

Asservissement visuel en vision omnidirectionnelle à partir de droites*

Visual Servoing from straight lines

**H. Hadj Abdelkader¹, Y. Mezouar¹, P. Martinet¹,
F. Chaumette²**

¹LASMEA, 24 avenue des Landais, 63177 Aubière-France
hadj,mezouar,martinet@lasmea.univ-bpclermont.fr

²IRISA/INRIA, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes-France
chaumette@irisa.fr

Manuscrit reçu le 24 janvier 2005

Résumé et mots clés

Dans cet article, nous présentons une stratégie de commande de systèmes robotiques en utilisant comme entrées d'une boucle d'asservissement visuel des primitives relatives à la projection de droites dans le plan image d'une caméra panoramique à point central unique. Afin de réaliser la commande d'un système robotique par asservissement visuel, il est nécessaire d'estimer la matrice d'interaction liant les mouvements de la caméra aux mouvements des primitives visuelles dans l'image. Dans cet article, nous dérivons la forme analytique de la matrice d'interaction générique relative à la projection de droites à partir d'un modèle de projection englobant la classe entière des caméras à point central unique. Elle est ensuite utilisée dans un schéma d'asservissement visuel. Des simulations ainsi que des résultats expérimentaux sur un robot mobile valident l'approche proposée.

Vision omnidirectionnelle, point central unique, asservissement visuel, droites.

Abstract and key words

In this paper we consider the problem of controlling a robotic system by using the projection of 3D straight lines in the image plane of central catadioptric systems. Most of the effort in visual servoing are devoted to points, only few works have investigated the use of lines in visual servoing with traditional cameras and none has explored the case of omnidirectional cameras. First a generic central catadioptric interaction matrix for the projection of 3D straight lines is derived from the projection model of an entire class of camera. Then an image-based control law is designed and validated through simulation results and real experiments with a mobile robot.

Omnidirectional camera, single view point, visual servoing, straight lines.

Remerciements

Ces travaux ont été financés en partie par le projet OMNIBOT de ROBEA: « Robotique mobile et Entités Artificielles ».

Nous remercions particulièrement Éric Marchand de l'IRISA/INRIA à Rennes pour nous avoir fourni l'algorithme de suivi de cercle dans les images omnidirectionnelles.

* Des résultats préliminaires ont été publiés dans les actes de IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2004, Sendai, Japon, Septembre 2004.

Introduction

La volonté des chercheurs de reproduire les capacités humaines de perception et d'action dans les systèmes robotisés a conduit à l'intégration de données issues de capteurs extéroceptifs, et plus particulièrement de celles issues d'une caméra [15]. L'objectif affiché est que les capteurs visuels fournissent une information suffisamment riche pour permettre aux robots de réaliser, de manière autonome, des tâches dans des environnements partiellement connus, ou complètement inconnus. D'un point de vue méthodologique, l'asservissement visuel consiste à intégrer directement dans la boucle de commande des robots, des informations extraites des images fournies par des caméras afin de réaliser l'action souhaitée. En pratique, cela permet un élargissement important du domaine d'application de la robotique, et une amélioration considérable de la précision obtenue.

Les approches classiques sont basées sur la régulation à zéro de l'erreur entre les valeurs courante et désirée d'informations visuelles sélectionnées, soit dans l'image (2-D) [8], soit dans l'espace 3-D [24]. Des informations de type 3-D et 2-D peuvent également être combinées pour construire le signal d'erreur. Cette dernière approche, est appelée asservissement visuel hybride ou asservissement visuel 2D1/2 [18]. Dans ces trois schémas, on suppose qu'il existe un lien entre les images initiale, courante et désirée. En effet, ils requièrent la mise en correspondance de primitives visuelles extraites de l'image initiale avec celles extraites de l'image désirée. Ces primitives sont ensuite suivies lors du mouvement de la caméra (et/ou de l'objet). Si une de ces étapes échoue, la tâche robotique ne pourra pas être réalisée [9]. Par exemple, si il est impossible d'extraire des primitives visuelles communes aux images initiale et désirée ou si les primitives visuelles sortent du champ de vision durant le mouvement de la caméra (et/ou de l'objet) alors la tâche ne pourra pas être réalisée. Quelques travaux se sont intéressés à ces problèmes. Les méthodes proposées sont basées sur des techniques de planification de trajectoires [21], de commande réactive [12], [10], d'ajustement du zoom [23] ou de considérations géométriques et topologiques [11], [27]. Cependant, de telles stratégies sont quelquefois difficiles à mettre en œuvre.

Une autre solution à ces problèmes consiste à accroître le champ de vision du capteur [5]. En effet, les caméras conventionnelles souffrent de leur champ de vue restreint. De nombreuses applications dans le domaine de la vision robotique, comme la localisation de robot mobile [6], [20], et la navigation [29], peuvent bénéficier d'une vue panoramique de l'environnement fournie par une caméra omnidirectionnelle.

Plusieurs stratégies ont été proposées afin d'accroître le champ de vision des capteurs de vision [5]. Une solution efficace consiste à combiner des miroirs à un système de capture d'images classique (système catadioptrique). Afin de simplifier les traitements (d'un point de vue théorique et pratique), il est souhaitable que ces systèmes soient à point central unique, c'est-

à-dire que les droites liant un point de l'espace et sa projection sur le miroir passent toutes par un point unique appelé point central de projection. Sous cette contrainte, chaque pixel sur le plan image mesure la luminance du rayon qui passe par le point central dans une direction particulière et connue. De tels capteurs sont appelés **systèmes catadioptriques centraux**. Baker et Nayar dans [2] ont déterminé la classe de tous les systèmes catadioptriques centraux. Dans [2], il est montré qu'il existe deux types de combinaison miroir-lentille permettant la mise au point d'un système catadioptrique central tout en augmentant le champ de vision : caméra orthographique-miroir parabolique et caméra perspective-miroir hyperbolique. Nous étudierons, dans cet article, le cas où le capteur de vision est à centre unique.

Il est clair que les techniques d'asservissement visuel peuvent également bénéficier du champ de vue important fournie par de tels capteurs afin de lever la contrainte de visibilité. La commande par retour visuel de robots manipulateurs, de robot mobile ou de formation de robots mobiles a donc naturellement été étudiée (se référer par exemple à [4], [7], [22], [28]).

La matrice d'interaction joue un rôle central pour la synthèse des lois de commande. Elle lie les mouvements de la caméra aux variations des primitives visuelles dans l'image catadioptrique. F. Chaumette dans [8] a proposé une méthode générale pour le calcul de la matrice d'interaction pour toute information visuelle définissable à partir de primitives géométriques paramétrables pour une caméra réalisant une projection perspective. La forme analytique de la matrice d'interaction a récemment été obtenue pour des primitives de type point dans le cas où le capteur de vision est un système catadioptrique central [4]. Cet article considère plus particulièrement l'utilisation de primitives visuelles extraites de la projection de droites dans une boucle de commande. En effet, lorsque des environnements intérieurs, urbains ou industriels sont considérés, le choix des droites comme primitive visuelle est naturel. Une grande majorité des travaux en asservissement visuel portent sur l'utilisation de coordonnées de points pour générer le signal d'erreur à réguler [15]. Très peu de travaux traitent le cas de la projection de droite (voir par exemple [1], [13], [16], [17]) et aucun ne décrit leur utilisation dans une boucle de commande lorsque le capteur utilisé est une caméra omnidirectionnelle. Dans cet article, nous traitons ce dernier problème. Nous donnons la forme générique de la matrice d'interaction pour la projection de droites dans l'image de toute caméra à point central unique. Cette matrice d'interaction est ensuite exploitée pour construire des lois de commande pour des tâches de positionnement d'un robot manipulateur à six degrés de liberté ou pour des tâches de suivi de droite pour un robot mobile.

Cet article est organisé de la manière suivante : dans la partie 1, après la description du modèle utilisé pour les capteurs de vision à centre unique, nous étudions la projection de droites sur le plan image. Cela est réalisé en utilisant le modèle générique proposé dans [14]. Dans la partie 2, nous présentons la loi de commande qui sera utilisée pour le contrôle des mouvements du robot. Nous dérivons ensuite la forme analytique de la matrice

d'interaction pour la projection de droites du modèle de projection générique, à savoir des coniques. L'exemple d'une caméra omnidirectionnelle combinant un miroir parabolique et une caméra orthographique est présenté. Les résultats de simulation et expérimentaux sont présentés dans les parties 3 et 4.

1. Modélisation

Nous présentons dans cette partie la modélisation d'une caméra à point central unique. Nous étudions ensuite le cas de la projection d'une droite dans l'image.

1.1. Modèle de projection

Comme évoqué précédemment, un centre de projection unique est une propriété intéressante pour un capteur de vision. Cela implique que les droites liant un point 3D de l'espace et sa projection sur le miroir passent par un point 3D unique appelé point central de projection. Les caméras perspectives conventionnelles sont des capteurs à centre unique. Baker *et al.* montrent dans [2] qu'un système catadioptrique peut être obtenu en combinant un miroir hyperbolique, elliptique ou plan avec une caméra perspective et un miroir parabolique avec une caméra orthographique. Afin de simplifier les notations, les caméras perspectives classiques seront incluses dans l'ensemble des caméras catadioptriques à point central unique. Geyer *et al.* dans [14] proposent un modèle unifié de projection pour les caméras panoramiques à point central unique. D'après ce modèle, toutes les caméras à point central unique peuvent être modélisées par une première projection centrale sur une sphère suivie d'une seconde projection perspective sur le plan image (voir Figure 1). Ce modèle générique peut être paramétrisé par un couple de réels (ξ, φ) (voir Tab.1 et se référer à [3]). Soit \mathcal{F}_c et \mathcal{F}_m des repères attachés à la caméra conventionnelle et au miroir respectivement. Dans la suite, on supposera que \mathcal{F}_c et \mathcal{F}_m sont liés par une translation le long de l'axe Z .

Les centres C et M de \mathcal{F}_c et \mathcal{F}_m seront appelés centre optique et point principal respectivement. Soit \mathcal{X} un point 3D de coordonnées $\mathbf{X} = (X \ Y \ Z)$ dans \mathcal{F}_m . D'après le modèle générique de projection proposé dans [14], \mathcal{X} est projeté dans le plan image en un point $\mathbf{x} = (x \ y \ 1)$ avec :

$$\mathbf{x} = \mathbf{K}\mathbf{m}\mathbf{f}(\mathbf{X}) \quad (1)$$

où \mathbf{K} est une matrice triangulaire supérieure contenant les paramètres de calibrage interne de la caméra conventionnelle, et :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \varphi - \xi & 0 & 0 \\ 0 & \varphi - \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} X \\ Z + \xi\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ Y \\ Z + \xi\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Tableau 1. Description des caméras à point central unique : a_p, a_h, b_h, a_e, b_e dépendent uniquement des paramètres intrinsèques du miroir d et p .

Caméra	Surface du miroir	ξ	φ
Parabolique	$z = \frac{x^2+y^2}{2a_p} - \frac{a_p}{2}$	1	$1 + 2p$
Hyperbolique	$\frac{(z+\frac{d}{2})^2}{a_h^2} - \frac{x^2+y^2}{b_h^2} = 1$	$\frac{d}{\sqrt{d^2+4p^2}}$	$\frac{d+2p}{\sqrt{d^2+4p^2}}$
Elliptique	$\frac{(z+\frac{d}{2})^2}{a_e^2} + \frac{x^2+y^2}{b_e^2} = 1$	$\frac{d}{\sqrt{d^2+4p^2}}$	$\frac{d-2p}{\sqrt{d^2+4p^2}}$
Plan	$z = \frac{d}{2}$	0	1
Conventionnelle	aucun	0	1

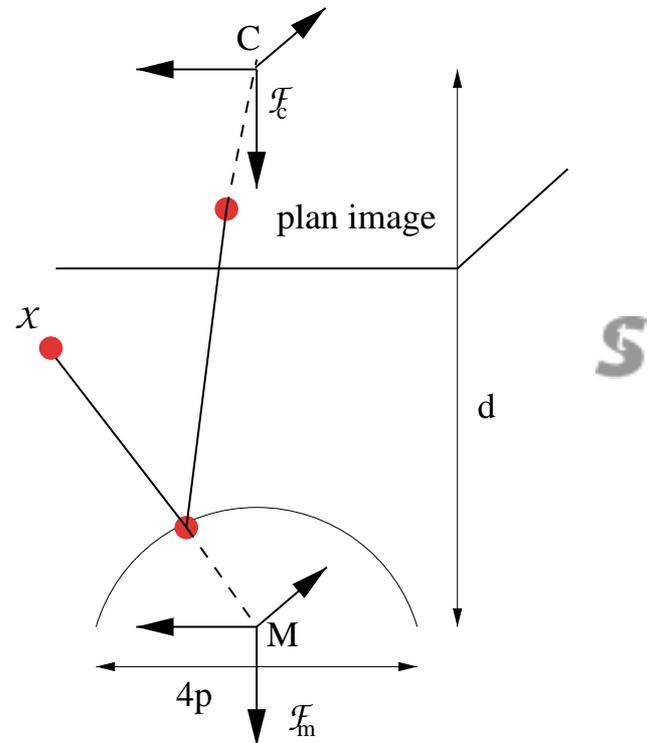


Figure 1. Modèle générique de caméra.

Dans la suite, nous supposons sans perte de généralité, que les matrices \mathbf{K} et \mathbf{M} sont les matrices identités (ce qui implique qu'une calibration du capteur, même grossière, a été réalisée). La fonction de projection décrivant une projection par une caméra à point centrale unique est alors donnée par $\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{X})$.

1.2. Projection des droites

Afin de modéliser leur projection dans l'image, nous utiliserons les coordonnées de Plücker d'une droite (voir Figure 2). Soit \mathcal{P} un point 3-D, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ un vecteur exprimé dans le repère attaché au miroir et \mathcal{L} la droite 3-D définie par ce point et ce

vecteur. Définissons $\mathbf{n} = \frac{\overrightarrow{M\mathcal{P}} \times \mathbf{u}}{\|\overrightarrow{M\mathcal{P}} \times \mathbf{u}\|} = (n_x, n_y, n_z)$ et notons que ce vecteur est indépendant du point \mathcal{P} choisi sur la droite. Alors les coordonnées de Plücker de la droite sont définies par : $\mathcal{L} : (\mathbf{n}, \mathbf{u})$ avec $\|\mathbf{n}\| = 1$ et $\mathbf{n}^T \mathbf{u} = 0$. Le vecteur \mathbf{n} est orthogonal au plan d'interprétation Π défini par la droite 3-D et le point principal de projection :

$$\mathbf{X} = (X, Y, Z) \in \Pi \iff n_x X + n_y Y + n_z Z = 0 \quad (2)$$

Soit \mathcal{S} l'intersection du plan d'interprétation avec la surface du miroir. \mathcal{S} représente la projection de la droite sur la surface du miroir. La projection \mathcal{S} de \mathcal{L} dans le plan image est ensuite obtenue par projection perspective ou projection orthographique. On peut montrer (en utilisant (1) et (2) ou en se référant à [3]) que les points 3D appartenant à \mathcal{L} sont projetés en des points dans l'image \mathbf{x} vérifiant :

$$\mathbf{x}^T \Omega \mathbf{x} = 0 \quad (3)$$

avec :

$$\Omega = \begin{pmatrix} \alpha n_x^2 - n_z^\eta \xi^2 & \alpha n_x n_y & \beta n_x n_z^{\eta-1} \\ \alpha n_x n_y & \alpha n_y^2 - n_z^\eta \xi^2 & \beta n_y n_z^{\eta-1} \\ \beta n_x n_z^{\eta-1} & \beta n_y n_z^{\eta-1} & n_z^\eta \end{pmatrix}$$

où $\alpha = 1 - \xi^2$, $\beta = 2\eta - 3$, $\eta = 2$ dans le cas général et $\eta = 1$ pour la combinaison d'un miroir parabolique et d'une caméra orthographique. Une droite de l'espace est donc projetée sur le plan image en une conique. La relation (3) définit une forme quadratique :

$$A_0 x^2 + A_1 y^2 + 2A_2 xy + 2A_3 x + 2A_4 y + A_5 = 0 \quad (4)$$

avec :

$$\begin{aligned} A_0 &= \alpha n_x^2 - n_z^\eta \xi^2 & A_1 &= \alpha n_y^2 - n_z^\eta \xi^2 & A_2 &= \alpha n_x n_y \\ A_3 &= \beta n_x n_z^{\eta-1} & A_4 &= \beta n_y n_z^{\eta-1} & A_5 &= n_z^\eta \end{aligned} \quad (5)$$

On peut noter que l'équation (4) est définie à un facteur multiplicatif près. Afin d'obtenir une représentation sans ambiguïté, l'équation (4) peut être normalisée par A_5 . La forme quadratique (4) s'écrit alors :

$$B_0 x^2 + B_1 y^2 + 2B_2 xy + 2B_3 x + 2B_4 y + 1 = 0 \quad (6)$$

avec $B_i = \frac{A_i}{A_5}$. Les cas où $A_5 = n_z^\eta = 0$ correspondent à des configurations dégénérées pour cette représentation. Dans ces cas, l'axe optique de la caméra appartient au plan d'interprétation. Une droite de l'espace est alors projetée en une droite dans l'image. Dans la suite, nous considérons que $n_z \neq 0$. Notons également que la normale \mathbf{n} au plan d'interprétation peut être calculée à partir de (5) en effet, comme $\|\mathbf{n}\| = 1$, on a :

$$\begin{cases} n_z = \left(\frac{B_3^2 + B_4^2}{\beta^2} + 1 \right)^{-1/2} = B_n \\ n_x = \frac{B_3 B_n}{\beta} \\ n_y = \frac{B_4 B_n}{\beta} \end{cases} \quad (7)$$

De plus, comme $\mathbf{n}^T \mathbf{u} = 0$, u_z peut être réécrit de la façon suivante :

$$u_z = -\frac{B_3 u_x + B_4 u_y}{\beta} = B_u \quad (8)$$

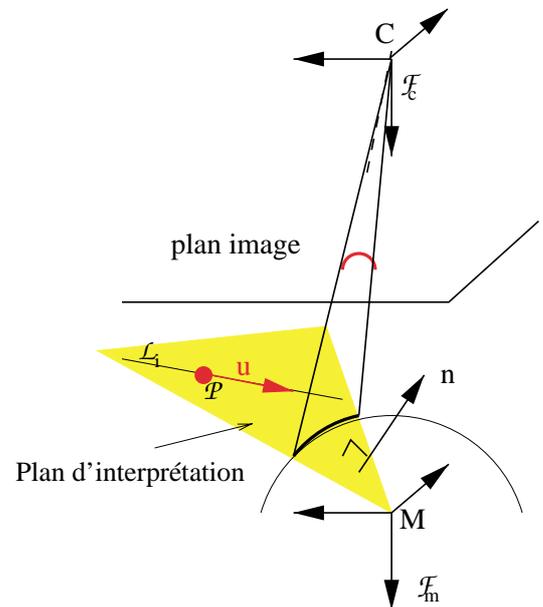


Figure 2. Projection d'une droite en une conique dans le plan image.

2. Matrice d'interaction des caméras à point central unique pour les coniques

2.1. Loi de commande

Considérons le vecteur $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ contenant les observations visuelles \mathbf{s}_i (vecteur de dimension m) utilisées comme entrées du schéma de commande par asservissement visuel. Si

les primitives 3-D correspondant aux informations visuelles sont statiques, la dérivée temporelle de \mathbf{s}_i est :

$$\dot{\mathbf{s}}_i = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{J}_i \mathbf{T}$$

où \mathbf{T} est un vecteur de dimension 6 représentant le torseur cinématique de la caméra, \mathbf{r} représente la pose de la caméra dans un repère qui lui est associé. Le vecteur \mathbf{T} contient la vitesse instantanée de rotation $\boldsymbol{\omega}$ et la vitesse linéaire instantanée \mathbf{v} d'un point 3-D exprimé dans le repère de la caméra. La matrice \mathbf{J}_i de dimension $m \times 6$ est la matrice d'interaction. Elle lie les variations temporelles des informations visuelles au torseur cinématique de la caméra. Si on considère la dérivée temporelle de \mathbf{s} , la matrice d'interaction correspondante est

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_n)$$

et

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J} \mathbf{T}$$

Afin de construire une loi de commande référencée image, nous utilisons le formalisme des fonctions de tâche introduit par Samson *et al.* dans [26]. Considérons la fonction de tâche

$$\mathbf{e} = \widehat{\mathbf{J}}^+(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*)$$

à réguler à zéro (\mathbf{s}^* représente la valeur désirée du vecteur d'observation \mathbf{s} et $\widehat{\mathbf{J}}^+$ est la pseudo-inverse d'un modèle choisi pour \mathbf{J}). Une loi de commande très simple consiste à assurer une décroissance exponentielle découplée de la fonction de tâche :

$$\mathbf{T} = -\lambda \mathbf{e} = -\lambda \widehat{\mathbf{J}}^+(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (9)$$

Afin de calculer la commande (9), il est nécessaire de fournir une approximation de la matrice d'interaction $\widehat{\mathbf{J}}$. Dans la suite, la forme analytique de la matrice d'interaction pour toutes les caméras à point central unique est obtenue à partir du modèle de projection des droites.

2.2. Matrice d'interaction générique

Définissons en premier lieu le vecteur contenant les informations visuelles \mathbf{s}_i pour la projection d'une droite (conique) dans l'image d'une caméra à point central unique :

$$\mathbf{s}_i = (B_0, B_1, B_2, B_3, B_4) \quad (10)$$

et le vecteur contenant les observations visuelles pour n coniques par $\mathbf{s} = (\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_n)$. Comme nous le verrons dans la suite, $\mathbf{s} = (\mathbf{s}_1 \dots \mathbf{s}_n)$ peut être réduit pour certaines caméras à centre de projection unique (par exemple dans le cas de la combinaison miroir parabolique-caméra orthographique). Comme on a :

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{n}_i} \frac{\partial \mathbf{n}_i}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{J}_{sni} \mathbf{J}_{ni} \mathbf{T} \quad (11)$$

on obtient $\mathbf{J}_i = \mathbf{J}_{sni} \mathbf{J}_{ni}$ où $\mathbf{J}_{sni} = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{n}_i}$ et où \mathbf{J}_{ni} est la matrice d'interaction associée au vecteur normal au plan d'interprétation $\mathbf{n}_i = (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$ relatif à la droite \mathcal{L}_i exprimé dans le repère attaché au miroir. Notons que \mathbf{s}_i ne dépend pas explicitement du vecteur \mathbf{u}_i , ce qui implique que $\frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{u}_i} = \mathbf{0}$. \mathbf{J}_{sni} représente l'interaction entre le mouvement des observations visuelles et les variations du vecteur normal, et \mathbf{J}_{ni} lie les variations du vecteur normal aux déplacements de la caméra. D'autre part, on peut montrer que [25, 1] :

$$\dot{\mathbf{n}}_i = \mathbf{J}_{ni} \mathbf{T} = \frac{\mathbf{v}^\top \mathbf{n}_i}{h} (\mathbf{u}_i \times \mathbf{n}_i) - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{n}_i$$

où $h = \|\overrightarrow{MP}\| \times \|\mathbf{u}_i\|$. D'après la relation précédente, l'interaction entre le vecteur normal et le déplacement de la caméra est donc :

$$\mathbf{J}_{ni} = \begin{bmatrix} \frac{1}{h} (\mathbf{u}_i \times \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i^\top & [\mathbf{n}_i]_\times \\ \frac{1}{h} [\mathbf{u}_i]_\times \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^\top & [\mathbf{n}_i]_\times \end{bmatrix} \quad (12)$$

où $[\mathbf{n}]_\times$ représente la matrice antisymétrique associée au vecteur \mathbf{n} . Le Jacobien \mathbf{J}_{sni} est obtenu en calculant la dérivée partielle de (10) par rapport à \mathbf{n}_i et en utilisant (7) :

$$\mathbf{J}_{sni} = \frac{1}{\beta B_n^\eta} \begin{bmatrix} 2\alpha B_3 B_n & 0 & -\frac{\eta\alpha}{\beta} B_3^2 B_n \\ 0 & 2\alpha B_4 B_n & -\frac{\eta\alpha}{\beta} B_4^2 B_n \\ \alpha B_4 B_n & \alpha B_3 B_n & -\frac{\eta\alpha}{\beta} B_3 B_4 B_n \\ \beta^2 B_n^{\eta-1} & 0 & -\beta B_3 B_n^{\eta-1} \\ 0 & \beta^2 B_n^{\eta-1} & -\beta B_4 B_n^{\eta-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

La matrice d'interaction peut finalement être calculée en combinant les équations (12) et (13) dans la relation (11). Notons que le rang de la matrice d'interaction donnée par (11) est de 2. Au moins trois droites sont donc nécessaires pour contrôler les six degrés de liberté d'un robot manipulateur. Comme on peut le voir dans les équations (12) et (7), seuls les paramètres 3D u_x et u_y sont à introduire dans la matrice d'interaction (comme dans tous les cas lorsque des informations visuelles sont utilisées dans un asservissement visuel référencé image). Ces paramètres agissent uniquement sur le contrôle des mouvements de translation. Comme indiqué précédemment, une estimation de la matrice d'interaction est utilisée pour la construction de la loi de commande. Un choix typique est de prendre la valeur de \mathbf{J} à la position désirée. Dans ce cas les paramètres 3-D doivent être estimés uniquement pour la position désirée. Dans la partie suivante, nous étudions le cas particulier des caméras paracata-dioptriques (miroir parabolique combiné à une caméra orthographique).

2.3. Le cas des caméras paracatadioptriques

Dans le cas des caméras paracatadioptriques, nous avons $\xi = 1$, $\beta = -1$, $\alpha = 0$ et $\eta = 1$. Une droite est projetée en un cercle. Il peut être noté que dans ce cas $A_2 = 0$ et $A_0 = A_1 = -A_5$. Le vecteur contenant les observations visuelles peut donc être réduit à $\mathbf{s}_i = (B_3, B_4)$. Notons également qu'une droite est projetée en un cercle de centre :

$$x_c = B_3; y_c = B_4 \quad (14)$$

et de rayon :

$$r = \frac{1}{B_n} = (B_3^2 + B_4^2 + 1)^{1/2} \quad (15)$$

Minimiser la fonction de tâche \mathbf{e} peut donc être interprété comme minimiser la distance entre les positions courante et désirée du centre des cercles en déplaçant la caméra. D'après l'équation (13), le jacobien \mathbf{J}_{sni} peut être réduit comme suit :

$$\mathbf{J}_{sni} = -\frac{1}{B_n} \begin{bmatrix} 1 & 0 & B_3 \\ 0 & 1 & B_4 \end{bmatrix} = -r \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_c \\ 0 & 1 & y_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

D'autre part, on a (se référer aux relations (7)) :

$$\begin{cases} n_z = B_n = \frac{1}{r} \\ n_x = -\frac{B_3}{r} = -\frac{x_c}{r} \\ n_y = -\frac{B_4}{r} = -\frac{y_c}{r} \end{cases} \quad (17)$$

et donc (en utilisant la relation (12)) :

$$\mathbf{J}_{ni} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{ih}\mathbf{N}_i & 0 & -\frac{1}{r} & -\frac{y_c}{r} \\ \frac{1}{r} & 0 & \frac{x_c}{r} & \frac{y_c}{r} \\ \frac{y_c}{r} & -\frac{x_c}{r} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

avec :

$$\mathbf{U}_{ih} = \frac{1}{h} [\mathbf{u}]_{\times}, \quad \mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} \left(\frac{x_c}{r}\right)^2 & \frac{x_c y_c}{r^2} & -\frac{x_c}{r^2} \\ \frac{x_c y_c}{r^2} & \left(\frac{y_c}{r}\right)^2 & -\frac{y_c}{r^2} \\ -\frac{x_c}{r^2} & -\frac{y_c}{r^2} & \left(\frac{1}{r}\right)^2 \end{bmatrix}$$

En combinant les équation (8), (16) et (18), la matrice d'interaction pour une caméra paracatadioptrique est donc :

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \frac{r}{h} x_c u_y & \frac{r}{h} y_c u_y & -\frac{r}{h} u_y & -x_c y_c & 1 + x_c^2 & y_c \\ -\frac{r}{h} x_c u_x & -\frac{r}{h} y_c u_x & \frac{r}{h} u_x & -(1 + y_c^2) & x_c y_c & -x_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Comme dans le cas général, le rang de la matrice d'interaction est 2. Les six degrés de liberté d'un robot manipulateur peuvent être totalement contrôlés en utilisant trois projections de droites tant que ces trois droites définissent trois plans d'interprétation différents.

3. Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présentons des résultats de simulation d'asservissement visuel avec des caméras à point central unique en utilisant la projection de droites. Dans les premières simulations, nous avons considéré deux tâches de positionnement d'un robot manipulateur à six degrés de liberté. La dernière simulation concerne une tâche de suivi de droite pour un robot mobile.

3.1. Tâches de positionnement

La valeur de \mathbf{J} estimée à la position désirée a été utilisée. Deux tâches de positionnement ont été considérées. À partir d'une position initiale, le robot doit rejoindre une position désirée connue sous la forme d'un vecteur d'informations visuelles. La première simulation concerne un capteur de vision combinant un miroir hyperbolique et une caméra perspective (Figures 5, 6 et 4). Dans ce cas, le vecteur d'informations visuel complet est utilisé (se référer à la partie 2.2). La seconde simulation concerne un capteur combinant un miroir parabolique et une caméra orthographique (Figures 7, 8 et 9). La pose initiale de la caméra par rapport au repère \mathcal{F}_m est donnée par $\mathbf{r}_i = (0, 0, 1, 0, 0, 0)$ (les trois premières composantes représentent les translations et sont données en mètre et les trois dernières composantes représentent les rotations et sont données en radian). L'image désirée correspond à l'attitude de la

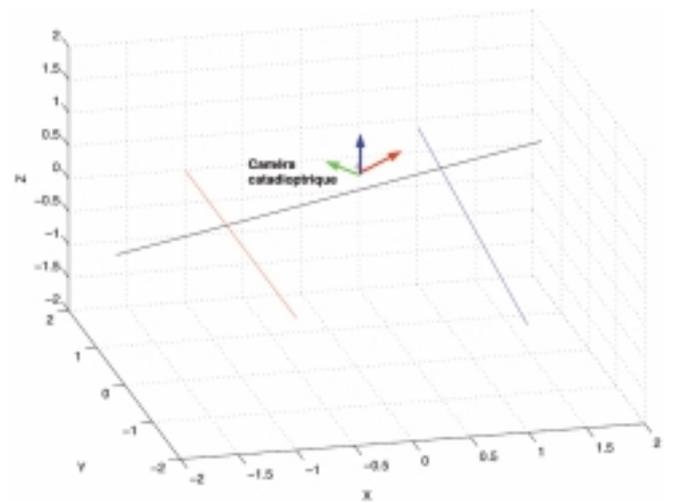


Figure 3. Configuration des droites dans l'espace [mètres].

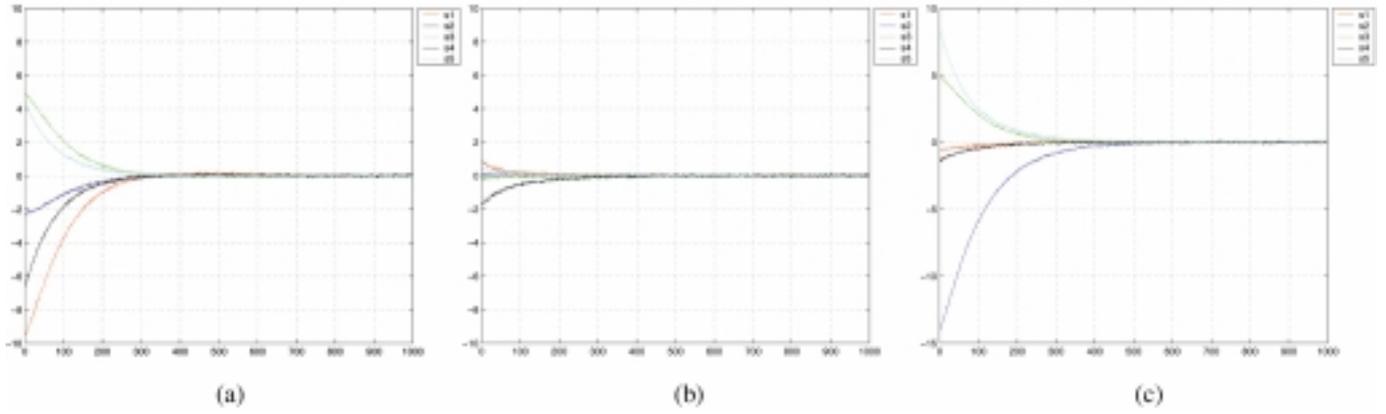


Figure 4. Miroir hyperbolique – caméra perspective : $\mathbf{s} - \mathbf{s}^*$: (a) Erreurs sur la première conique, (b) Erreurs sur la seconde conique, (c) Erreurs sur la troisième conique.

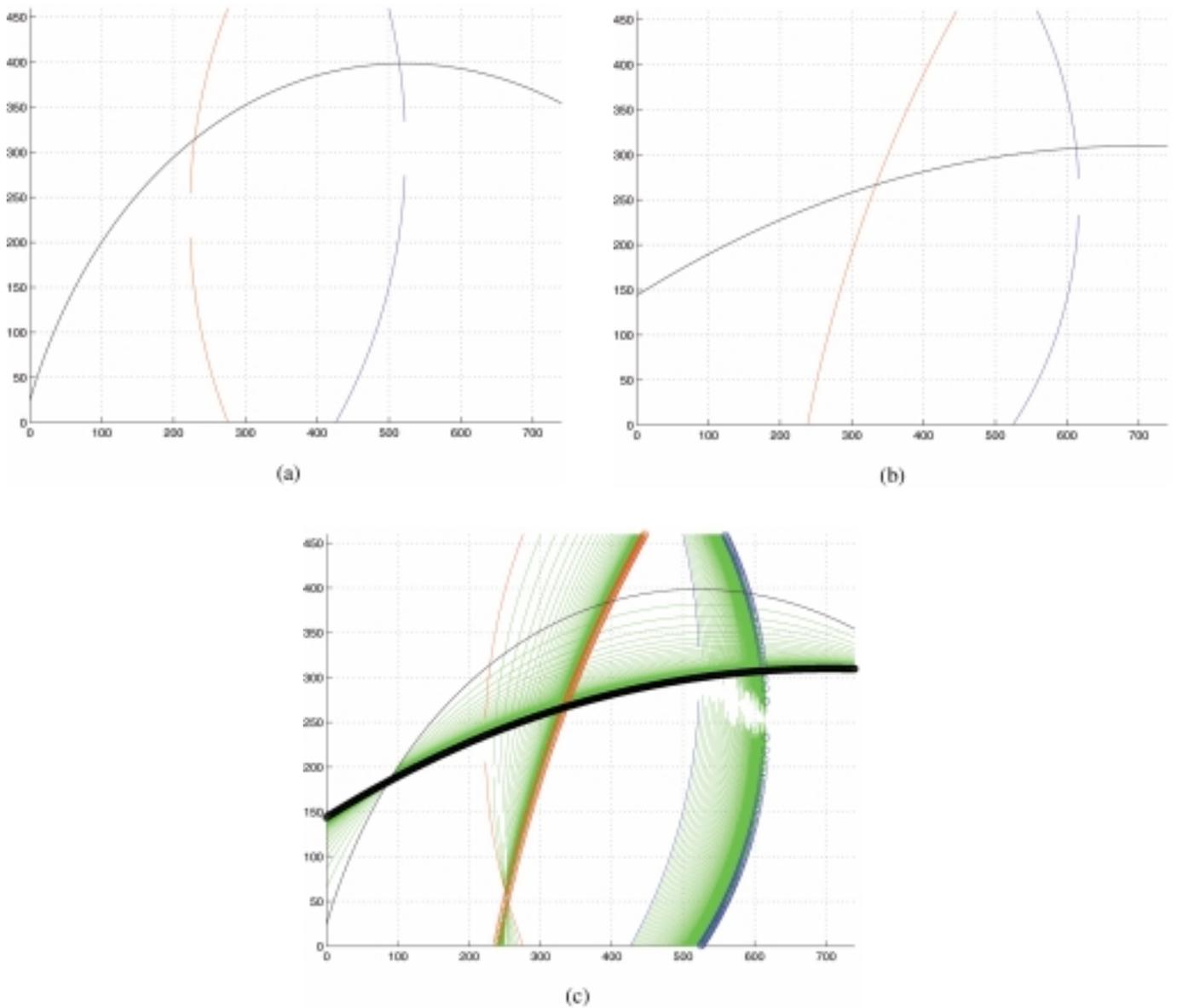


Figure 5. Miroir hyperbolique – caméra perspective : (a) image initiale, (b) image désirée, (c) trajectoires de la projection des droites dans le plan image [pixels].

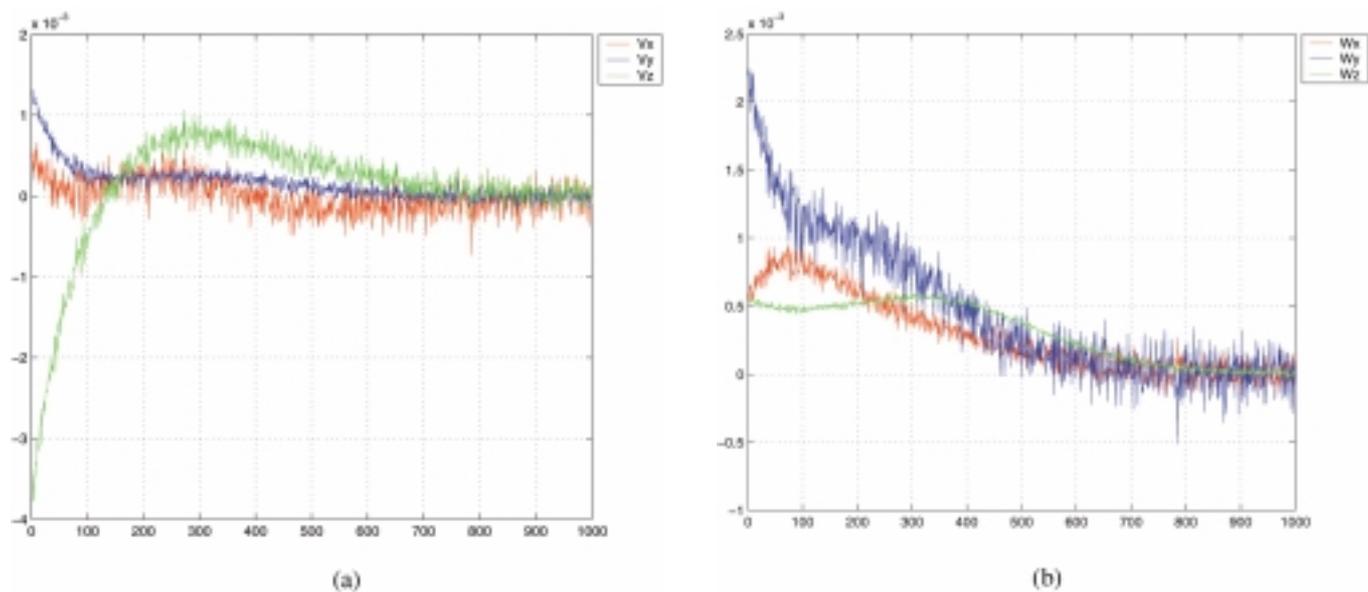


Figure 6. Miroir hyperbolique – caméra perspective: (a) Vitesses de translation [m/s] et (b) vitesses de rotation [rad/s].

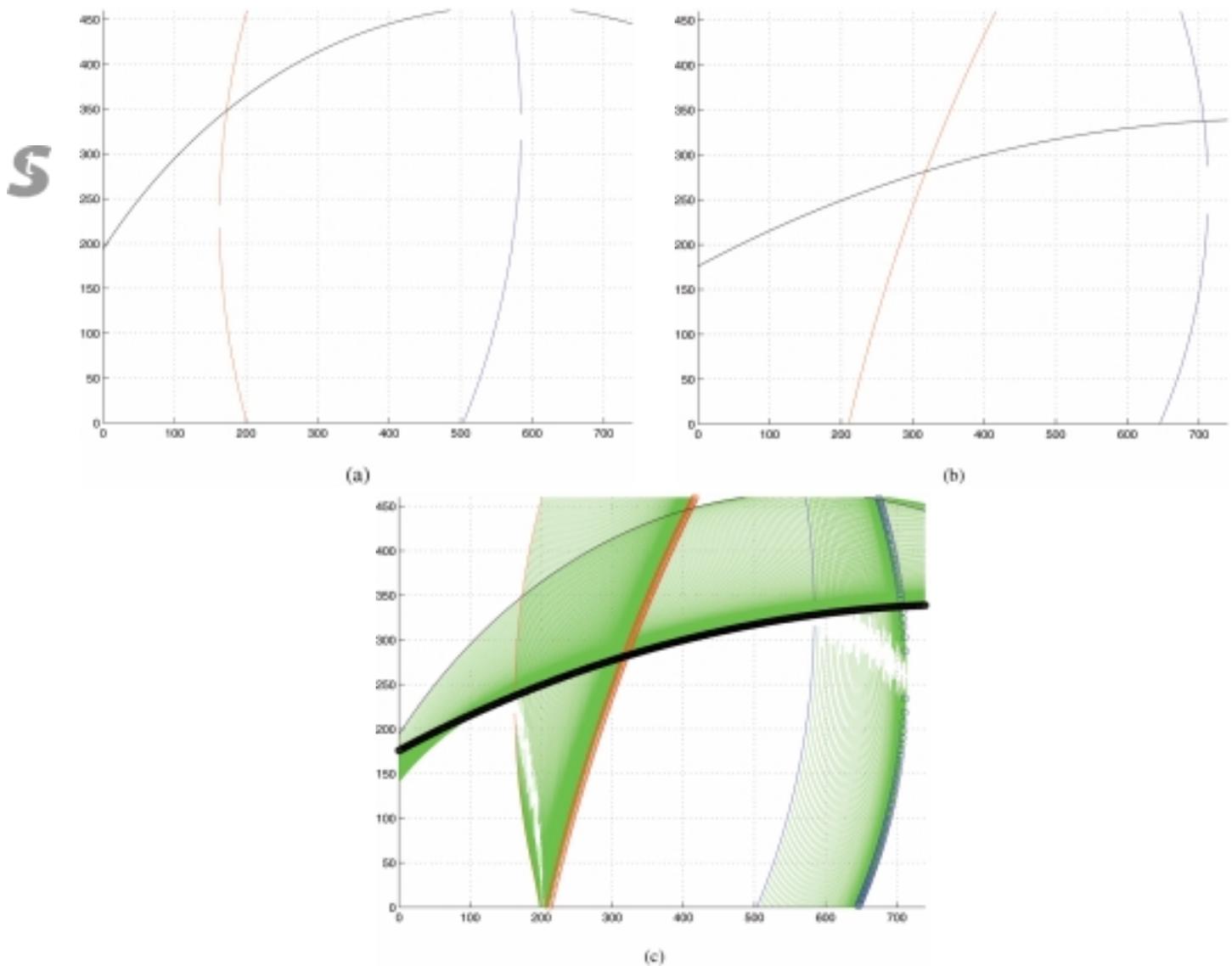


Figure 7. Miroir parabolique – caméra orthographique: (a) image initiale, (b) image désirée, (c) trajectoires de la projection des droites dans le plan image [pixels].

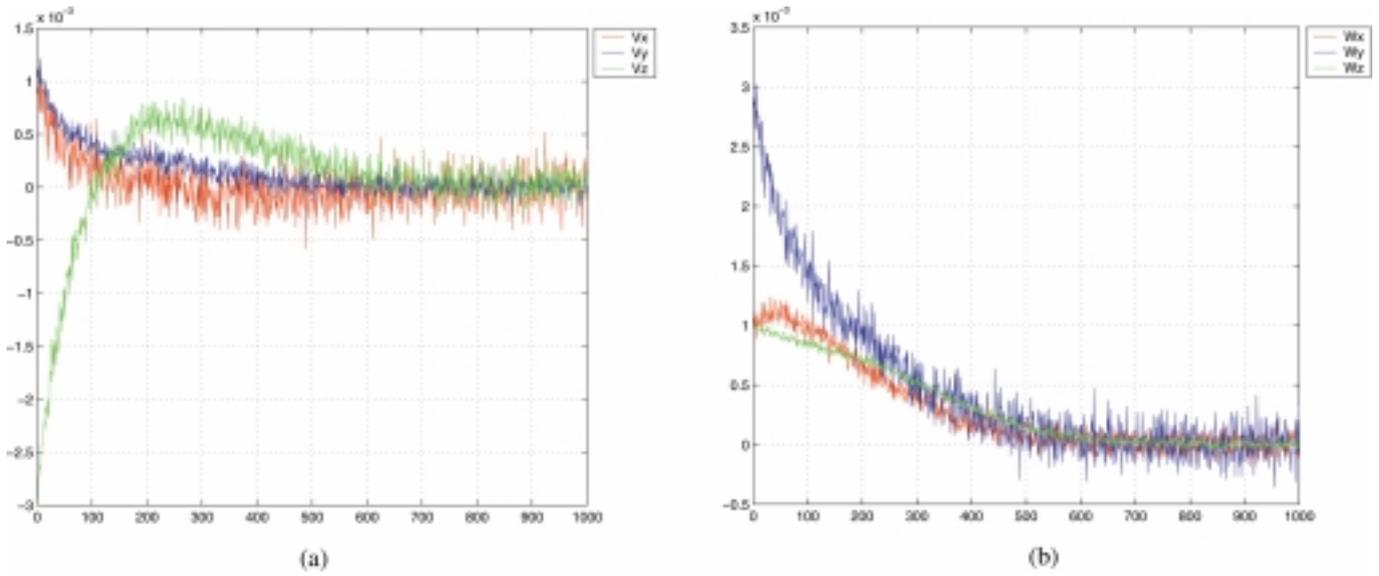


Figure 8. Miroir parabolique – caméra orthographique : (a) Vitesses de translation [m/s] et (b) vitesses de rotation [rad/s].

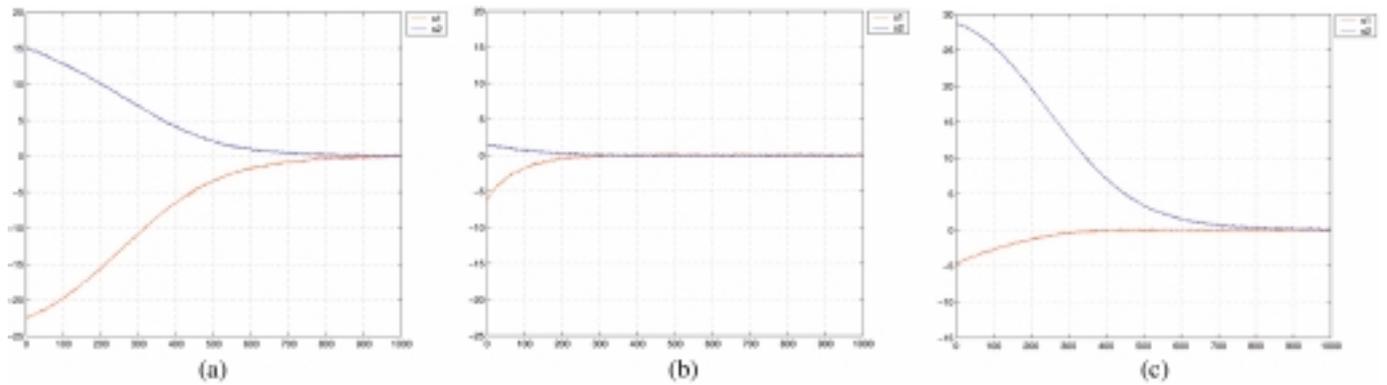


Figure 9. Miroir parabolique – caméra orthographique : $\mathbf{s} - \mathbf{s}^*$: (a) Erreurs sur la première conique, (b) Erreurs sur la seconde conique, (c) Erreurs sur la troisième conique.

caméra donnée par $\mathbf{r}_d = (0.1, 0.1, 1.1, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8})$ dans \mathcal{F}_m . Les trois droites 3-D considérées sont définies par les coordonnées de Plücker dans le repère \mathcal{F}_m suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}_1 : \begin{pmatrix} u_1 = (0, 1, 0) \\ n_1 = (0, 0, -1) \end{pmatrix} \\ \mathcal{L}_2 : \begin{pmatrix} u_2 = (0, 0.9806, 0.1961) \\ n_2 = (0, -0.1961, 0.9806) \end{pmatrix} \\ \mathcal{L}_3 : \begin{pmatrix} u_3 = (0.9623, 0.1925, 0.1925) \\ n_3 = (0.1961, 0, -0.9806) \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

La Figure 3 donne la configuration spatiale initiale des droites et de la caméra. Un bruit sur les mesures a été introduit (bruit additif avec une amplitude maximale de 1 pixel) sur le vecteur d'observation. Une erreur d'amplitude maximale de 5 % sur les coordonnées de Plücker dans le repère monde des trois droites

considérées a également été introduite (ces erreurs agissent sur l'estimation de la matrice d'interaction à la position désirée). Les images correspondant aux positions initiale et désirée de la caméra sont données par les Figures 5(a) et 5(b) pour la combinaison miroir hyperbolique – caméra perspective et par les Figures 7(a) et 7(b) pour la combinaison miroir parabolique – caméra orthographique. Les Figures 5(c) et 7(c) donnent les trajectoires des coniques dans le plan image lors du déplacement de la caméra. Le torseur cinématique de la caméra est donné par les Figures 6 et 8. On note sur ces figures que le torseur cinématique s'annule (au bruit de mesure près) autour de l'itération 800 ce qui correspond à la convergence de la fonction de tâche. Par ailleurs, on remarque un couplage entre les différents degrés de liberté. Comme on peut le constater sur les Figures 4 et 9 montrant les erreurs entre les vecteurs d'observations courant et désiré, la tâche de positionnement a été réalisée correctement aussi bien dans le cas de la combinaison miroir hyperbolique – caméra perspective que dans le cas de la combinaison miroir parabolique-caméra orthographique.

3.2. Suivi de ligne par un robot mobile

L'asservissement visuel avec des capteurs à point central unique et des primitives visuelles relatives à la projection de droite 3-D peut également être utilisé pour le suivi de trajectoire pour un robot mobile. Dans ce résultat de simulation, l'écart angulaire θ d'un robot mobile par rapport à une droite parallèle au plan d'évolution du robot est réglé à une valeur désirée (voir Figure 10). Dans ce cas, un seul degré de liberté doit être contrôlé et donc une seule primitive visuelle extraite de l'image est suffisante. Le repère attaché à la caméra est supposé confondu avec le repère de commande du robot mobile. Dans ce cas, le repère caméra et le robot mobile sont contraints par la même cinématique. Le torseur cinématique est composé d'une vitesse longitudinale le long de l'axe x et d'une vitesse angulaire autour de l'axe optique. Pour amener le robot parallèlement à la droite 3-D (voir Figure 11(d)), la vitesse longitudinale peut être choisie constante et seule l'écart angulaire (la rotation autour de l'axe z) doit être commandée. Comme indiqué précédemment, une droite est projetée dans le plan image en un cercle de centre $x_c = B_3$, $y_c = B_4$ et de rayon $r = (B_3^2 + B_4^2 + 1)^{1/2}$. On peut noter que le rayon r ne varie pas si la caméra tourne autour de l'axe z du repère caméra (en effet la composante relative à la rotation autour de l'axe z de la matrice d'interaction associée à r est nulle). D'autre part, la direction de la droite 3D de référence, dans le repère attaché au miroir peut s'écrire :

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

La relation précédente permet de définir le vecteur \mathbf{u} comme une fonction de l'écart angulaire θ . Ce vecteur est donc indépendant de l'écart latérale y par rapport à la droite de référence. Le vecteur $\mathbf{n} = \overrightarrow{MP} \times \mathbf{u} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ est indépendant du point \mathcal{P} , il peut donc être choisi de coordonnées $\mathcal{P} = [y \sin \theta \ y \cos \theta \ h]^T$ dans le repère associé au miroir (h représente la hauteur de la droite par rapport au plan $X - Y$ du repère associé au miroir). Le vecteur normal au plan d'interprétation \mathbf{n} est alors donné par :

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} -h \sin \theta \\ -h \cos \theta \\ y \end{pmatrix} \quad (20)$$

L'écart angulaire peut facilement s'exprimer en fonction du vecteur d'observation en combinant les équations (20) et (7) :

$$\tan \theta = \frac{B_3}{B_4}, \text{ soit :}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{B_3}{B_4} = \tan^{-1} \frac{x_c}{y_c} \quad (21)$$

B_4 est nul seulement si l'axe X du repère \mathcal{F}_m est perpendiculaire à la droite 3D (i.e. $\theta = \frac{\pi}{2} [\pi]$). Si, on choisit $s = \tan^{-1} \frac{x_c}{y_c}$

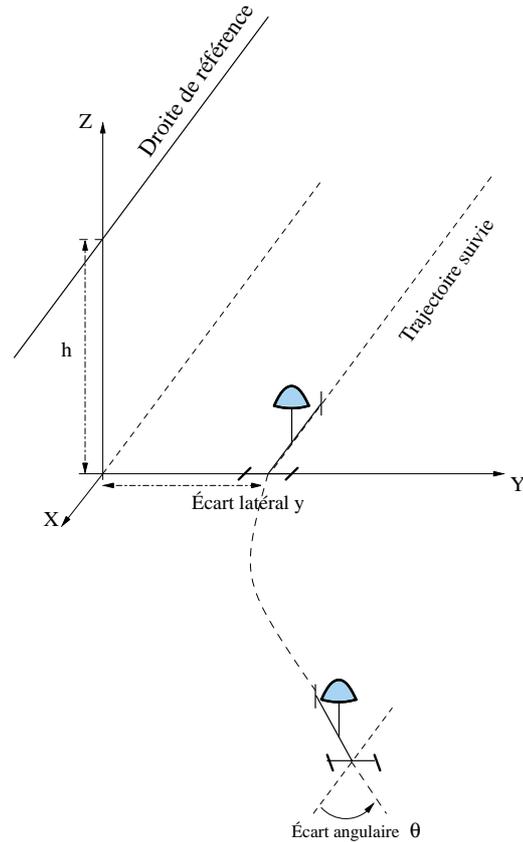


Figure 10. Configurations initiale et désirée du robot mobile.

comme primitive visuelle afin de réguler l'écart latéral, la matrice d'interaction associée à s est naturellement donnée par $J = 1$. La loi de commande (9) peut alors être utilisée.

Les images correspondant aux positions initiale et désirée de la caméra sont données par les Figures 11(a) et 11(b). La Figure 11(c) donne les trajectoires du cercle dans le plan image. La vitesse angulaire est donnée par la Figure 12(b). Comme on peut le constater sur la Figure 12(a) indiquant les erreurs entre les observations courante et désirée la tâche est correctement réalisée.

4. Résultats expérimentaux

Nous présentons dans cette partie les résultats expérimentaux pour le suivi de droite par un robot mobile sur lequel est monté une caméra paracatadioptrique. Le système robot-caméra est composé d'un robot mobile Pioneer 3 et d'une caméra paracatadioptrique. La caméra est montée sur le robot de manière à ce que l'axe de rotation du robot et l'axe principale de la caméra soient approximativement confondus (voir Figure 13). La tâche consiste à amener le robot parallèlement à une droite 3-D. La

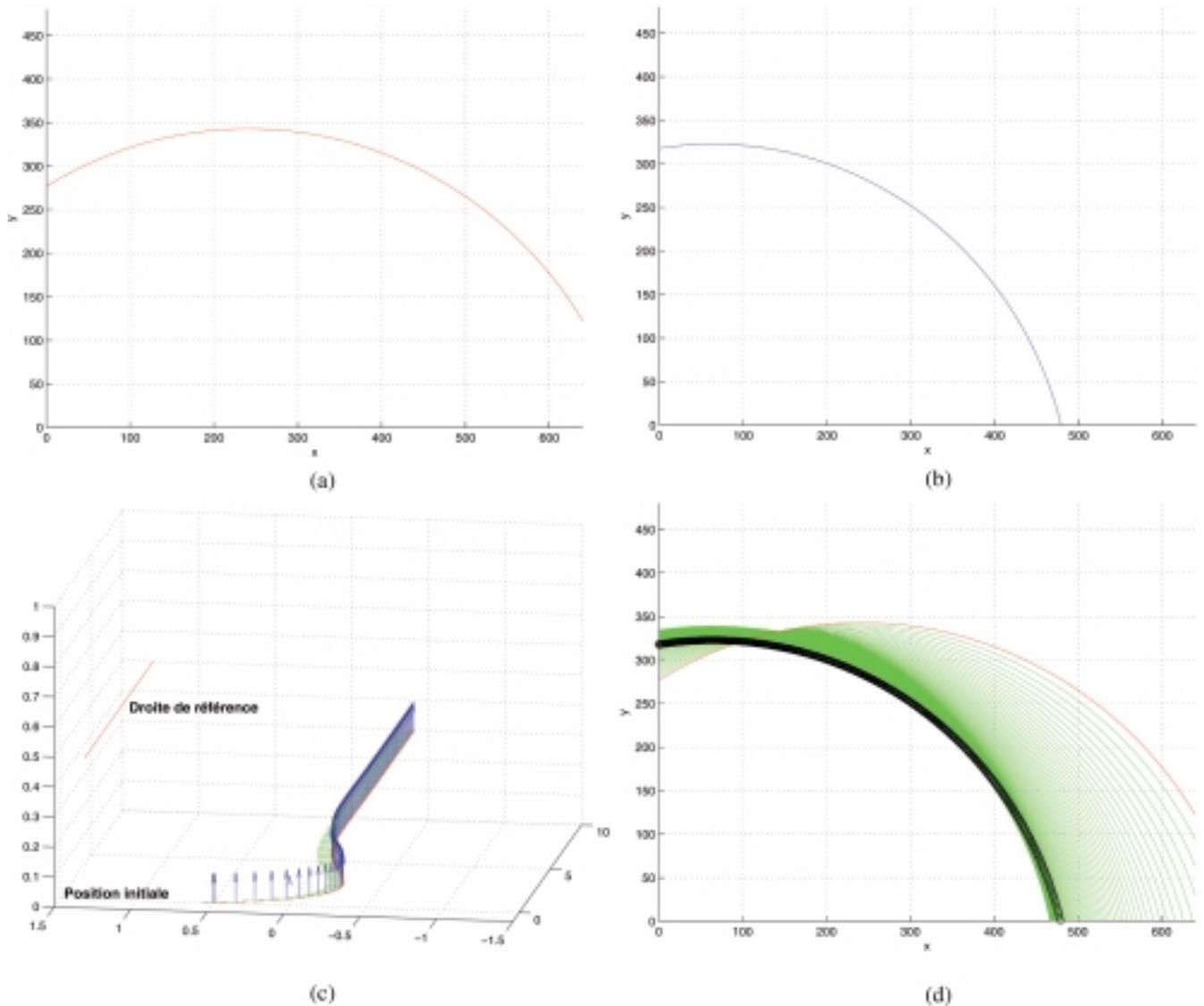


Figure 11. (a) Image initiale [pixels], (b) Image désirée [pixels], (c) trajectoire du robot [mètres], (d) trajectoires de la projection des droites dans le plan image [pixels].

vitesse longitudinale du robot est fixée constante, et seule la vitesse angulaire est contrôlée.

Comme indiqué dans la simulation précédente, le centre du cercle (x_c , y_c) issu de la projection de la droite 3-D est utilisé comme primitive visuelle sous la forme donnée par la relation (21) dans la boucle d'asservissement visuel. La loi de commande (9) est utilisée. La droite 3D de référence par rapport à laquelle nous souhaitons positionner le robot mobile est indiquée sur la figure 13. Le cercle dans l'image correspondant à la projection de la droite de référence est suivie au cours du déplacement de la caméra en utilisant un algorithme fourni par le projet LAGADIC de l'IRISA à Rennes [19].

Les images correspondant aux positions initiale et désirée sont respectivement données par les Figures 14(a) et 14(b). La vitesse angulaire est donnée par la Figure 15(b). Comme on peut le constater sur la Figure 15(a), l'erreur entre les mesures dans les images courante et désirée converge vers zéro et la tâche d'ali-

gnement par rapport à la droite de référence est correctement réalisée. Notons également que l'alignement entre les repères robot et caméra est réalisé de manière très approximative sans pour autant que cela perturbe la convergence de la fonction de tâche.

5. Conclusions

La contrainte de visibilité est extrêmement importante pour les applications dans le domaine de l'asservissement visuel. Afin de lever cette contrainte, le champ de vision panoramique des caméras catadioptriques à centre unique peut être exploité. Dans cet article, nous avons considéré le problème de commande référencée image d'un système robotique en incorporant des informations issues de la projection de droites 3-D dans le plan

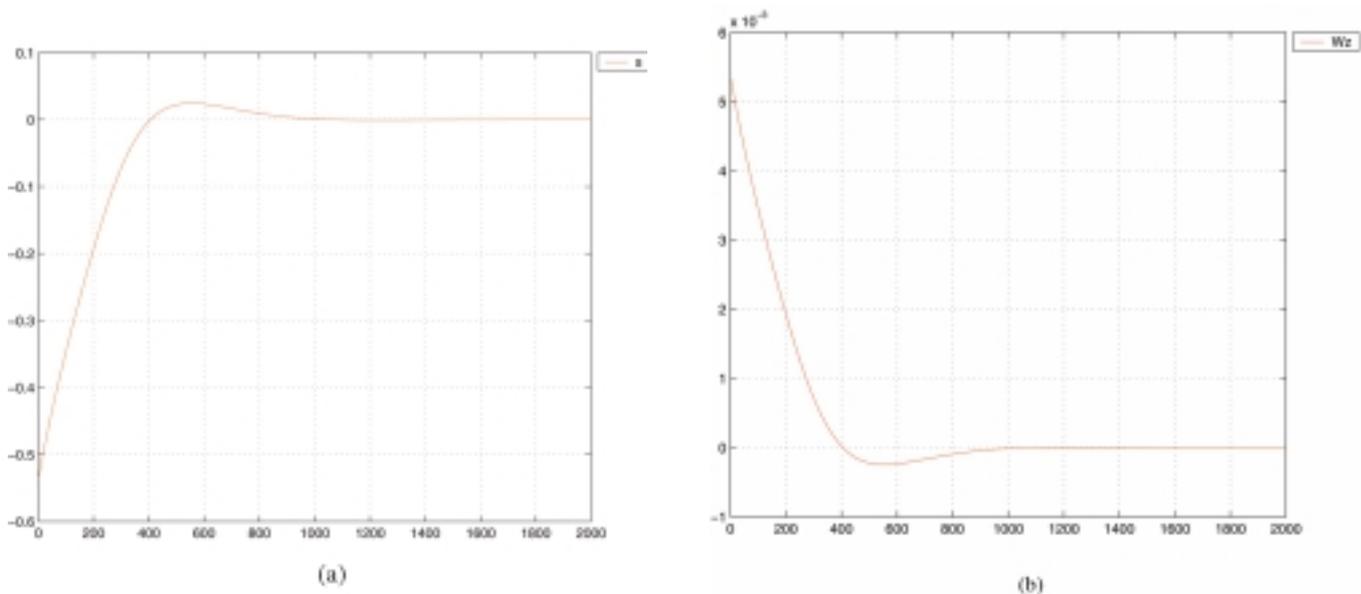
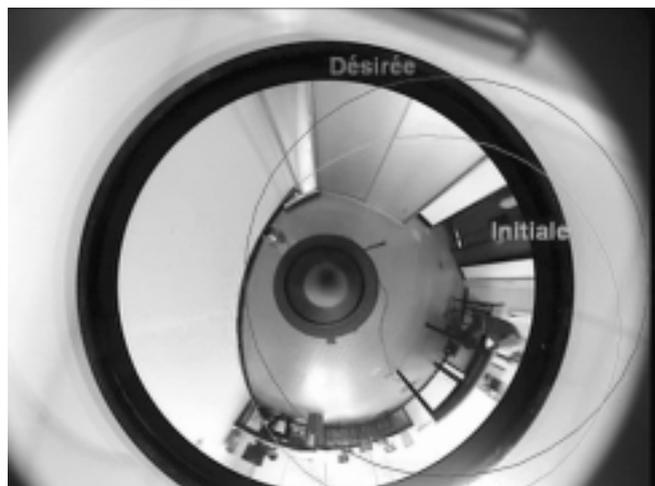
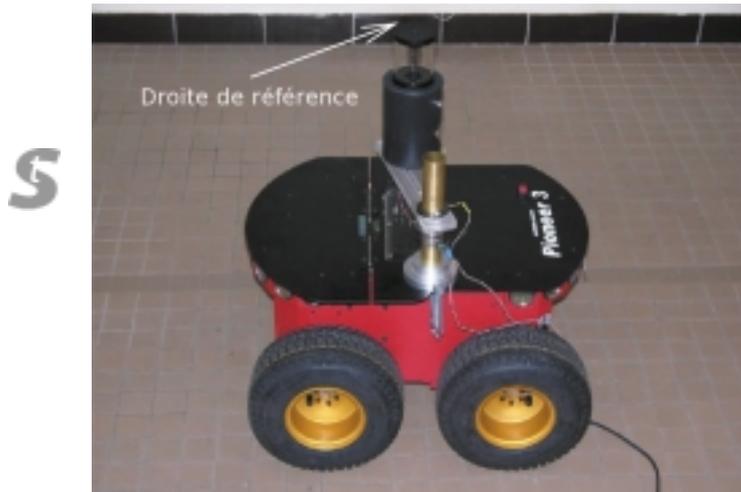
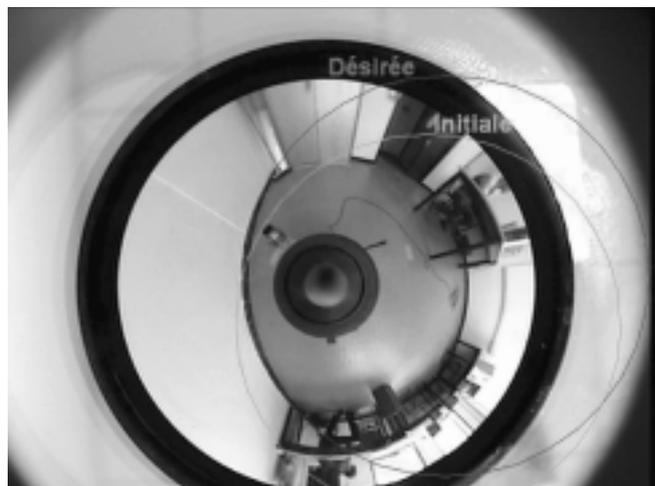


Figure 12. (a) Erreur dans l'image $s - s^*$ [pixels], (b) vitesse de rotation [rad/s].



(a)

Figure 13. Robot mobile Pioneer 3 avec caméra omnidirectionnelle embarquée.



(b)

Figure 14. (a) Image initiale (position initiale de la projection de la droite de référence en vert), (b) image désirée (positions initiale et désirée de la projection de la droite de référence en vert et rouge respectivement).

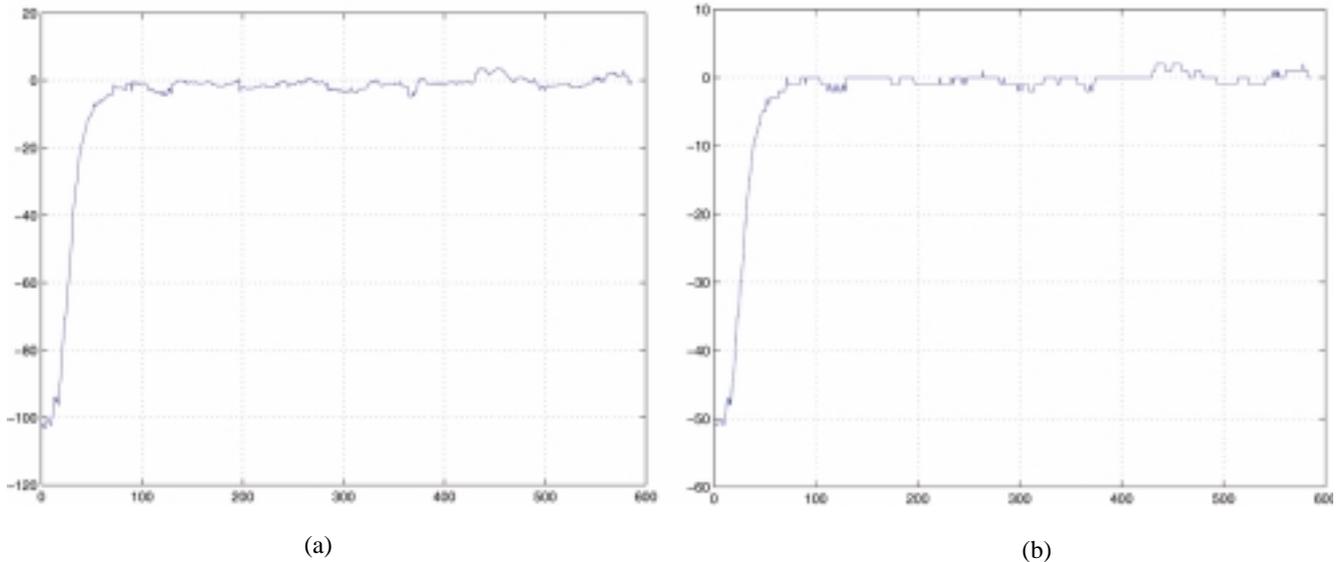


Figure 15. (a) Erreur dans l'image $s - s^*$ [pixels], (b) vitesse de rotation [deg/s].

image de toute caméra à point centrale unique. Une matrice d'interaction générique qui peut être utilisée pour la construction de loi de commande, a été obtenue. Nous poursuivons ces travaux d'une part par l'étude de stratégies de planification de trajectoire de primitives visuelles dans les images panoramiques. D'autre part nous étudions l'intégration des contraintes cinématiques des robots mobiles à roue (non holonomie) dans la commande. Enfin, l'étude de la stabilité du système en présence de bruit de mesure et d'erreur de modélisation est un point théorique important que nous souhaitons analyser.

Références

- [1] N. ANDREFF, B. ESPIAU et R. HORAUD, Visual servoing from lines. *Int. Journal of Robotics Research*, 21(8):679-700, Août 2002.
- [2] S. BAKER et S. K. NAYAR, A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *Int. Journal of Computer Vision*, 35(2):1-22, Novembre 1999.
- [3] J. BARRETO et H. ARAUJO, Geometric properties of central catadioptric line images. Dans *7th European Conf. on Computer Vision, ECCV'02*, pages 237-251, Copenhagen, Danemark, Mai 2002.
- [4] J. P. BARRETO, F. MARTIN et R. HORAUD, Visual servoing/tracking using central catadioptric images. Dans *8th Int. Symp. on Experimental Robotics, ISER'02*, pages 863-869, Bombay, Inde, Juillet 2002.
- [5] R. BENOSMAN et S. KANG, *Panoramic Vision*. Springer Verlag, 2000.
- [6] P. BLAER et P.K. ALLEN, Topological mobile robot localization using fast vision techniques. Dans *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'02*, pages 1031-1036, Washington, USA, Mai 2002.
- [7] D. BURSHKA, J. GEIMAN et G. HAGER, Optimal landmark configuration for vision based control of mobile robot. Dans *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, pages 3917-3922, Taipei, Taiwan, Septembre 2003.
- [8] F. CHAUMETTE, La relation vision commande: théorie et application à des tâches robotiques. *Thèse de l'Université de Rennes I, France*, 1990.
- [9] F. CHAUMETTE, Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *The Confluence of Vision and Control, LNCIS Series, Springer Verlag*, 237:66-78, 1998.
- [10] G. CHESI, K. HASHIMOTO, D. PRATTICCHIZZO et A. VICINO, A switching control law for keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing. Dans *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, pages 3929-3934, Taipei, Taiwan, Septembre 2003.
- [11] N. J. COWAN, J. D. WEINGARTEN et D. E. KODITSCHKEK, Visual servoing via navigation functions. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):521-533, August 2002.
- [12] P. CORKE et S. HUTCHINSON, A new partitioned approach to image-based visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 17(4): 507-515, Août 2001.
- [13] B. ESPIAU, F. CHAUMETTE et P. RIVES, A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(3):313-326, Juin 1992.
- [14] C. GEYER et K. DANILIDIS, A unifying theory for central panoramic systems and practical implications. Dans *European Conf. on Computer Vision, ECCV'00*, volume 29, pages 159-179, Dublin, Irlande, Mai 2000.
- [15] S. HUTCHINSON, G.D. HAGER et P.I. CORKE, A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5):651-670, Octobre 1996.
- [16] D. KHADRAOUI, C. DEBAIN, R. ROUVEURE, P. MARTINET, P. BONTON et J. GALLICE, Vision based control in driving assistance for agricultural vehicles. *International Journal of Robotics Research*, 17(10):1040-1054, Octobre 1998.
- [17] E. MALIS, J. BORRELLY et P. RIVES, Intrinsic-free visual servoing with respect to straight lines. Dans *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots Systems, IROS'02*, Lausanne, Switzerland, Octobre 2002.
- [18] E. MALIS, F. CHAUMETTE et S. BOUDET, 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 15(2):238-250, Avril 1999.
- [19] E. MARCHAND, ViSP: A software environment for eye-in-hand visual servoing. Dans *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'99*, volume 3, pages 3224-3229, Détroit, Michigan, Mai 1999.
- [20] B. MARHIC, E. MOUADDIB, D. FOFI et E. BRASSART, Localisation absolue par le capteur omnidirectionnel SYCLOP. *Traitement du Signal*, Vol. 17, N°3, 2000.
- [21] Y. MEZOUAR et F. CHAUMETTE, Path planning for robust image-based control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):534-549, Août 2002.
- [22] A. PAULINO et H. ARAUJO, Multiple robots in geometric formation: Control structure and sensing. Dans *Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems*, pages 103-112, Reading, UK, Juillet 2000.

- [23] E. MALIS, S. BENHIMANE, Vision-based control with respect to planar and non-planar objects using a zooming camera. Dans *IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics, ICAR'04*, pages 863-869, Juillet 2003.
- [24] P. MARTINET et J. GALLICE, Position-based visual servoing using a nonlinear approach. Dans *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'99*, pages 531-536, Kyongju, Corée du Sud, Octobre 1999.
- [25] P. RIVES et B. ESPIAU, Estimation recursive de primitives 3D au moyen d'une caméra mobile. *Traitement du Signal*, Vol. 4, pages 259-272, 1987.
- [26] C. SAMSON, B. ESPIAU, et M. LE BORGNE, *Robot Control : The Task Function Approach*. Oxford University Press, 1991.
- [27] B. THUILOT, P. MARTINET, L. CORDESSES, et J. GALLICE, Position-based visual servoing: keeping the object in the field of vision. Dans *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, ICRA'02*, pages 1624-1629, Washington DC, USA, Mai 2002.
- [28] R. VIDAL, O. SHAKERNIA et S. SASTRY, Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation. Dans *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'03*, Taipei, Taiwan, Septembre 2003.
- [29] N. WINTER, J. GASPARD, G. LACEY, et J. SANTOS-VICTOR, Omnidirectional vision for robot navigation. Dans *IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, OMNIVIS'00*, pages 21-28, South Carolina, USA, Juin 2000.



Youcef **Mezouar**

Youcef Mezouar est né à Drancy en 1973. Après un diplôme d'ingénieur du CUST obtenu à Clermont-Ferrand en 1997, il a soutenu à l'Université de Rennes 1 une thèse en informatique en 2001. Il a ensuite effectué un séjour post-doctoral d'un an à Columbia University, New-York, USA. Il est actuellement Maître de conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-ferrand. Ces travaux de recherches au LASMEA, UMR6602, CNRS / Université Blaise Pascal, portent sur la robotique et la vision par ordinateur, et plus particulièrement sur le couplage entre vision et commande.



Philippe **Martinet**

Philippe Martinet est né à Clermont-Ferrand en 1962. Après un diplôme d'ingénieur en électronique du CUST obtenu à Clermont-Ferrand en 1985, il a soutenu à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand une thèse en électronique en 1987.

Il a passé trois ans dans l'industrie de l'électronique. De 1990 à 2000, Il a été Maître de conférences au CUST, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Depuis 2000, il est professeur à l'IFMA (Institut Français de Mécanique Avancée) à Clermont-Ferrand.

Ses travaux de recherche portent sur l'asservissement visuel, la vision active, la commande robuste, la conduite automatique de véhicule, la modélisation, l'identification et la commande des machines complexes.

Il est responsable du groupe de recherche GRAVIR au sein du LASMEA à Clermont-Ferrand.



Hicham **Hadj-Abdelkader**

Hicham Hadj-Abdelkader a obtenu son DEA Composants et Systèmes pour le Traitement d'Information en 2003 à l'Université Blaise Pascal, Clermont-ferrand. Il est actuellement doctorant en deuxième année au laboratoire LASMEA UMR 6602 CNRS à Clermont-ferrand sous la direction de Philippe MARTINET (Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée, Clermont-Ferrand) et Youcef MEZOVAR (Maître de conférences à l'UBP Clermont-ferrand). Ses travaux concernent la commande des robots par vision omnidirectionnelle.



François **Chaumette**

François Chaumette est né à Nantes en 1963. Après un diplôme d'ingénieur de l'ENSM obtenu à Nantes en 1987, il a soutenu à l'Université de Rennes 1 une thèse en informatique en 1990, puis une habilitation à diriger des recherches en 1998. Chercheur à l'Irisa de Rennes depuis sa thèse, il est actuellement directeur de recherches Inria et responsable de l'équipe Lagadic. Sa thématique de recherche porte sur la robotique et la vision par ordinateur, plus particulièrement sur l'asservissement visuel.