus sur tous les éléments constitutifs de la chaîne de reconstruction, deux schémas d'asservissement visuel 3D peuvent être élaborés :

- *boucle ouverte ou génération de trajectoires*: le problème d'asservissement est vu comme un problème de poursuite de trajectoire qui nécessite le calcul d'une trajectoire à suivre. Dans le cas parfait où tout est connu, le rafraîchissement de la trajectoire n'est nécessaire que si l'on considère que la scène peut évoluer. Les récents progrès en planification de trajectoires notamment prenant en compte les contraintes non holonomes de certains type de robots, la

présence ou non d'obstacles et la prise en compte des singularités et des limitations de l'espace des configurations associées au robot, permettent d'envisager une telle approche.

- *boucle fermée* : le calcul de la Pose relative entre la scène/l'objet et le robot s'effectue à chaque itération. Dans ce cas, les imperfections de modélisation sont compensées par la boucle fermée et seules les valeurs de la référence à atteindre peuvent poser un problème. Un moyen simple de contourner ce problème est d'effectuer un apprentissage de ces valeurs avec le système réel de mesure associé à l'algorithmie d'estimation de la Pose. Ainsi, même si la valeur de référence ne correspond pas à la valeur réelle et physique, l'asservissement en boucle fermée assure la bonne complétion de la tâche de positionnement.

Pour le cas des robots manipulateurs, seulement quelques auteurs se sont préoccupés de développer des lois de commande basées sur la mise en œuvre d'une boucle fermée sur l'estimation de la Pose à chaque itération. Les autres travaux mettent en œuvre des outils de génération de trajectoires.

On peut tout d'abord citer les travaux A.J. Koivo (Koivo and Houshangi, 1991) sur la prédiction de la position et de l'orientation d'un objet mobile à partir d'un modèle auto-regressif. La poursuite est assurée par un générateur de trajectoires où la position et l'orientation de l'effecteur sont estimées à partir des capteurs proprioceptifs.

P.K. Allen dans (Allen et al., 1993) estime la position d'un objet mobile à partir de la mesure du flot optique avec deux caméras et met en œuvre un filtre α, β, γ pour prédire la position à atteindre. Il traduit ensuite cette position 3D en consigne articulaire.

W. J. Wilson (Wang and Wilson, 1992; Wilson, 1993a; Wilson, 1993b; Wilson, Williams Hulls and Bell, 1996) utilise un filtre de Kalman pour estimer la Pose relative entre la caméra et l'objet. Un correcteur proportionnel dérivé est appliqué dans l'espace articulaire.

G. Sandini et E. Grosso (Grosso, Meta, Andrea and Sandini, 1996) estiment l'état de l'effecteur du robot à partir de la mesure du flot optique avec deux caméras fixes et synthétisent une loi de commande pour réaliser des manipulations de type positionnement 3D.

Au LASMEA, Nadine Daucher et M. Dhome dans (Daucher, Dhome, Lapreste and Rives, 1996; Martinet, Daucher, Gallice and Dhome, 1997a; Daucher, Dhome, Lapreste and Rives, 1997) proposent une approche de type *pseudo-boucle ouverte*. En effet, la Pose relative entre la caméra embarquée sur l'effecteur du robot et la scène (objet avec 4 leds) est estimée à chaque itération. Une trajectoire de type *vissage*, liant la position courante à la position finale souhaitée, est régénérée à chaque itération à partir des nouvelles mesures de Pose. La commande calculée à chaque itération correspond à l'exécution d'une portion de la trajectoire de type vissage.

Pour ma part, en collaboration avec Jean Gallice, dans (Martinet, Gallice and Khadraoui, 1996b; Martinet et al., 1997a) j'ai mis en œuvre la *Commande Référencée Capteur* à partir d'un capteur de vision 3D constitué d'une caméra et d'algorithme d'estimation de paramètres 3D comme des points 3D ou la Pose 3D. Plus récemment, dans (Martinet and Gallice, 2000) nous proposons la mise en œuvre de retour d'état linéaire et non linéaire comme lois de commande. Ces différentes approches feront l'objet du développement des parties qui suivent.

Pour le cas des robots mobiles, quelques chercheurs se sont focalisés sur le guidage automatique de véhicule sur route à partir de la localisation du véhicule par rapport à la chaussée.

Dans les années 80, E. D. Dickmanns démarre le projet VAMORS (Dickmanns and Zapp, 1985; Dickmanns and Zapp, 1986; Dickmanns and Zapp, 1987) pour le guidage automatique de véhicule. Il estime la localisation du véhicule par rapport à la chaussée par vision monoculaire et met en œuvre un filtre kalman pour estimer la courbure de la route. Le contrôle latéral et longitudinal est réalisé.

En parallèle, aux Etats-Unis Allen M. Waxman développe le projet ALV pour le suivi de route ou de bande par stéréovision et vision couleur (Waxman, LeMoigne, Davis, Srinivasan, Kushner, Liang and Siddalingaiah, 1987), et C. Thorpe développe le projet NAVLAB (Thorpe et al., 1988; Thorpe, 1990) utilisant 2 caméras pour le contrôle latéral du véhicule. Dans le cadre du programme PATH, Dieter Koller propose (Koller, Luong and Malik, 1994) la localisation complète du véhicule par rapport à la chaussée à partir de vision binoculaire. Le contrôle latéral (Kosecka, Blasi, Taylor and Malik, 1997) et longitudinal (McLauchlan and Malik, 1997) est effectué. N. Kehtarnavaz travaille sur le projet BART (Kehtarnavaz, Grisworld and Lee, 1991) sur le suivi de véhicule par vision binoculaire. A partir de la localisation du véhicule à suivre, il génère une trajectoire composée de deux cercles reliant ces deux positions.

R. Chapuis dans (Chapuis, 1991; Chapuis et al., 1995) développe un algorithme de détection et suivi de la signalisation horizontale (bande blanche). Cet algorithme est basé sur la mise en œuvre d'un filtre de kalman estimant entre autres la localisation (position latérale et orientation du véhicule) du véhicule et la courbure de la route. Un contrôle latéral du véhicule (Jurie et al., 1994) a été validé sur autoroute à la vitesse constante de 130km/h.

La principale motivation de nos travaux sur l'asservissement visuel 3D est la recherche d'une meilleure compréhension de la boucle de retour visuel. Comme nous l'avons dit précédemment, l'espace naturel de commande est l'espace opérationnel. Si l'on souhaite comprendre le comportement d'une boucle de commande exprimée dans l'espace image, il est nécessaire de bien cerner ce qui se passe dans l'espace cartésien. D'autre part, l'étude de loi de commande dans l'espace cartésien, peut être une source d'idées et de réflexions que l'on peut adapter au cas particulier de l'asservissement visuel 2D. Compte tenu que l'algorithmie de reconstruction et de localisation a fait des progrès importants ces dernières années et que la puissance disponible pour les traitements ne cesse d'augmenter, il n'est plus justifiable d'écarter une technique d'asservissement visuel 3D pour le temps de calcul. Dans nos applications, comme d'autres auteurs, nous avons démontré la faisabilité d'une telle approche.

Dans les parties qui suivent, nous présenterons nos travaux sur l'asservissement visuel 3D pour les applications en robotique mobile puis en robotique manipulatrice. Pour la robotique mobile, il s'agit de la mise en œuvre d'une technique de génération de trajectoire pour le pilotage d'une tondeuse à gazon, et de l'étude d'un système de guidage d'engins mobiles utilisant un GPS Cinématique. En robotique manipulatrice, nous avons développé le formalisme de la *Commande Référencée Capteur* pour un capteur 3D et nous avons développé une loi de commande 3D non linéaire.

3.2 Robotique mobile

Nos travaux en asservissement visuel 3D débutent en 1993, par la thèse de Christophe Debain (Debain, 1996) sur le guidage par vision d'une tondeuse à gazon. Cette application a fait l'objet d'une collaboration entre le Cemagref, un industriel *Guerin-Courde* et le LASMEA.

Depuis 1997, nous nous intéressons au guidage de robots mobiles à roues (automobile et engins agricoles) par GPS cinématique. Cette étude fait l'objet de la thèse de Lionel Cordesses (Cordesses, 2000) cofinancée par le LASMEA et le Cemagref. Cette application fait l'objet d'une collaboration entre le Cemagref, un industriel de l'agriculture et le LASMEA.

Guidage d'une tondeuse à gazon par vision

Le guidage de la tondeuse à gazon s'est décomposé en deux aspects : l'aspect perception traité par Mustapha Derras (Derras, 1993), dont le but est d'extraire la limite de fauche à chaque itération, et l'aspect commande traité par Christophe Debain (Debain, 1996) et qui fait l'objet de ce paragraphe.

La technique mise en œuvre pour la commande est basée sur deux idées principales. La première porte sur la modélisation cinématique de l'engin, et la seconde sur la génération d'une trajectoire à suivre et au contrôle de celle-ci.

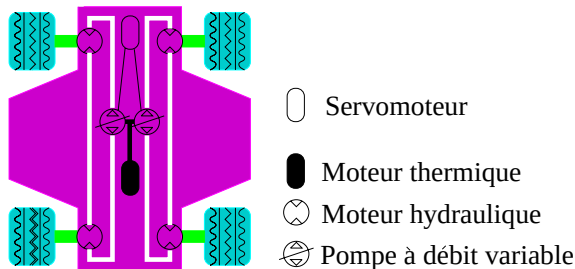


FIG. 3.1 – Tondeuse à gazon : architecture hydraulique et prototype

La tondeuse à gazon est un engin mobile comportant un avancement hydrostatique. Deux circuits hydrauliques indépendants contrôlent la vitesse des roues droite et gauche. Deux actionneurs permettent de commander la vitesse moyenne v d'avancement (fixée par radio-commande), et la direction de l'engin par différence d'avancement Δv entre les roues droite et les roues gauche. La figure 3.1 représente l'architecture hydraulique associée à la tondeuse ainsi que le prototype.

Nous avons choisi de modéliser la tondeuse au moyen d'un essieu rigide dont le centre serait confondu avec le centre de la machine. La figure 3.2 résume cette modélisation où b représente la

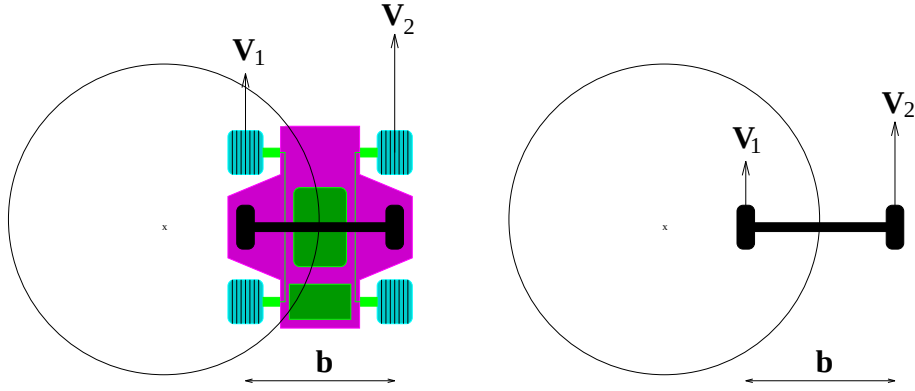


FIG. 3.2 – Tondeuse à gazon : modélisation par un essieu rigide

largeur de l'essieu, V_1 la vitesse des roues gauche et V_2 celle des roues droite. Nous avons proposé un modèle cinématique associé à cet essieu rigide, et établi la matrice jacobienne (3.1) liant les commandes des actionneurs ($v, \Delta v$) et les variables articulaires associées ($\dot{q}_1, \dot{q}_2$) aux roues de l'essieu rigide (r représente le rayon d'une roue).

$$\begin{bmatrix} v \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ -r & r \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La seconde partie de ces travaux a consisté à la génération d'une trajectoire de l'essieu rigide liant une position initiale à une position finale. Pour cela, nous nous sommes inspirés des travaux développés par Nasser Kehtarnavaz dans (Kehtarnavaz et al., 1991) utilisant une trajectoire composée de deux portions de cercle de rayon identique passant respectivement par la position initiale et la position finale.

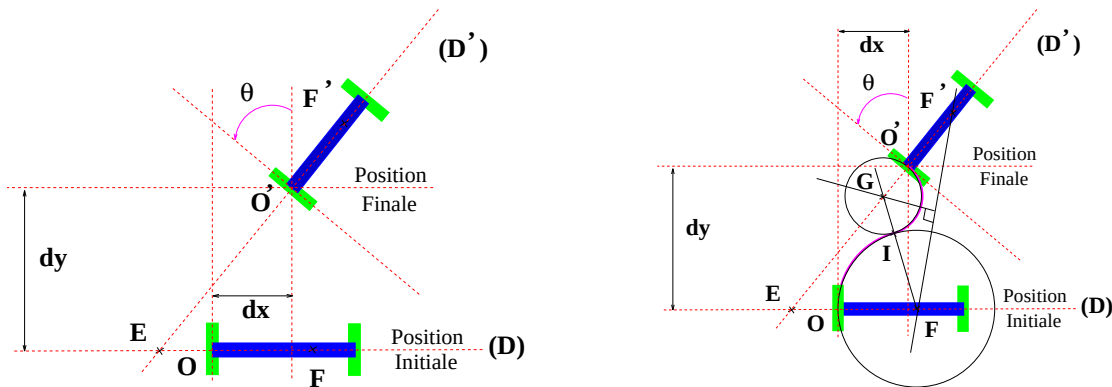


FIG. 3.3 – Tondeuse à gazon : génération de trajectoire

Nous avons proposé de supprimer la contrainte d'égalité sur les deux rayons et de minimiser l'écart entre l'orientation de la tondeuse et la ligne de fauche. Cette possibilité nous a permis de garantir un fonctionnement correct pour l'algorithme de perception chargé de l'extraction de la ligne de fauche. Par une construction purement géométrique, nous avons construit une trajectoire 3D reliant ces deux positions. A partir des cercles ainsi obtenus (rayons associés) et de la vitesse longitudinale fixée V_{moy} , il est possible d'en déduire les vitesses articulaires liées à chaque roue, et par conséquent d'obtenir les relations suivantes :

$$\begin{cases} v = V_{moy} \\ \Delta v = \frac{b \cdot V_{moy}}{R} \end{cases} \quad (3.2)$$

où R représente le rayon du premier cercle à parcourir.

Le schéma d'asservissement visuel mis en œuvre est donné par la figure 3.4.

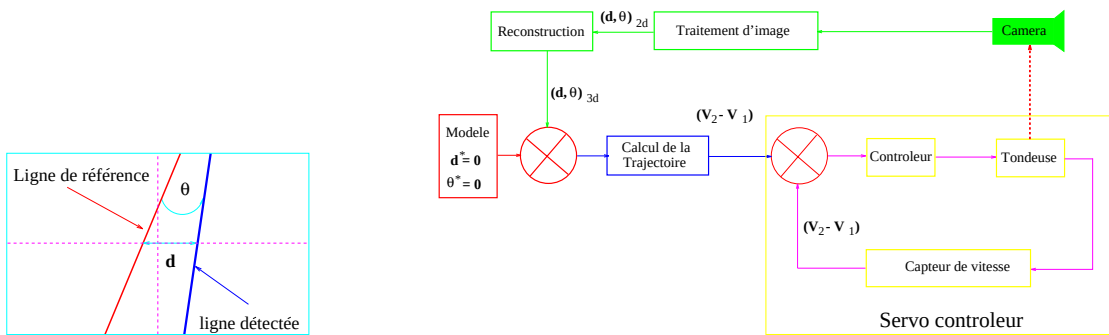


FIG. 3.4 – Plan image 2D - Schéma d'asservissement visuel 3D

A la cadence du traitement d'image ($T_e = 300ms$), les paramètres de la limite de fauche (d, θ) sont extraits et par reconstruction on en déduit la position 3D courante de la tondeuse par rapport à la limite de fauche. Par différence avec une référence souhaitée, une nouvelle trajectoire est calculée à chaque itération. La consigne Δv est ainsi réactualisée à chaque période et un asservissement bas niveau permet d'assurer le respect de cette consigne.

Des essais en simulé et en réel ont montré la faisabilité de cette approche.

Les détails sur la construction de la trajectoire et les résultats expérimentaux sont consignés dans le mémoire de thèse de Christophe Debain (Debain, 1996).

Ces travaux font partie de la première application concernant le guidage d'engins agricoles réalisée dans la thèse de Christophe Debain (Debain, 1996). Ils font l'objet d'une revue soumise (Debain et al., 2000), de trois publications dans des congrès internationaux (Debain, Derrass, Berducat, Bonton and Gallice, 1994; Derrass, Debain, Berducat, Bonton and Gallice, 1994b), et à une présentation orale dans le cadre d'un tutorial sur la *Robotique Mobile - Application à la Robotique Agricole* (SYROCO'97 à Nantes).

Guidage de robots mobiles à roues par GPS cinématique

Déjà, depuis quelques années, le secteur de l'agriculture s'intéresse de très près à l'utilisation de système GPS (Global Positioning System) pour des projets d'Agriculture de précision : **la bonne dose d'engrais, au bon endroit et au bon moment**. Ainsi, les grands constructeurs du mécanisme agricole proposent des solutions (Case (AFS), John Deere (Greenstar), AGCO (Fieldstar), Claas (Agrocom), New Holland...) permettant de prendre en considération tout le cycle d'exploitation de parcelles.

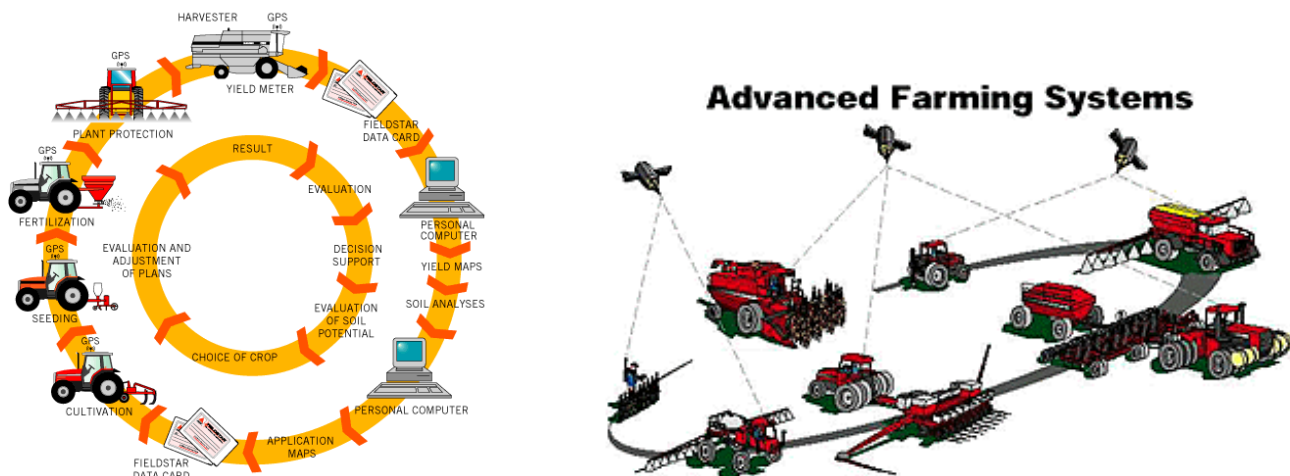


FIG. 3.5 – Agriculture de précision: cycle annuel et système de communication

Dans ce cadre, il est utile de proposer des solutions de guidage automatique permettant de soulager la tâche du conducteur, et d'assurer une répétabilité et une précision suffisantes pour ce type d'applications. Des projets en ce sens ont déjà vu le jour. On peut citer les travaux de Gabriel Elkaim dans (Elkaim et al., 1997) qui propose une solution pour le guidage d'un tracteur par CDGPS et de Marc Ollis (Ollis and Stentz, 1997) qui envisage l'utilisation conjointe de vision et de GPS.

Pour cela, en collaboration avec le Cemagref nous avons décidé d'étudier un système de guidage automatique par GPS cinématique visant deux applications principales : le guidage d'engins agricoles dans le cadre de programme portant sur l'agriculture de précision (un tracteur), et le guidage de voiture automobile (une Citroën Evasion : Démonstrateur *Velac* du LASMEA) sur routes planes et non planes. Ce travail fait l'objet de la thèse de Lionnel Cordesses (Cordesses, 2000).

Mis en place par le DOD aux Etats-Unis, le système GPS est désormais disponible pour la plupart des applications nécessitant une information de localisation. Il existe également le système *Glionass* développé par l'ex-URSS. Pour le système GPS, 24 satellites tournent constamment autour de la terre et la position est estimée à partir de 4 mesures de distance satellites/récepteur. Il existe des

systèmes GPS position et GPS attitude.

Le système GPS position possède trois formes :

- le GPS simple (un récepteur + une antenne) fournit la position xyz avec une précision hectométrique (≈ 100 m),
- le DGPS (Differential GPS) ou GPS différentiel (un récepteur fixe + un récepteur mobile + deux antennes + une liaison radio) fournit la position xyz avec une précision décimétrique (≈ 10 m),
- le CDGPS (Carrier phase Differential GPS) ou GPS cinématique (différentiel avec correction de la phase) (un récepteur fixe + un récepteur mobile + deux antennes + une liaison radio) fournit la position xyz avec une précision centimétrique (≈ 1 cm).

Le système GPS attitude met en œuvre quatre antennes et estime l'attitude du véhicule équipé du système GPS.

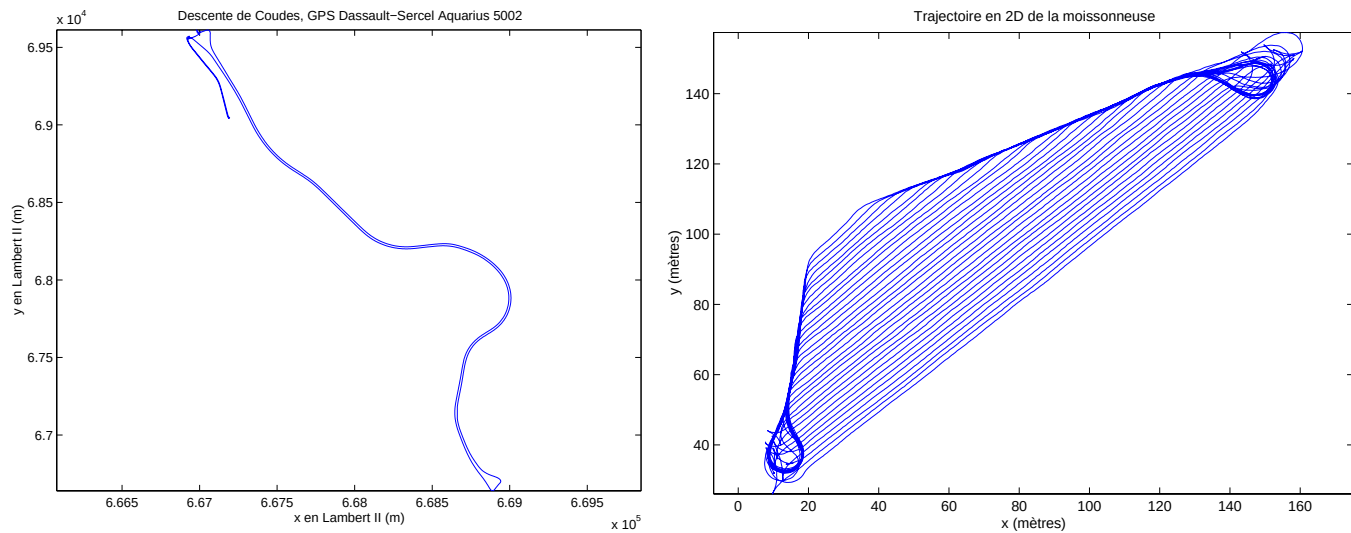
Nos premiers travaux portent actuellement sur la validation de l'approche de guidage par GPS cinématique (GPS mode RTK : Real Time Kinematic). Les premiers essais ont donc concerné l'étude de certains GPS sur deux types de sites : un site routier et un site agricole en pente. La figure 3.6 représente les deux prototypes utilisés : un véhicule de tourisme type R21 sur route, et une moissonneuse-batteuse sur le site agricole.



FIG. 3.6 – *Evaluation d'un système GPS cinématique*

Pour certains GPS, la précision centimétrique est effective. Certains problèmes importants ont pu être notés : liaison radio, temps de réinitialisation, constellation, ...

La figure 3.7 représente la trajectoire reconstruite de la portion de route à partir des données GPS et le site agricole reconstruit par maillage des données GPS.

FIG. 3.7 – *Profil de route et de champ*

Enfin, afin de valider complètement le guidage de véhicule, une première série d'expérimentations a pu avoir lieu avec succès. Une phase d'apprentissage a été nécessaire pour effectuer un relevé de la consigne à suivre lors de la manipulation de guidage.

Ces travaux sont en cours d'élaboration et n'ont pas fait l'objet de publication à l'heure actuelle. Deux présentations orales sur le GPS cinématique ont été faites à l'Ecole Doctorale de Clermont-Ferrand en 1997 et aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique organisées à Clermont-Ferrand en juin 1998.

3.3 Robotique manipulatrice

En ce qui concerne les applications de l'asservissement visuel 3D pour la robotique manipulatrice, nous avons traité différentes approches basées sur la disponibilité à chaque itération d'informations 3D caractérisant l'interaction entre le capteur et la scène observée.

La première porte sur la mise en œuvre du formalisme de la *Commande Référencée Capteur* (Samson et al., 1991), et la seconde sur un nouveau formalisme que nous venons de mettre au point au LASMEA basé sur les techniques de retour d'état.

Commande Référencée Capteur

En reprenant le formalisme de la *Commande Référencée Capteur*, nous avons imaginé un capteur capable de fournir des informations sur la Pose 3D relative entre le capteur et la scène (ou objet).

Ainsi nous avons modélisé les matrices d'interaction pour les primitives capteurs 3D de type point $\mathcal{L}_P^t$ ou de type orientation $\mathcal{L}_\theta^t$.

$$\mathcal{L}_P^t = (-I_3 \quad AS(P)) \quad \mathcal{L}_\theta^t = (0_3 \quad -I_3) \quad (3.3)$$

Il est donc possible de caractériser l'interaction entre un capteur et un objet par la Pose 3D (O, θ) relative entre un repère lié au capteur et un autre lié à l'objet

$$\mathcal{L}_{Pose}^t = \begin{pmatrix} -I_3 & AS(O) \\ 0_3 & -I_3 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

où O représente les coordonnées de l'origine du repère objet dans le repère capteur.

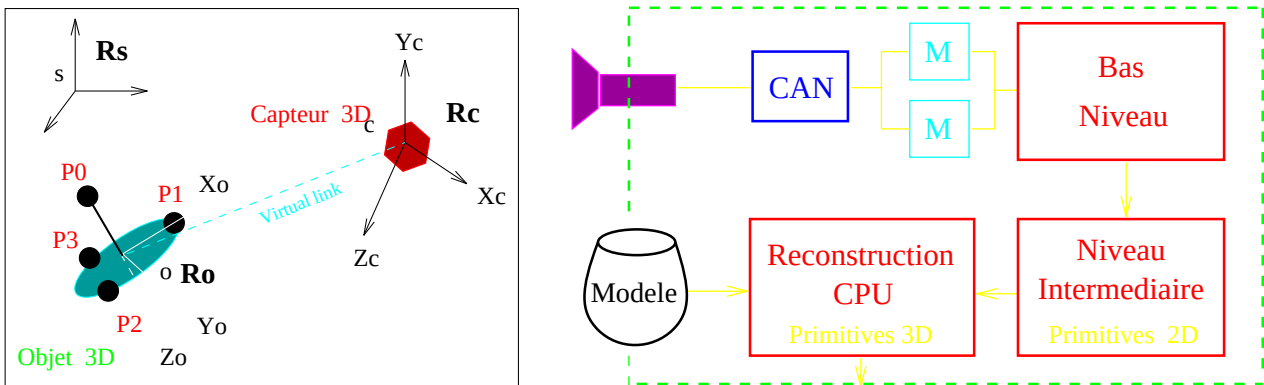


FIG. 3.8 – *Objet 3D - Capteur 3D*

Pour le cas du capteur caméra, nous avons mis en œuvre l'algorithme de Daniel DeMenthon (DeMenthon and Davis, 1995) pour le calcul de pose 3D par vision monoculaire à partir de quatre points caractéristiques composant l'objet représenté par la figure 3.8.

Le schéma d'asservissement visuel utilisé est de type asservissement visuel 3D. La période d'échantillonnage est de 80ms (une optimisation pour passer en temps réel vidéo est possible). Nous avons validé l'utilisation des matrices d'interaction composées soit des quatre points 3D, soit de la Pose 3D.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans un congrès international (Martinet et al., 1996b), d'une publication dans un workshop international dédié à l'asservissement visuel (Martinet et al., 1997a), et d'une présentation orale aux Journées du Pôle SARTA de Clermont-Ferrand en 1995.

Commande par retour d'état

Plus récemment, nous avons proposé pour la commande 3D un nouveau formalisme.

Comme précédemment, la tâche robotique considérée est une tâche de positionnement d'un repère lié à l'effecteur du robot par rapport à un repère absolu attaché à la scène.

La scène est composée d'un objet 3D et d'un système capteur embarqué sur l'effecteur d'un bras manipulateur. Nous définissons trois matrices de transformation homogène :

- $\underline{M}_o$ représente la matrice de transformation homogène entre un repère absolu $\mathcal{R}_A$ attaché à la scène, et un repère objet $\mathcal{R}_o$
- $\underline{M}_{c_t}$ représente la matrice de transformation homogène entre un repère absolu $\mathcal{R}_A$, et le repère capteur calculé à chaque itération $\mathcal{R}_{c_t}$
- $\underline{M}_c^*$ représente la matrice de transformation homogène entre un repère absolu $\mathcal{R}_A$, et le repère capteur désiré à l'équilibre $\mathcal{R}_c^*$.

Pour simplifier la représentation du modèle d'état, il est judicieux de prendre comme repère absolu, le repère capteur désiré $\mathcal{R}_c^*$ lorsque la tâche de positionnement est réalisée. La figure 3.9 représente ces simplifications (à gauche cas général, à droite cas retenu).

Si l'on mesure la Pose 3D de l'objet $\overline{M}_{p(t)}$ dans le repère capteur par vision monoculaire à chaque itération, on peut déduire la matrice $\overline{M}_{C_t}$ par la relation suivante :

$$\overline{M}_{C_t} = \overline{M}_o \cdot \overline{M}_{p(t)}^{-1} \quad (3.5)$$

La matrice $\overline{M}_o$ peut être obtenue par apprentissage avec le système de mesure embarqué afin d'éviter les problèmes bien connus de calibrage.

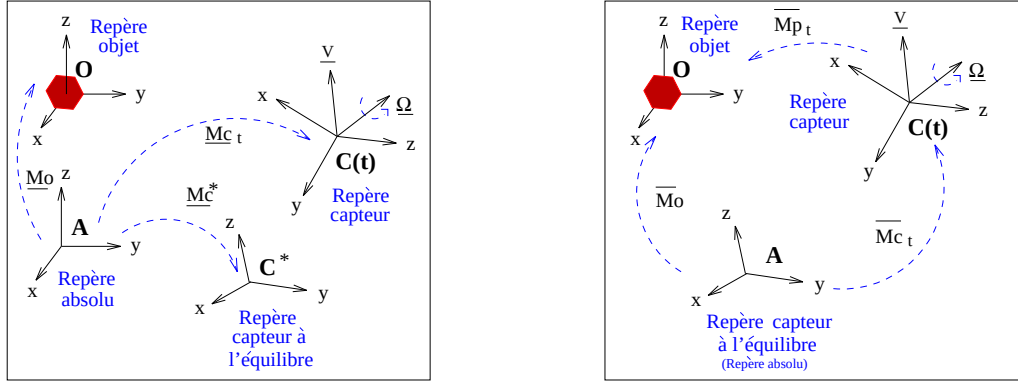


FIG. 3.9 – Les différents repères utilisés

Les paramètres de Pose peuvent être exprimés comme une matrice de transformation homogène $\overline{M}(t)$ telle que :

$$\overline{M}(t) = \overline{M}_{C_t} = \overline{M}_{AC(t)} = \begin{bmatrix} R(t) & [\underline{AC}(t)]_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

où $R(t)$ représente l'orientation, et $[\underline{AC}(t)]_A$ la position du repère capteur dans le repère absolu retenu.

On peut utiliser la représentation exponentielle pour la rotation :

$$R(t) = \exp(-AS(\underline{\theta}(t))) \quad (3.7)$$

où $AS(\underline{\theta}(t))$ est la matrice antisymétrique associée au vecteur d'orientation $\underline{\theta}(t) = \|\underline{\theta}(t)\| \cdot \underline{u}(t)$.

En dérivant la relation 3.6, puis en adoptant les nouvelles notations suivantes :

- $\underline{x}(t) = [\underline{AC}(t)]_A$ la position courante de la caméra
- $\underline{V}(t) = [\underline{V}(C)]_C$ le vecteur de translation exprimé dans l'espace capteur
- $AS(\underline{\Omega}) = [AS(\underline{\Omega})]_C$ la matrice antisymétrique associée au vecteur de rotation $\underline{\Omega}$ exprimée dans l'espace capteur

on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \underline{x}(t) &= R(t) \cdot \underline{V}(t) \\ \frac{d}{dt} R(t) &= R(t) \cdot AS(\underline{\Omega}) \end{cases} \quad (3.8)$$

Pour la représentation dans l'espace d'état, nous choisissons le vecteur d'état $\underline{X}(t) = (\underline{x}^t(t), \underline{y}^t(t))^t$ de dimension 6, tel que :

- $\underline{x}(t)$ représente la position courante de la caméra

- $\underline{y}(t)$ une image de l'orientation courante de la caméra, définie par :

$$AS(\underline{y}(t)) = \frac{1}{2}(R^t(t) - R(t)) = \sin(\|\underline{\theta}(t)\|).AS(\underline{u}(t)) \quad (3.9)$$

Avec cette représentation, nous pouvons exprimer une équation d'état du système :

$$\frac{d}{dt} \underline{X}(t) = B(\underline{X}) \cdot \underline{U} \quad (3.10)$$

où

- $\underline{U} = (\underline{V}^t, \underline{\Omega}^t)^t$ représente le torseur cinématique (vecteur de commande)
- $B(\underline{X}) = \begin{bmatrix} R(\underline{y}) & O_3 \\ O_3 & A(\underline{y}) \end{bmatrix}$ où les matrices $R(\underline{y})$ et $A(\underline{y})$ dépendent de l'orientation $\underline{y}$.

Le système ainsi obtenu est linéaire au regard de la commande $\underline{U}$, et non linéaire vis-à-vis du vecteur d'état. La commandabilité du système dépend de la matrice de commande $B(\underline{X})$. $B(\underline{X})$ est toujours de rang plein sauf dans des cas particuliers tels que $\|\underline{\theta}\| = \frac{\pi}{2} + k\pi$.

Dans les conditions où $(0 \leq \|\underline{\theta}\| < \frac{\pi}{2})$, nous avons établi l'expression de l'inverse de la matrice de commande $B(\underline{X})$.

A partir de cette équation d'état, nous avons étudié plusieurs lois de commande :

- une commande linéarisée. Nous avons considéré le linéarisé tangent du retour d'état

$$\begin{cases} \frac{d\underline{X}(t)}{dt} = B(\underline{X}) \cdot \underline{\mathcal{U}} \\ \underline{\mathcal{U}} = -K \cdot \underline{X} \end{cases} \quad (3.11)$$

- une commande non linéaire :

$$\begin{cases} \frac{d\underline{X}}{dt} = -K \cdot \underline{X} \\ \underline{\mathcal{U}} = -B^{-1}(\underline{X}) \cdot K \cdot \underline{X} \end{cases} \quad (3.12)$$

Dans les deux cas, la matrice de gain $K (\in \mathcal{M}_{6 \times 6})$ est de la forme :

$$K = \begin{pmatrix} k_1 \cdot I_3 & k_2 \cdot I_3 \\ k_3 \cdot I_3 & k_4 \cdot I_3 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

où k_1, k_2, k_3, k_4 sont des réels choisis par l'utilisateur en respectant les conditions de stabilité. Les gains k_2 et k_3 permettent un couplage entre la commande des vitesses en translation et des vitesses

en rotation.

Nous avons testé ces lois de commande avec et sans couplage dans le cas particulier du capteur caméra. Nous avons établi les conditions de stabilité dans le cas général (sans considérer un capteur particulier) pour les deux lois de commande. Un simulateur a été développé en langage C et les expérimentations réelles ont été réalisées avec succès sur notre plate-forme robotique.

Ces travaux sont en cours d'élaboration à l'heure actuelle et font l'objet d'une revue en cours de préparation pour le journal IJRA (Martinet and Gallice, 2000), d'une publication soumise dans un congrès international (Martinet and Gallice, 1999), et d'une présentation orale aux Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique organisées à Clermont-Ferrand en juin 1998.

Chapitre 4

Bilan et Perspectives

Depuis 8 années, nos activités de recherche en asservissement visuel ont porté sur le développement des approches d'**asservissement visuel 2D** et d'**asservissement visuel 3D**, sur le développement de systèmes de vision parallèles, et sur l'étude et la mise en place de prototypes expérimentaux et d'outils d'aide à la simulation. Plus récemment, nous nous sommes intéressés à la **comparaison des approches 2D et 3D** dans le cas d'un objet composé de 4 points caractéristiques.

Asservissement visuel 2D

Nous avons contribué au développement de l'asservissement visuel 2D tant sur les aspects capteurs et modélisation que sur l'aspect commande. Nous nous sommes inspirés des travaux sur la *Commande Référencée Vision*, et nous avons également mis en œuvre des techniques d'automatique avancées appliquées au cas du retour visuel pour des applications mettant en œuvre des robots manipulateurs et des robots mobiles.

Nous avons montré l'avantage d'utiliser le couplage entre un ou plusieurs faisceau(x) laser et une caméra pour l'asservissement visuel. En fait cette approche permet d'enrichir le contenu de l'image acquise à chaque itération et de ce fait simplifie a priori son interprétation. La modélisation des primitives usuelles a été réalisée en utilisant l'approche *Commande Référencée Vision*. Nous avons effectué l'ensemble des manipulations sur un robot ASEA-IRB5 à 5 degrés de liberté. Pour l'avenir, cette approche devrait nous permettre de développer des applications en robotique agro-alimentaire en collaboration avec le Cemagref.

Nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'un retour visuel pour le contournement d'objets complexes. Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre un enchaînement de tâches élémentaires d'asservissement visuel, puis nous nous sommes penchés sur le problème de génération de trajectoire dans l'espace capteur caméra. Afin de prendre en compte le cas des objets complexes, une approche originale est proposée pour effectuer un contournement de l'objet considéré. Cette ap-

proche consiste à extraire les contours de l'objet et à projeter chaque point du contour sur un axe orthogonal au sens de déplacement. Une fonction de tâche particulière permet de maintenir l'objet à distance de la caméra. Nous travaillons désormais sur la possibilité de définir une boîte englobante de l'objet et d'asservir la caméra à partir de celle-ci. Nous effectuons l'ensemble des manipulations sur un robot cartésien AFMA à 6 degrés de liberté, et nous avons développé un simulateur sur station de travail. Afin de viabiliser une telle approche, il sera nécessaire d'étudier la robustesse du contrôle de la trajectoire au regard des imprécisions de mesures, de calibrage et de modèle. Pour continuer ces travaux, la recherche des axes principaux de l'objet ou l'utilisation du flot optique devrait faciliter la construction de la boîte englobante. L'étude et la mise en œuvre de stratégies perceptives nous semblent indispensables pour aborder ce problème. La vision active devrait permettre l'apprentissage de l'objet, et l'asservissement visuel le contournement de celui-ci. Cet axe, nouveau pour nous, devrait permettre de développer la vision active au laboratoire.

Dans le cas de la robotique mobile, nous nous sommes focalisés sur l'asservissement par rapport à une droite détectée dans l'image (limite de fauche pour des applications agricoles, signalisation horizontale pour les applications automobiles). Nous avons mis en œuvre une approche de type *Commande Référencée Vision* et des techniques de commande avancée comme le placement de pôle ou la commande robuste de type H_∞ . Ces techniques nous ont permis d'étudier la robustesse des lois de commande au regard des problèmes de variations de tangage et de hauteur de la caméra. Nous avons montré qu'il était possible de guider un engin agricole sur terrain plat et en pente à partir d'informations visuelles. Nous avons utilisé une moissonneuse-batteuse pour les applications agricoles, et nous avons développé un banc de test pour les applications de type automobile. Si nous avons pu expérimenter le guidage de robots mobiles agricoles, par contre les lois développées pour les véhicules automobiles n'ont pu être validées. A cette fin, nous allons étudier et équiper le véhicule expérimental du laboratoire (VELAC) d'actionneurs pour la commande d'accélération, la commande de direction et la commande de freinage.

Nos premiers essais porteront donc sur la validation des approches de commande dans l'espace image que nous avons développées depuis 4 années. Il semble également intéressant d'approfondir les approches sur la commande robuste notamment par le simple fait que la commande avec un seul paramètre est insuffisante pour garantir la commande en écart latéral et en orientation du véhicule. L'utilisation des deux paramètres de la droite semble donc incontournable.

Un autre aspect pourra être abordé : la non holonomie. En effet, les contraintes non holonomes des robots mobiles se transposent dans l'espace image lorsqu'on utilise le capteur caméra. Il serait intéressant d'analyser l'effet de ces contraintes et de proposer des lois de commande les intégrant.

Asservissement visuel 3D

De la même façon que dans le cas de l'asservissement visuel 2D, nous avons contribué au développement de l'asservissement visuel 3D, tant sur les aspects modélisation que sur les aspects commande.

Dans le cas de la robotique manipulatrice, nous avons appliqué la *Commande Référencée Capteur* au cas des primitives $3D$ type *Point* et *Pose*. Nous avons mis en œuvre la technique de calcul de Pose proposée par Daniel DeMenthon à partir de 4 points non coplanaires afin d'extraire les informations visuelles $3D$. De plus, au niveau commande nous avons proposé un nouveau formalisme basé sur un retour d'état linéaire et non linéaire. Le vecteur d'état est composé de 6 composantes : 3 pour la position, et 3 pour l'image de l'orientation. Dans nos expérimentations, l'objet retenu est composé de 4 points caractéristiques non coplanaires (sommets d'une pyramide). Nous effectuons l'ensemble des manipulations sur notre robot cartésien AFMA à 6 degrés de liberté. La poursuite de l'étude de lois de commande $3D$ est intéressante à plusieurs titres : disposer de commandes $3D$, ou disposer de commandes mixtes $2D$ et $3D$. Dans l'approche $2D - 1/2$ (Malis, Chaumette and Boudet, 1997; Chaumette, Malis and Boudet, 1997; Malis, Chaumette and Boudet, 1998), Ezio Malis et François Chaumette proposent un mélange d'informations $3D$ et $2D$. Les résultats théoriques et pratiques de cette approche sont très intéressants, car ils montrent qu'il est possible de mixer plusieurs informations et que l'introduction de paramètres $3D$ dans la loi de commande peut faciliter l'étude de la stabilité et de la robustesse. Dans cette optique, un autre intérêt est le couplage multi-capteur - *capteur $2D$ et capteur $3D$* . Au jour d'aujourd'hui il n'est pas évident que l'on puisse résoudre le problème posé sur l'instabilité de méthodes d'estimation de paramètres $3D$ par vision monoculaire. Une idée intéressante serait de coupler plusieurs capteurs afin de comparer des approches de type fusion de données avec commande $3D$, et des approches de commandes mixtes (ou "*fusionnantes*").

Nous pensons qu'il est possible de contrôler les sorties du champ de la caméra pour les commandes $3D$ ou $2D$ voire mixte, soit en introduisant des contraintes dans les lois de commande existantes, ou de synthétiser de nouvelles lois prenant en compte cet aspect. De plus, une extension de la loi de commande $3D$ non linéaire aux objets mobiles est possible. Il nous reste à en faire le développement et l'expérimentation.

Pour finir, au niveau applicatif nous pensons que le secteur agro-alimentaire peut être une cible intéressante. Dans ce sens, nous travaillons étroitement avec le Cemagref afin de solliciter la demande et montrer les possibilités de telles approches.

Pour la robotique mobile, nous avons mis au point une technique de génération de trajectoire pour rejoindre deux positions utilisant deux cercles de rayon différents. A chaque itération (300 ms), la ligne de référence à suivre (ligne de fauche) est extraite et la trajectoire recalculée. Le prototype considéré était une tondeuse à gazon et l'application l'entretien des espaces naturels. Nous avons montré que cette technique est applicable à tout robot mobile modélisable par un axe virtuel à deux roues.

De plus, il y a un an nous avons lancé un projet de guidage de robot mobile par GPS cinématique (≈ 1 cm) pour les applications agricoles et automobiles. Les premiers essais ont montré la faisabilité d'une telle approche. Nous envisageons d'étudier la transposition de l'approche de commande non linéaire $3D$ synthétisée pour les robots manipulateurs, aux cas des robots mobiles. Nous pensons qu'il est intéressant d'étudier une loi de commande de véhicules sur terrain non plan, notamment pour les applications agricoles.

Enfin, dans l'optique de la commande par couplage multi-capteur il semble intéressant de considérer l'utilisation simultanée d'un CDGPS et d'une caméra.

Comparaison entre Asservissement visuel 2D et 3D

Récemment, nous avons commencé une étude comparative entre l'asservissement visuel 2D et 3D. Cette étude est basée sur la mise en œuvre de différentes approches d'asservissement visuel sur un objet composé de 4 points caractéristiques non coplanaires formant une pyramide. L'étude comparative a porté sur trois types de lois de commande : la *Commande Référencée Vision* appliquée au cas de 4 points dans l'image avec ou sans estimation de la matrice d'interaction à chaque itération, la *Commande Référencée Capteur* appliquée au cas de 4 points 3D et à la Pose 3D, et la commande linéaire ou non linéaire avec ou sans couplage. Les critères retenus étaient : l'analyse de la stabilité de la loi de commande, vitesse de convergence, la période d'échantillonnage, sensibilité au bruit de mesure ...

Au niveau stabilité des lois de commande, l'asservissement visuel 2D pose souvent des problèmes. Compte tenu de la complexité des calculs, il est difficile de montrer que l'estimation de la matrice d'interaction est suffisamment proche de sa valeur théorique afin de satisfaire la condition suffisante de stabilité ($\hat{L}_s^+ . L_s > 0$) (Chaumette, 1998b; Chaumette, 1998a).

Cependant, même s'il est possible de démontrer la stabilité des lois de commande 3D dans le cas idéal, il ne faut pas nier le problème posé par l'estimation indirecte de la mesure de Pose à partir du capteur caméra. Comme le fait remarquer François Chaumette dans (Chaumette, 1998a), la stabilité de l'algorithmie d'extraction de la Pose 3D repose sur les mêmes problèmes que ceux que nous rencontrons en asservissement visuel 2D, comme les problèmes liés à la représentation dans l'image (unicité). L'estimation ou la mesure indirecte de grandeur sont de plus en plus utilisées, et pour résoudre les problèmes d'ambiguïté, plusieurs techniques peuvent être employées. Le filtrage temporel est certainement la technique la plus utilisée.

Au niveau des autres critères, en fait peu de différences sont notables. La vitesse de convergence est sensiblement équivalente. La période d'échantillonnage est quasi-identique compte tenu que l'algorithmie d'estimation de pose est rapide. On peut quand même remarquer, qu'il est plus facile de conserver l'objet dans l'image en asservissement visuel 2D lorsque la matrice d'interaction est calculée à chaque itération au moyen d'un estimateur de profondeur (lorsque l'on est éloigné de la position d'équilibre) car la trajectoire est alors plus contrainte dans l'image, et qu'il est difficile de le conserver en commande 3D (les conditions initiales entrant pour beaucoup dans ce phénomène). Pour ce qui concerne l'effet de la précision et du bruit de mesure, nous avons constaté que l'algorithmie de reconstruction y était sensible, ce qui entraîne un bruit significatif sur l'estimation des mesures 3D utilisées. Cependant, lorsqu'il s'agit d'utiliser des amers il est possible de limiter ce bruit et d'augmenter la précision des mesures de telle manière que ce phénomène soit atténué.

La comparaison des approches 2D et 3D nous semble un bon moyen de faire progresser les deux approches. Il nous reste encore beaucoup de développements à faire, notamment sur l'étude de l'influence du retard et des différents type de calibrage dans la boucle de commande, et sur la mise en

œuvre de ces lois pour différents objets et primitives. A ce sujet, il semblerait également intéressant d'étudier un cas industriel pour se confronter à la réalité terrain et d'envisager des collaborations inter-laboratoires.

Bibliographie

- Agin, G. J.: 1979. Real-time control of a robot with a mobile camera. *Proceedings of the International Symposium on Industrial Robots*. Washington D.C. pp. 233–246.
- Allen, P. K., Timcenko, A., Yoshimi, B. and Michelman, P. 1993. Automated tracking and grasping of a moving object with a hand-eye system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **9**(2), 152–165.
- Alloum, A.: 1994. *Modélisation et commande dynamiques d'un véhicule pour la sécurité de conduite*. PhD thesis. Université de Technologie de Compiègne. Compiègne.
- Aloimonos, J., Weiss, I. and Bandyopadhyay, A.: 1987. Active vision. *Proceedings of the 1st International Conference on Computer Vision*. London, England. pp. 35–54.
- Aloimonos, J., Weiss, I. and Bandyopadhyay, A. 1988. Active vision. *International Journal of Computer Vision* **1**, 333–356.
- Aloimonos, Y.: 1993. *Active Perception*. ISBN 0-8058-1290-3. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Amat, J., Battle, J., Fuertes, J. and Martinez, A.: 1993. Vision controlled robot for agricultural application. *Proceedings of the 24th ISIR*. pp. 537–542.
- Araujo, H., Carceroni, R. L. and Brown, C. M. 1998. A fully projective formulation to improve the accuracy of Lowe's pose-estimation algorithm. *to appear in Computer Vision and Image Understanding, CVIU, Academic Press INC*.
- Astolfi, A.: 1995. Exponential stabilization of a mobile robot. *Proceedings of the 3rd European Control Conference*. Rome, Italy. pp. 3092–3097.
- Bajcsy, R. K. 1988. Active perception. *PIEEE* **76**(8), 996–1005.
- Basar, T. and Bernhard, P.: 1995. *H^∞ Optimal control and related minimax Design Problems - A dynamic Game approach*. ISBN 0-8176-3814-8. Birkhauser Publishers.

- Bensalah, F.: 1996. *Estimation du mouvement par vision active*. PhD thesis. IRISA/INRIA-Rennes. Rennes, France.
- Bernussou, J.: 1996. *Commande robuste, développements et applications*. Collection automatique, Hermes.
- Berry, F.: 1998. *Contournement d'objet complexes par vision asservissement visuel*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand.
- Berry, F., Martinet, P. and Gallice, J.: 1997. Trajectory generation by visual servoing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 2. IROS'97. Grenoble, France. pp. 1065–1071.
- Berry, F., Martinet, P. and Gallice, J.: 1998. Real time visual servoing around a complex object. *Proceedings of the IAPR Workshop on Machine Vision Applications*. MVA'98. Chiba, Japan. pp. 254–257.
- Beveridge, J. R. and Riseman, M.: 1995. Optimal geometric model matching under full 3d perspective. *Computer Vision and Image Understanding, CVIU, Academic Press INC*. **61**(3), 351–363.
- Bolles, R. and Paul, R.: 1973. The use of sensory feedback in a programmable assembly system. *Technical Report CS-396*. Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Computer Science Department.
- Borne, P.: 1996. La commande robuste. *Systèmes de régulation*. Masson.
- Boukir, S.: 1993. *Reconstruction d'un environnement statique par vision active*. PhD thesis. IRISA/INRIA-Rennes. Rennes, France.
- Brockett, R. W.: 1983. Asymptotic stability and feedback stabilization. *Progress in Math.*, Birkhauser **27**, 181–208.
- Byrne, R. and Chaouki, A.: 1994. Robust lateral control of highway vehicles. *Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Paris, France. pp. 375–380.
- Byrne, R., Chaouki, A. and Dorato, P.: 1997. Experimental results in robust lateral control of highway vehicles. *IEEE Control Systems* pp. 70–76.
- Campion, G., Bastin, G. and d'Andrea Novel, B.: 1993. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 462–469.
- Capurro, C., Panerai, F., Grosso, E. and Sandini, G.: 1993. A binocular active vision system using space variant sensors: Exploiting autonomous behaviors for space applications. *Proceedings of the Third International Conference on Digital Signal Processing*. Nicosia.

- Casals, A., Amat, J. and Grau, A.: 1992. Texture parametrization method for image segmentation. *Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision ECCV'92*. pp. 160–164.
- Chapuis, R.: 1991. *Suivi de primitives image, application à la conduite automatique sur route*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Chapuis, R., Potelle, A., Brame, J. and Chausse, F. 1995. Real-time vehicle trajectory supervision on the highway. *The International Journal of Robotics Research* **14**(6), 531–542.
- Chateau, T., Berducat, M. and Bonton, P.: 1997. An original correlation and data fusion based approach to detect a reap limit into gray level image. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 3. IROS'97. Grenoble, France. pp. 1258–1263.
- Chaumette, F.: 1990. *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques*. PhD thesis. IRISA/INRIA-Rennes. Rennes, France.
- Chaumette, F.: 1998a. *De la perception à l'action: l'asservissement visuel - de l'action à la perception: vision active*. Documents d'habilitation. IRISA-IFSIC.
- Chaumette, F. 1998b. Potentiel problems of stability and convergence in image based and position-based visual servoing. *The confluence of Vision and Control, LNCIS series, Springer Verlag*.
- Chaumette, F., Malis, E. and Boudet, S.: 1997. 2D 1/2 visual servoing with respect to a planar object. *Proceedings of the Workshop on New trends in Image-Based Robot Servoing*. IROS'97. Grenoble - France. pp. 45–52.
- Chaumette, F., Rives, P. and Espiau, B.: 1991. Positioning of a robot with respect to an object, tracking it and estimating its velocity by visual servoing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 2248–2253.
- Chen, H. H. 1991. Pose determination from line-to-plane correspondences: existence condition and closed form solutions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(6), 530–541.
- Christy, S. and Horaud, R. 1998. Iterative pose computation from lines correspondences. *Computer Vision and Image Understanding, CVIU, Academic Press INC*.
- Clarke, D., Mothadi, C. and Tuffs, P. 1987. Generalized Predictive Control - part 1. the basic algorithm. *Automatica* **23**(2), 137–148.
- Coiffet, P.: 1993. *Robot habilis - Robot sapiens*. ISBN 2-86601-381-6. Collection Perspectives, Hermes.
- Collin, Y.: 1995. *Planification de tâches robots pour robots mobiles en environnement structuré*. PhD thesis. Université de Technologie de Compiègne. Compiègne.

- Cordesses, L.: 2000. *Guidage de robots mobiles par GPS Cinématique*. PhD thesis. Université Blaise-Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Corke, P.: 1993. *Visual control of robot manipulators - A review*. Vol. 7 of *Robotics and Automated Systems*, ISBN 981-02-1364-6. World Scientific Publishing Co.. pp. 1–31.
- Corke, P. and Good, M.: 1993. Controller design for high performance visual servoing. *Proceedings of the 12th World Congress*. Vol. 9. IFAC'93. Sydney, Australia. pp. 395–398.
- Corke, P. I.: 1996. *Visual Control of Robots: High Performance Visual Servoing*. Research Studies Press, ISBN 0-86380-207-9. John Wiley.
- Couvignou, P., Papanikolopoulos, N., Sullivan, M. and Khosla, P. 1996. The use of active deformable models in model-based robotic visual servoing. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **17**, 195–221.
- Cox, I. J. and Wilfong, G. T.: 1990. *Kinematic Modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot*. ISBN 0-387-97240-4.
- Cretual, A. and Chaumette, F.: 1997. Positioning a camera parallel to a plane using dynamic visual servoing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 1. IROS'97. Grenoble, France. pp. 43–48.
- Cretual, A. and Chaumette, F.: 1998. Image-based visual servoing by integration of dynamic measurement. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ICRA'98. Louvain, Belgium.
- Crowley, J. and Chaumette, F.: 1995. Comparison of kinematic and visual servoing for fixation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 1. IROS'95. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. pp. 335–341.
- Dandrea-Novet, B., Campion, G. and Bastin, G.: 1992. Dynamic feedback linearization of nonholonomic wheeled mobile robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. Nice, France. pp. 2527–2532.
- Daucher, Dhome, M., Lapreste, J. T. and Rives, G.: 1996. Speed command of a robotic system by monocular pose estimate. *Proceedings of the second ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems*. Vienna, Austria. pp. 275–280.
- Daucher, Dhome, M., Lapreste, J. T. and Rives, G.: 1997. Speed command of a robotic system by monocular pose estimate. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 1. Grenoble, France. pp. 275–280.
- Debain, C.: 1996. *Lois de commande pour le contrôle et la mobilité de machines agricoles*. PhD thesis. Université Blaise-Pascal. Clermont-Ferrand, France.

- Debain, C., Chateau, T., Berducat, M., Martinet, P. and Bonton, P. 2000. An help guidance system for agricultural vehicles. *Soumise à la revue Computers and Electronics in Agriculture (ELSEVIER)*.
- Debain, C., Derras, M., Berducat, M., Bonton, P. and Gallice, J.: 1994. Development of a visual guidance system for an upkeep robot of natural environments. *Proceedings of the International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks*. IMACS, Lille, France. pp. 121–124.
- Debain, C., Khadraoui, D., Derras, M., Martinet, P. and Bonton, P.: 1995. A visual servoing approach to control agricultural mobile machines. *Proceedings of the Fourth Workshop on Robotics in Agriculture and the Food-Industry*. International Advanced Robotics Programme, Toulouse-France. pp. 117–124.
- DeMenthon, D.: 1993. *De la vision artificielle à la réalité synthétique: système d'interaction avec un ordinateur utilisant l'analyse d'images vidéo*. PhD thesis. Université Joseph Fourier, Grenoble I. Grenoble, France.
- DeMenthon, D. and Davis, L. S. 1992. Exact and approximate solutions of the perspective-three-point problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14**(11), 1100–1105.
- DeMenthon, D. and Davis, L. S. 1995. Model based object pose in 25 lines of code. *International Journal of Computer Vision, Kluwer Academic Publishers* **12**(1-2), 123–141.
- Derras, M.: 1993. *Segmentation non supervisée d'images texturées par champs de Markov: Application à l'automatisation de l'entretien des espaces naturels*. PhD thesis. Université Blaise-Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Derras, M., Berducat, M. and Bonton, P.: 1991. Vision guided mower for the upkeep of natural environment. *Proceedings of the 1st International seminar of on-machine vision systems for the agricultural and bio-industries*. Montpellier. pp. 37–46.
- Derras, M., Berducat, M., Bonton, P., Gallice, J. and Canals, R.: 1993. Segmentation texturale originale appliquée au guidage visuel d'un robot d'entretien d'espaces naturels. *Proceedings of the 14^{ème} colloque sur le traitement du signal et des images*. GRETSI, Juan-les-Pins-France. pp. 771–778.
- Derras, M., Berducat, M., Bonton, P., Gallice, J. and Naudet, S.: 1994a. Segmentation texturale originale: Analyse et parallélisation temps réel. *Proceedings of the Reconnaissance des formes et intelligences artificielle*. AFCET. pp. 133–144.
- Derras, M., Debain, C., Berducat, M., Bonton, P. and Gallice, J.: 1994b. Unsupervised regions segmentation: Real time control of an upkeep machine of natural spaces. *Proceedings of the third European Conference on Computer Vision*. Vol. 2. ECCV'94. pp. 207–212.

- Derras, M., Verrat, L., Berducat, M. and Bonton, P.: 1995. Image processing and algorithms merging : Real time control of an upkeep machine for natural spaces. *Proceedings of the Fourth Workshop on Robotics in Agriculture and the Food-Industry*. pp. 93–98.
- Deutsch, C.: 1970. *Dynamique des véhicules routiers*. O.N.S.E.R.
- Dhome, M., Richetin, M., Lapresté, J. T. and Rives, G. 1989. Determination of the attitude of 3d objects from a single perspective view. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **11**(12), 1265–1278.
- Dickmanns, E. D. and Zapp, A.: 1985. Guiding land vehicles along roadways by computer vision. *Proceedings of the Congrès automatique*. AFCET. Toulouse, France. pp. 233–244.
- Dickmanns, E. D. and Zapp, A.: 1986. A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision. *Proceedings SPIE Mobile Robotics Conference*. Cambridge. pp. 161–168.
- Dickmanns, E. D. and Zapp, A.: 1987. Autonomous high speed road vehicle guidance by computer. *Proceedings of the 10th IFAC World Congress*.
- Djian, D. and Rives, P.: 1998. Reconnaissance d’objets 3d par vision active: Apprentissage de réseaux bayesiens. *Proceedings of the 11th congrès de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*. Vol. 1. Clermont-Ferrand, France. pp. 77–86.
- Dombre, E. and Khalil, W.: 1988. *Modélisation et Commande des robots*. Traité des Nouvelles Technologies, Série Robotique, ISBN 0-19-8538057. Hermès.
- Dorato, P. and Li, Y. 1986. A modification of the classical Nevanlinna-pick interpolation algorithm with applications to robust stabilization. *IEEE Transactions on Automatic Control* **31**(7), 645–648.
- Dorato, P., Fortuna, L. and Muscato, G.: 1992. *Robust Control for Unstructured Perturbations- An Introduction*. Vol. 168. Springer-Verlag, Lectures Notes in Control and Information Sciences.
- Dornaika, F.: 1995. *Contributions à l’intégration vision/robotique: calibrage, localisation et asservissement*. PhD thesis. INRIA Rhones-Alpes. INP de Grenoble.
- Dornaika, F. and Horaud, R. 1998. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **14**(4), 617–622.
- Doyle, J. and Stein, G. 1981. Multivariable feedback design: concepts for classical/modern synthesis. *IEEE Transactions Automatic Control* **AC-26**, 4–16.
- Doyle, J. C., Glover, K. G., Khargonekar, P. P. and Francis, B. A. 1989. State space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems. *IEEE Transactions on Automatic Control* **34**(8), 831–847.

- Elkaim, G., O'Connor, M., Bell, T. and Parkinson, B.: 1997. System identification and robust control of farm vehicles using CDGPS. *Proceeding of the 10th International Meeting of the Satellite Division of the Insitute of Navigation*. Vol. 2. ION-GPS-97. Kansas City, Missouri, USA. pp. 1415–1424.
- Espiau, B.: 1993. Effect on camera calibration errors on visual servoing in robotics. *Proceedings of the Third International Symposium on Experimental Robotics*. pp. 187–193.
- Espiau, B.: 1995. Sur les erreurs en asservissement visuel. *Technical Report 2619*. Rapport interne de Recherche INRIA.
- Espiau, B., Chaumette, F. and Rives, P. 1992. A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*.
- Faugeras, R. Y. and Toscani, G.: 1987. Camera calibration for 3D computer vision. *Proceedings of the International workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*. Tokyo, Japan.
- Feddema, J. T. and Lee, C. S. G. 1990. Adaptive image features prediction and control for visual tracking with a hand-eye coordinated camera. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **20**(5), 1172–1183.
- Feddema, J. T. and Mitchell, O. R. 1989. Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **5**(5), 691–700.
- Feddema, J. T., Lee, C. S. G. and Mitchell, O. R.: 1989. Automatic selection of image features for visual servoing of a robot manipulator. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Scottsdale, Arizona. pp. 832–837.
- Feddema, J. T., Lee, C. S. G. and Mitchell, O. R. 1991. Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **7**(1), 31–47.
- Fenton, R. E. and Mayhan, R. J. 1991. Automated highway studies of the ohio state university - An overview. *IEEE Transactions on vehicular technology* **40**(1), 100–113.
- Fenton, R. E., Cosgriff, R. L., Olson, K. W. and Blackwell, L. M. 1968. One approach to highway automation. *Proceedings of the IEEE* **56**(4), 556–566.
- Fenton, R. E., Melocik, G. C. and Olson, K. W. 1976. On the steering of automated vehicles: theory and experiment. *IEEE Transactions on Automatic Control* **AC-21**(3), 306–315.
- Ferri, M., Mangili, F. and Viano, G. 1993. Projective pose estimation of linear and quadratic primitives in monocular computer vision. *CVGIP: Image Understanding, Academic Press Inc.* **58**(1), 66–84.

- Fickinger, P.: 1992. Commande référencée vision: Etude et réalisation d'un système microélectronique pour l'extraction de primitives vision. *Technical report*. CNAM - Clermont-Ferrand.
- Forsyth, D., Mundy, J. L., Zisserman, A., Coelho, C., Heller, A. and Rothwell, C. 1991. Invariant descriptors for 3d object recognition and pose. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(10), 971–991.
- Gangloff, J. A., Mathelin, M. and Abba, G.: 1998. 6 d.o.f high speed dynamic visual servoing using GPC controllers. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium.
- Grandjean, P.: 1991. *Perception multisensorielle et interprétation de scènes*. PhD thesis. LAAS - Université Paul Sabatier. Toulouse, France.
- Grimble, M. J. and Kucera, V.: 1996. *Polynomial Methods for Control Systems Design*. ISBN 3-540-76077-6. Springer-Verlag Publishers.
- Grosso, E., Meta, M., Andrea, A. and Sandini, G. 1996. Robust visual servoing in 3-d reaching tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **12**(5), 732–742.
- Guldner, J. and Utkin, V. I. 1994. Stabilization of non-holonomic mobile robots using Lyapunov functions for navigation and sliding mode control. *Control theory and advanced technology* **10**(4), 635–647.
- Hager, G., Chang, W. C. and Morse, A. S. 1995. Robot hand-eye coordination based on a stereo vision. *IEEE Control Systems Magazine* **15**(1), 30–39.
- Hager, G., Hutchinson, S. and Corke, P.: 1996. *Visual Servo Control*. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis Hilton and Towers, Minneapolis, Minnesota. Tutorial TT3.
- Haralick, R. M. and Joo, H.: 1988. 2d-3d pose estimation. *Proceedings of the 9th International Conference on Pattern Recognition*. Vol. 1. pp. 385–391.
- Haralick, R. M., Joo, H., Lee, C., Zhuang, X., Vaidya, V. G. and Kim, M. B. 1989. Pose estimation from corresponding point data. *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics* **19**(6), 1426–1446.
- Haralick, R. M., Lee, C., Ottenberg, K. and Nolle, M.: 1991. Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 592–598.
- Hashimoto, K.: 1993. *Visual Servoing: Real-time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback*. Vol. 7 of *Robotics and Automated Systems*, ISBN 981-02-1364-6. World Scientific Publishing Co.

- Hashimoto, K., Ebine, T. and Kimura, H. 1996. Visual servoing with hand-eye manipulator - optimal control approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **12**(5), 766–774.
- Hashimoto, K., Kimoto, T., Ebine, T. and Kimura, H.: 1991. Image based dynamic visual for a hand-eye manipulator. *Proceedings of the MTNS'91*. Kobe, Japan. pp. 609–614.
- Horaud, R. and Dornaika, F. 1995. Hand-eye calibration. *International Journal of Robotics Research* **14**(3), 195–210.
- Horaud, R., Conio, B., Leboulleux, O. and Lacolle, B. 1989. An analytic solution for the perspective 4-point problem. *Computer Vision, Graphics and Image Processing, CVGIP, Academic Press INC.* **47**, 33–44.
- Horaud, R., Dornaika, F., Lamiroy, B. and Christy, S. 1997. Object pose: The link between weak perspective, paraperspective, and full perspective. *International Journal of Computer Vision, Kluwer Academic Publishers* **22**(2), 173–189.
- Hosoda, K. and Asada, M.: 1994. Versatile visual servoing without knowledge of true jacobian. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'94*. Munich, Germany. pp. 186–193.
- Hosoda, K., Sakamoto, K. and Asada, M.: 1995. Trajectory generation for obstacle avoidance of uncalibrated stereo visual servoing without 3d reconstruction. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'95*. pp. 29–34.
- Inrets: 1996. La route automatisée - réflexions sur un mode transport futur. *Technical report*. IN-RETS.
- Ishii, I., Nakabo, Y. and Ishikawa, M.: 1996. Target tracking algorithm for 1ms visual feedback system using a massively parallel processing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 4. ICRA'96. Minneapolis, USA. pp. 2309–2320.
- Jagersand, M., Fuentes, O. and Nelson, R.: 1997. Experimental evaluation of uncalibrated visual servoing for precision manipulation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. ICRA'97. Albuquerque, Nouveau Mexique, USA. pp. 2874–2880.
- Janabi - Sharifi, F. and Wilson, W. J. 1997. Automatic selection of image features for visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **13**(6), 890–914.
- Jang, W. and Bien, Z.: 1991. Feature-based visual servoing of an eye-in-hand robot with improved tracking performance. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Sacramento, California, USA. pp. 2254–2260.

- Jurie, F.: 1993. *Perception visuelle par propagation d'informations dans un réseau d'hypothèses: Application à l'interprétation de scènes routières*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Jurie, F., Martinet, P. and Gallice, J.: 1995. A global road scene analysis system for autonomous vehicles. *Proceedings of the 2nd IFAC Conference on Intelligent Autonomous Vehicles*. IAV'95. Helsinki, Finland. pp. 19–24.
- Jurie, F., Rives, P., Gallice, J. and Brame, J.: 1992. A vision based control approach to high speed automatic vehicle guidance. *Proceedings of the IARP Workshop on Machine Vision Applications*. MVA'92. Tokyo, Japan. pp. 329–333.
- Jurie, F., Rives, P., Gallice, J. and Brame, J.: 1993. High speed automatic vehicle guidance based on vision. *Proceedings of the Intelligent Autonomous Vehicle*. IAV'93. Southampton, United Kingdom. pp. 205–210.
- Jurie, F., Rives, P., Gallice, J. and J.L.Brame 1994. High-speed vehicle guidance based on vision. *Control Engineering Practice* **2**(2), 287–297.
- Kehtarnavaz, N., Grisworld, N. and Lee, J. 1991. Visual control for an autonomous vehicle (BART)-the vehicle following problem. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **40**(3), 654–662.
- Kelly, A.: 1994. A partial analysis of the high speed autonomous navigation problem. *Technical report*. The Robotics Institute of Carnegie Mellon University.
- Khadraoui, D.: 1996. *La Commande Référencée Vision pour le Guidage de Véhicules*. PhD thesis. Université Blaise-Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Khadraoui, D., Debain, C., Martinet, P., Gallice, J. and Berducat, M.: 1995a. Vision based control law for agricultural machines. *Proceedings of the Fourth Workshop on Robotics in Agriculture & the Food-Industry*. International Advanced Robotics Programme, Toulouse-France. pp. 109–116.
- Khadraoui, D., Debain, C., Rouveure, R., Martinet, P., Bonton, P. and Gallice, J. 1998. Vision based control in driving assistance of agricultural vehicles. *International Journal of Robotics Research* **17**(10), 1040–1054.
- Khadraoui, D., Martinet, P. and Gallice, J.: 1995b. Linear control of high speed vehicle in image space. *Proceedings of the Second International Conference on Industrial Automation*. Vol. 2. IAIA'95. Nancy , France. pp. 517–522.
- Khadraoui, D., Motyl, G., Martinet, P., Gallice, J. and Chaumette, F.: 1995c. Visual servoing in robotics scheme using a camera/laser-stripe sensor. *Technical Report 898*. Rapport interne de Recherche IRISA.

- Khadraoui, D., Motyl, G., Martinet, P., Gallice, J. and Chaumette, F. 1996. Visual servoing in robotics scheme using a camera/laser-stripe sensor. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **12**(5), 743–750.
- Kimura, H. 1984. Robust stabilizability for a class of transfer functions. *IEEE Transactions on Automatic Control* **AC-29**(9), 788–793.
- Kimura, H.: 1997. *Chain Scattering approach to H^∞ Control*. ISBN 0-8176-3787-7. Birkhauser Publishers.
- Koivo, A. J. and Houshangi, N. 1991. Real time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* **21**(1), 134–142.
- Koller, D., Luong, Q. T. and Malik, J.: 1994. Using binocular stereopsis for vision-based vehicle control. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*. Paris - France. pp. 237–242.
- Kosecka, J., Blasi, R., Taylor, C. J. and Malik, J.: 1997. Vision based lateral control of vehicles. *Proceedings of the IFAC/IFORS Symposium on Transportation Systems*. STS'97. Boston, USA.
- Kumar, R. and Hanson, A. R. 1994. Robust methods for estimating pose and a sensitivity analysis. *CVGIP: Image Understanding, Academic Press Inc.* **60**(3), 313–342.
- Lefebvre, M., Gil, S., Baur, C., Dessimoz, J. D. and Pun, T. 1993. The potato operation: Computer vision for agricultural robotics and quality control. *Computers and Electronics in Agriculture (ELSEVIER)* **9**, 85–102.
- Lowe, D. G. 1991. Fitting parametrized three dimensional models to images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(5), 441–450.
- Lu, C., Hager, G. and Mjolsness, E. 1998. Fast and globally convergent pose estimation from video images. *submitted to IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Malis, E., Chaumette, F. and Boudet, S.: 1997. Positioning a coarse-calibrated camera with respect to an unknown planar object by 2D 1/2 visual servoing. *Proceedings of the Fifth Symposium on Robot Control*. Vol. 2. SYROCO'97. Nantes - France. pp. 517–523.
- Malis, E., Chaumette, F. and Boudet, S.: 1998. 2D 1/2 visual servoing. *Technical Report 1166*. Rapport interne de Recherche IRISA.
- Marchand, E.: 1996. *Stratégies de perception par vision active pour la reconstruction et l'exploration de scène statique*. PhD thesis. IRISA/INRIA-Rennes. Rennes, France.
- Marchand, E., Chaumette, F. and Rizzo, A.: 1996. Using the task function approach to avoid joint limits and kinematics singularities in visual servoing. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 3. IROS'96. Osaka, Japan. pp. 1083–1090.

- Marmoiton, F., Collange, F., Martinet, P. and Derutin, J. P.: 1998. A real time car tracker. *Proceedings of the International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety*. AVCS'98. Amiens , France. pp. 282–287.
- Martinet, P. and Gallice, J.: 1999. Position based visual servoing using a nonlinear approach. *submitted to IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ICRA'99. Detroit, Michigan, USA.
- Martinet, P. and Gallice, J. 2000. Robot control using monocular pose estimation. *en préparation pour IEEE Transactions on Robotics and Automation*.
- Martinet, P. and Thibaud, C. 2000. Automatic guided vehicles: Robust controller design in image space. *Autonomous Robots* **8**, 25–42.
- Martinet, P., Berry, F. and Gallice, J.: 1996a. Use of first derivative of geometric features in visual servoing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 4. ICRA'96. Minneapolis, Minnesota, USA. pp. 3413– 3419.
- Martinet, P., Bonton, P., Gallice, J., Berducat, M., Debain, C. and Rouveure, R.: 1998a. Automatic guided vehicles in agricultural and green space fields. *Proceedings of the 4th French - Israeli Symposium on Robotics*. FIR'98. Besançon, France. pp. 87–92.
- Martinet, P., Daucher, N., Gallice, J. and Dhome, M.: 1997a. Robot control using monocular pose estimation. *Proceedings of the Workshop on New trends in Image-Based Robot Servoing*. IROS'97. Grenoble - France. pp. 1–12.
- Martinet, P., Gallice, J. and Khadraoui, D.: 1996b. Vision based control law using 3d visual features. *Proceedings of the Second World Automation Congress*. Vol. 3. ISRAM'96. Montpellier, France. pp. 497–502.
- Martinet, P., Khadraoui, D., Thibaud, C. and Gallice, J.: 1997b. Controller synthesis applied to automatic guided vehicle. *Proceedings of the Fifth Symposium on Robot Control*. Vol. 3. SYROCO'97. Nantes , France. pp. 735–742.
- Martinet, P., Rives, P., Fickinger, P. and Borrelly, J.: 1991. Parallel architecture for visual servoing applications. *Proceedings of the Workshop on Computer Architecture for Machine Perception*. Paris, France. pp. 407–418.
- Martinet, P., Thibaud, C., Khadraoui, D. and Gallice, J.: 1998b. First results using robust controller synthesis in automatic guided vehicles applications. *Proceedings of the Third IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. Vol. 1. Madrid , Spain. pp. 204–209.
- Martinet, P., Thibaud, C., Thuilot, B. and Gallice, J.: 1998c. Robust controller synthesis in automatic guided vehicles applications. *Proceedings of the International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety*. AVCS'98. Amiens , France. pp. 395–401.

- Maru, N., Kase, H., Yamada, S., Nishikawa, A. and Miyazaki, F.: 1993. Manipulator control by visual servoing with stereo vision. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IROS'93. Yokohama, Japan. pp. 1866–1870.
- McLauchlan, P. H. and Malik, J.: 1997. Vision for longitudinal vehicle control. *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. BMVC'97. UK.
- Mezouar, Y.: 1998. Comparaison de lois de commande 2d et 3d. *Technical Report Rapport de DEA*. Université Blaise Pascal.
- Michel, H. and Rives, P.: 1993. Singularities in the determination of the situation of a robot effector from the perspective view of 3 points. *Technical Report 1850*. Rapport interne de Recherche INRIA.
- Montagne, E.: 1996. *Suivi d'amers visuels dans une séquence d'images routières*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand.
- Montagne, E., Alizon, J., Martinet, P. and Gallice, J.: 1994. Real time 3d location of a car from three characteristic points observed in a video image sequence. *Proceedings of the 7th IFAC/IFORS Symposium on Transportation Systems*. STS'94. Tianjin, China. pp. 385–390.
- Motyl, G.: 1992. *Couplage d'une caméra et d'un faisceau laser en commande référencée vision*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand.
- Motyl, G., Chaumette, F. and Gallice, J.: 1992. A camera and laser stripe in sensor based control. *Proceedings of the Second International Symposium on Measurement and Control in Robotics*. AIST Tsukuba Research Center. Japan. pp. 685–692.
- Motyl, G., Martinet, F. and Gallice, J.: 1993. Visual servoing with respect to a target sphere using a camera/laser-stripe sensor. *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*. ICAR'93. Tokyo, Japan. pp. 591–596.
- Murray, R. and Sastry, S. 1993. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids. *IEEE Transactions on Automatic Control* **38**(5), 700–716.
- Nishizawa, T., Ohya, A., Yuta, S. and Takigawa, T.: 1996. A development of autonomous tractor for agricultural field - positioning system and its experiment. *Proceedings of the Second World Automation Congress*. Vol. 3. ISRAM'96. Montpellier, France. pp. 595–602.
- Nobutaka, I.: 1990. Agricultural robots applications in japan. *Proceedings of the IARP Workshop on Robotics in Agriculture and Food Industry*. Avignon - France. pp. 35–44.
- Oberkampff, D., DeMenthon, D. and Davis, L. S. 1996. Iterative pose estimation using coplanar feature points. *Computer Vision and Image Understanding, CVIU, Academic Press INC.* **63**(3), 495–511.

- Ollis, M. and Stentz, A.: 1996. First results in vision based crop line tracking. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1. Minneapolis, Minnesota, USA. pp. 951–956.
- Ollis, M. and Stentz, A.: 1997. Vision based perception for an automated harvester. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 2. IROS'97. Grenoble, France. pp. 1838–1844.
- Oustaloup, A.: 1996. *La commande CRONE*. Masson, ISBN 0-8176-3787-7.
- Papanikolopoulos, N. and Khosla, P. 1993. Adaptative robotic visual tracking: theory and experiments. *IEEE Transactions on Automatic Control* **38**(3), 429–445.
- Papanikolopoulos, N., Khosla, P. and Kanade, T.: 1991. Vision and control techniques for robotic visual tracking. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1. Sacramento - USA. pp. 857–864.
- Papanikolopoulos, N., Khosla, P. and Kanade, T. 1993. Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: a combination of control and vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **9**(1), 14–35.
- Papanikolopoulos, N., Nelson, B. and Khosla, P. 1995. Six degree-of-freedom hand-eye visual tracking with uncertain parameters. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **11**(5), 725–732.
- PATH: 1997. California path - 1997 annual report. *Technical report*. PATH.
- Pavlidis, I. and Papanikolopoulos, N.: 1996. Automatic selection of control points for deformable model based target tracking. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. number 4. Minneapolis, Minnesota, USA. pp. 2915–2920.
- Peng, H., Hessburg, T. and Tomizuka, M.: 1992. A theoretical and experimental study on vehicle lateral control. *Proceedings of the 11th American Control Conference*. pp. 1738–1742.
- Phong, T. Q., Horaud, R., Yassine, A. and Pham, D. T. 1995. Object pose from 2d and 3d point and line correspondences. *International Journal of Computer Vision, Kluwer Academic Publishers* **15**(3), 225–243.
- Pissard-Gibollet, R.: 1993. *Conception et Commande par Asservissement Visuel d'un robot Mobile*. PhD thesis. Ecole des Mines de Paris. Sophia-Antipolis.
- Pomet, J. P. and Samson, C.: 1993. Time-varying exponential stabilization of nonholonomic systems in power form. *Technical Report 2126*. Institut National de Recherche en Informatique et Automatique.

- Questa, P., Grossmann, E. and Sandini, G.: 1995. Camera self orientation and docking maneuver using normal flow. *Proceedings of The SPIE. AeroSense'95*. Orlando, Florida, USA.
- Remy, S.: 1998. *Etalonnage d'un système de vision embarqué*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand.
- Rives, P., Borrelly, J., Gallice, J. and Martinet, P.: 1993. A versatile parallel architecture for visual servoing applications. *Proceedings of the Workshop on Computer Architecture for Machine Perception*. News Orleans, USA. pp. 400–409.
- Rives, P., Pissard-Gibollet, R. and Pelletier, L.: 1996. Sensor based tasks: from the specification to the control aspects. *Proceedings of the Second World Automation Congress*. ISRAM'96. Montpellier, France.
- Rothwell, C., Zisserman, A., Marinos, C. I., Forsyth, D. and Mundy, J. L. 1992. Relative motion and pose from arbitrary plane curves. *Image and Vision Computing, Elsevier Science* **10**(4), 250–262.
- Salganicoff, M., Metta, G., Oddera, A. and Sandini, G.: 1993. A direct approach to vision guided manipulation. *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*. ICAR'93. Tokyo, Japan. pp. 133–138.
- Samson, C.: 1991. Stabilisation par retour d'état instationnaire de robots mobiles non-holonomes de type voiture. *Rapport interne 1515*. INRIA.
- Samson, C.: 1993. Commande de véhicules non-holonomes pour le suivi de trajectoire et la stabilisation à une posture désirée. *Proceedings of the colloque : Automatique pour les véhicules terrestres*. Amiens-France. pp. 7–35.
- Samson, C. 1995. Control of chained systems - application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **40**(1), 64–77.
- Samson, C. and Abderrahim, K. A.: 1991. Feedback control of a nonholonomic wheeled cart in cartesian space. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ICRA'91. Sacramento, California.
- Samson, C. and Ait-Abderrahim, K.: 1990. Mobile robot control part 1 : feedback control of nonholonomic wheeled cart in cartesian space. *Technical Report 1288*. Rapport de Recherche INRIA.
- Samson, C., Le Borgne, M. and Espiau, B.: 1991. *Robot Control. The task function approach*. ISBN 0-19-8538057. Clarendon Press, Oxford.
- Sanderson, A. and Weiss, L. E.: 1980. Image based visual servo control using relational graph error signal. *Proceedings of the International Conference on Cybernetics Graph Error Signal*. M.A, IEEE SMC. Cambridge. pp. 1074–1077.

- Sanderson, A. C. and Weiss, L. E.: 1983. *Robot Vision*. I.F.S. Publications Ltd.
- Sandini, G., Buemi, F., Massa, M. and Zucchini: 1990. Visually guided operations in green houses. *Proceedings of the Workshop on Robotics in Agriculture and the Food Industry*. 1st IARP, Avignon-France. pp. 69–84.
- Sevila, F., Clavel, N., Zapata, R. and Dubreuil, E. 1994. Perception, navigation et pilotage de machines mobiles en environnement rural. *Revue d'Automatique et de Productique Appliqués*.
- Shakunaga, T. and Kaneko, H.: 1986. Perspective angle transform and its application to 3d configuration recovery. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 594–601.
- Shirai, Y. and Inoue, H. 1973. Guiding a robot by visual feedback in assembly tasks. *IEEE Transactions on Pattern Recognition* **5**, 99–108.
- Sordalen, O. and de Wit, C. C.: 1993. Exponential control law for a mobile robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. Nice, France. pp. 2158–2163.
- Suh, I. H.: 1993. *Visual servoing of robot manipulators by fuzzy membership function based neural networks*. Vol. 7 of *Robotics and Automated Systems*, ISBN 981-02-1364-6. World Scientific Publishing Co.. pp. 285–315.
- Sullivan, M. and Papanikolopoulos, N.: 1996. Using active deformable models to track deformable objects in robotic visual servoing experiments. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 4. ICRA'96. Minneapolis, Minnesota, USA. pp. 2929–2934.
- Sundareswaran, V., Bouthemy, P. and Chaumette, F.: 1994. Visual servoing using dynamic image parameters. *Technical Report 854*. Rapport interne de Recherche IRISA.
- Sundareswaran, V., Bouthemy, P. and Chaumette, F. 1996. Exploiting image motion for active vision in a visual servoing framework. *International Journal of Robotics Research* **15**(6), 629–645.
- Swain, R. and Devy, M.: 1997. Visually-guided navigation of a mobile robot in a structured environment. *Proceedings of the 5th International Symposium on Intelligent Robotic Systems*. Stockholm, Sweden. pp. 143–152.
- Tarek, H.: 1996. *Sur la robustesse et la précision du contrôle des déplacements de robots mobiles à roues*. PhD thesis. Université de Technologie de Compiègne. Compiègne.
- Thorpe, C.: 1990. *Vision and navigation*, *The Carnegie Mellon Navlab*. Academic publishers.
- Thorpe, C., Hebert, M., Kanade, T. and Shafer, S. 1988. Vision and navigation for the Carnegie Mellon Navlab. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **10**(3), 362–373.

- Thuilot, B.: 1995. *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles à roues*. PhD thesis. Ecoles des Mines de Paris. Paris, France.
- Tsai, R. Y. 1985. Moment perserving thresholding: a new approach. *Computer Vision, Graphics and Image Processing, CVGIP, Academic Press INC.* **29**, 377–393.
- Tsai, R. Y. 1987. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **RA-3**(4), 323–344.
- Tsakiris, D. P., Rives, P. and Samson, C.: 1997. Applying visual servoing techniques to control nonholonomic mobile robot. *Proceedings of the Workshop on New trends in Image-Based Robot Servoing*. IROS'97. Grenoble - France. pp. 21–32.
- Urban, J. P.: 1990. *Une approche de type asservissement visuel appliquée à la robotique*. PhD thesis. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Urban, J. P., Motyl, G. and Gallice, J.: 1990. A visual servoing approach applied to robotics tasks. *Proceedings of the IAPR Workshop on Machine Vision Applications*. MVA'90. Tokyo - Japan. pp. 351–355.
- Urban, J. P., Motyl, G. and Gallice, J. 1994. Real-time visual servoing using controlled illumination. *International Journal of Robotics Research* **13**(3), 93–100.
- Wang, J. and Wilson, W. J.: 1992. 3d relative position and orientation estimation using kalman filter for robot control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. Nice - France. pp. 2638–2645.
- Waxman, A. M., LeMoigne, J., Davis, L. S., Srinivasan, B., Kushner, T. R., Liang, E. and Siddalingaiah, T. 1987. A visual navigation system for autonomous land vehicles. *IEEE transactions on Robotics and Automation* **3**(2), 124–141.
- Weiss, L. E.: 1984. Dynamic visual servo control of robots. An image based approach. *Technical Report CMU-RI-TR-84-16*. Carnegie Mellon University, The Robotics Institute.
- Weiss, L. E., Sanderson, A. C. and Neuman, C. P. 1987. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation* **RA-3**(5), 404–417.
- Wilson, W. J.: 1993a. Visual servo control of robots using kalman filter estimates of relative pose. *Proceedings of the 12th IFAC World Congress*. Vol. 9. Sydney - Australia. pp. 399–404.
- Wilson, W. J.: 1993b. *Visual servo control of robots using Kalman filter estimates of relative pose*. Vol. 7 of *Robotics and Automated Systems*, ISBN 981-02-1364-6. World Scientific Publishing Co.. pp. 71–104.

- Wilson, W. J., Williams Hulls, C. C. and Bell, G. S. 1996. Relative end-effector control using cartesian position based visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **12**(5), 684–696.
- Youla, D. and Saito, M. 1967. Interpolation with positive-real functions. *J. Franklin Inst.* **284**(2), 77–108.
- Zames, G. and Francis, B. R. 1983. Feedback, minimax sensitivity, and optimal robustness. *IEEE Transactions on Automatic Control* **AC-28**(5), 585–601.