



HAL
open science

Utilisation des droites en asservissement visuel omnidirectionnel

Y. Mezouar, Hicham Hadj-Abdelkader, Philippe Martinet

► **To cite this version:**

Y. Mezouar, Hicham Hadj-Abdelkader, Philippe Martinet. Utilisation des droites en asservissement visuel omnidirectionnel. RFIA conference, RFIA'04, Jan 2004, Toulouse, France. hal-02466534

HAL Id: hal-02466534

<https://inria.hal.science/hal-02466534>

Submitted on 4 Feb 2020

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

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

Utilisation des droites en asservissement visuel omnidirectionnel

Omnidirectional visual servoing from lines

Y. Mezouar

H. Hadj Abdelkader

P. Martinet

LASMEA

24 avenue des Landais

63177 AUBIERE - FRANCE

mezouar,hadj,martinet@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé

Dans cet article nous présentons une stratégie de commande de robots manipulateurs à six degrés de liberté 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 (image catadioptrique). La motivation principal de ce travail est de répondre aux problèmes de visibilité lorsque des informations issues d'une caméra classique sont intégrées à une boucle de commande. En effet, une des principales sources d'échec des schémas d'asservissement est relative aux sorties de champs des primitives visuelles. L'utilisation de caméras omnidirectionnelles permet de résoudre cette difficulté puisque leurs champs de vision est bien supérieur à celui des caméras classiques. Cet article concerne en particulier l'utilisation de la projection de droites dans l'image d'une caméra omnidirectionnelle comme entrée de la boucle de commande. Afin de réaliser la commande d'un système robotique par asservissement visuel, il est nécessaire d'estimer la matrice jacobienne (matrice d'interaction) liant les mouvements de la caméra aux mouvements des primitives visuelles dans l'image catadioptrique. Dans cet article, nous donnons la forme analytique de la matrice d'interaction pour la projection de droites dans l'image catadioptrique permettant de construire une loi de commande adéquate.

Mots Clef

Asservissement visuel, caméra omnidirectionnelle, droites

Abstract

In this paper we present a new approach to control the 6 degrees of freedom of a manipulator using the projection of 3D lines extracted from the image plane of an omnidirectional camera. The main motivation of this work is to overcome the problem of visibility when using classical vision sensor. Indeed one of the principal deficiency of classical visual servoing strategy is that some parts of the visual features may get out of the field of view

during servoing leading to its failure. Panoramic cameras overcome this problem because of their wider field of view. The present paper is concerned with the use of lines in omnidirectional visual servoing. Indeed when dealing with real environments (indoor or outdoor) or industrial workpiece, the extraction and the tracking of lines is natural. We derive the panoramic image jacobian for lines in the cases of image based and position based visual servoing. The corresponding control laws are then designed and validated.

Keywords

Visual Servoing, Omnidirectional camera, lines

1 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. 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 techniques d'asservissement visuel classiques sont efficaces pour une grande classe d'applications mais se heurtent à certaines difficultés [4]. 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) [3], soit dans l'espace 3-D [10]. Des informations de type 3-D et 2-D peuvent également être combinées pour construire le signal d'erreur. Cette dernière approche, est appe-

lée approche hybride ou 2D1/2 [9]. Les difficultés potentielles auxquelles nous sommes confrontés se situent tout d’abord au niveau des trajectoires des primitives visuelles dans l’image. En effet ces trajectoires peuvent être inadéquates, amenant les primitives visuelles à sortir du champ de vision de la caméra. Quelques travaux se sont intéressés à ce problème. Les méthodes proposées sont basées sur des techniques de planification de trajectoires [11], de commande réactive [5], d’ajustement du zoom [13] ou de considérations géométriques et topologiques [6]. Une autre solution à ce problème consiste à accroître le champ de vision du capteur en combinant des miroirs à un système de capture d’images classiques (système catadioptrique) [8]. Afin de simplifier les traitements, 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 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] déterminent la classe de tous les systèmes catadioptriques centraux. Dans [12] est montré qu’il existe deux types de combinaison miroir-lentille permettant la mise au point d’un système catadioptrique central augmentant le champ de vision : **caméra orthographique-miroir parabolique** et **caméra perspective-miroir hyperbolique**. Nous étudierons donc uniquement le cas de ces deux systèmes catadioptriques centraux.

Le jacobien image (appelé également matrice d’interaction) joue un rôle central pour la synthèse des lois de commande. Il lie les mouvements de la caméra aux variations des primitives visuelles dans l’image catadioptrique. Chaumette dans [3] 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 les cas où le capteur de vision est un système catadioptrique central [7]. Dans cet article, nous donnons la forme analytique de la matrice d’interaction pour la projection de droites dans l’image catadioptrique permettant de construire une loi de commande adéquate. Cet article est organisé de la manière suivante, dans la partie 2, nous étudions la projection de droites sur une image catadioptrique pour les deux classes de caméra omnidirectionnelle nous intéressant. Nous présentons, dans la partie 3, comment nous procédons pour obtenir les matrices d’interaction que nous utilisons pour la synthèse de la loi de commande. Des résultats de simulation sont fournis dans la partie 4.

2 Modélisation

De nombreuses applications en vision nécessitent un champ de vision plus large que celui d’une caméra classique. Une solution consiste à accroître le champ de vision en utilisant des miroirs combinés à des lentilles :

système catadioptrique. 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 par un point unique appelé point central unique. Sous cette contrainte, chaque pixel sur le capteur image ou capteur CCD mesure la luminance du rayon qui passe par le point central dans une direction particulière et connue. Baker et Nayar, dans [2] montrent que les seuls miroirs qui vérifient la contrainte du point central unique sont les miroirs hyperbolique, parabolique, elliptique et planaire. Dans [12], le théorème suivant est démontré :

Le miroir convexe hyperbolique associé à un système de capture d’image orthographique et le miroir convexe parabolique associé à un système de capture d’image perspectives sont les seuls combinaison permettant de construire des caméras catadioptriques à point central unique avec un champ visuel important.

Dans la suite, nous étudierons donc uniquement ces deux configurations. Le modèle de la caméra exprime le lien entre les coordonnées d’un point du monde vue par la caméra et les coordonnées de son image dans le plan image. Le modèle d’une caméra conventionnelle perspective est :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{p} \\ 1 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0_{3 \times 1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{P}_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{\mathbf{u}} = \mathbf{K}\underline{\mathbf{p}}$$

où $\mathbf{P}_w = [X \ Y \ Z]^T$ est le vecteur des coordonnées d’un point \mathcal{P} du monde défini dans le repère du monde \mathcal{F}_w , \mathbf{R} et \mathbf{t} sont respectivement la matrice de rotation et le vecteur de translation entre le repère du monde et le repère attaché à la caméra \mathcal{F}_c . \mathbf{K} est la matrice 3×3 triangulaire des paramètres intrinsèques de la caméra, $\underline{\mathbf{p}} = [x \ y \ 1]^T$ est le vecteur des coordonnées homogènes métriques du point image issue de la projection du point \mathcal{P} sur le plan image de la caméra, $\underline{\mathbf{u}} = [u \ v \ 1]^T$ est le vecteur des coordonnées homogènes du même point exprimées en pixel, α est un scalaire non nul. Notre objectif est de contrôler les mouvements d’un robot en utilisant la projection de droites du monde dans l’image catadioptrique. Afin de modéliser cette projection nous utiliserons les coordonnées de Plucker pour représenter les droites de l’espace. Soit (\mathfrak{S}) une droite de l’espace, les coordonnées de Plucker de cette droite sont :

$$(\mathfrak{S}) : \begin{pmatrix} \underline{\mathbf{n}} \\ \underline{\mathbf{h}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

où $\underline{\mathbf{h}} = (u_x, u_y, u_z)^T$ est le vecteur directeur unitaire de la droite, et $\underline{\mathbf{n}} = (n_x, n_y, n_z)^T$ est défini par le produit vectoriel suivant :

$$\underline{\mathbf{n}} = \mathbf{P} \times \underline{\mathbf{h}} \quad (3)$$

\mathbf{P} est le vecteur des coordonnées d’un point de (\mathfrak{S}) dans \mathcal{F}_m (repère attaché au miroir). Lorsque $\underline{\mathbf{n}}$ est nul alors la droite passe par le point central. C’est un cas dégénéré où

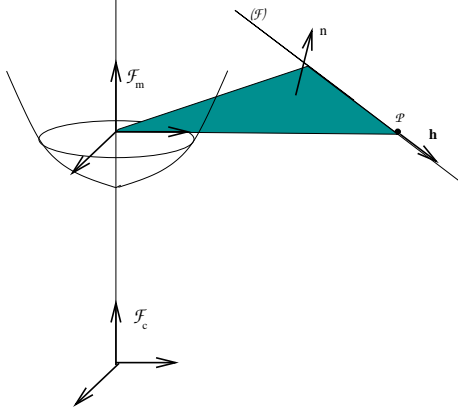


FIG. 1 – Projection catadioptrique d'une droite

la droite se projette en un point dans l'image omnidirectionnelle. Nous définissons donc une droite de l'espace par un couplet vecteur directeur-vecteur normal (équation (2)). Le vecteur \mathbf{n} est normal au plan d'interprétation, qui contient la droite (\mathfrak{F}) et le point central (centre de la projection sur le miroir). L'intersection de ce plan avec la surface du miroir forme la projection $(\mathfrak{F})_p$ de (\mathfrak{F}) sur le miroir. Ce plan définit donc complètement la projection $(\mathfrak{F})_p$ de la droite (\mathfrak{F}) sur le miroir. L'image de $(\mathfrak{F})_p$ est ensuite obtenue par projection perspective ou orthographique respectivement dans les cas des miroirs hyperbolique et parabolique. Le plan d'interprétation est donc défini par le vecteur \mathbf{n} donné par ces composantes $(n_x \ n_y \ n_z)^T$ dans le repère attaché au miroir \mathcal{F}_m , l'équation du plan d'interprétation, noté (II) peut alors s'écrire :

$$(II) : n_x x + n_y y + n_z z = 0 \quad (4)$$

Miroir hyperbolique-caméra perspective. Nous présentons dans cette partie la modélisation d'une caméra panoramique catadioptrique centrale à miroir hyperbolique. Nous en déduisons ensuite la projection d'une droite dans l'image catadioptrique. Le centre M du repère miroir \mathcal{F}_m est placé sur le premier point focal de l'hyperbole (point central), son axe Z coïncide avec l'axe de révolution de l'hyperboloïde. La caméra conventionnelle est placée de manière à ce que le centre optique C de la caméra perspective coïncide avec le deuxième point focal de l'hyperbole. Le repère caméra \mathcal{F}_c est centré au point C (voir Figure 2). Le miroir hyperbolique peut être représenté par :

$$\frac{(z + \frac{d}{2})^2}{a_h^2} - \frac{x^2 + y^2}{b_h^2} = 1 \quad (5)$$

avec :

$$a_h = \frac{1}{2}(\sqrt{d^2 + 4p^2} - 2p)$$

$$b_h = \sqrt{p\sqrt{d^2 + 4p^2} - 2p^2}$$

Où p et d sont les paramètres du miroir (voir Figure 2). L'ensemble (\mathcal{F}_h) des points d'intersection du plan d'interprétation (II) avec la surface du miroir définit la projection de la droite sur le miroir. Les points \mathbf{p} de coordonnées $[x \ y \ z]^T$ dans \mathcal{F}_m appartenant à (\mathcal{F}_h) vérifient

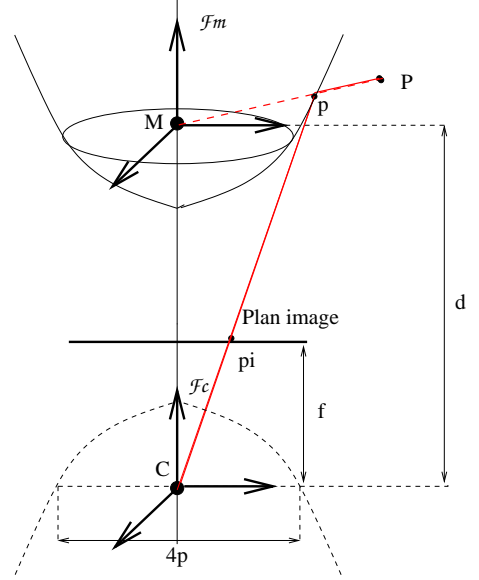


FIG. 2 – Miroir hyperbolique-caméra perspective

deux contraintes. D'une part, \mathbf{p} doit appartenir à la surface du miroir hyperbolique et donc vérifier la relation (5). D'autre part tout point appartenant à (\mathcal{F}_h) appartient également au plan d'interprétation et vérifie donc la relation (4). En combinant les relations (4) et (5), on montre que tout point \mathbf{p} de coordonnées $[x \ y \ z]^T$ dans \mathcal{F}_m appartenant à (\mathcal{F}_h) vérifie :

$$\underline{\mathbf{p}}^T \mathbf{A}_h \underline{\mathbf{p}} = 0 \quad (6)$$

avec $\underline{\mathbf{p}} = [x \ y \ 1]^T$ et :

$$\mathbf{A}_h = \begin{pmatrix} n_x^2 b_h^2 - n_z^2 a_h^2 & n_x n_y b_h^2 & -n_x n_z \frac{d}{2} b_h^2 \\ n_x n_y b_h^2 & n_y^2 b_h^2 - n_z^2 a_h^2 & -n_y n_z \frac{d}{2} b_h^2 \\ -n_x n_z \frac{d}{2} b_h^2 & -n_y n_z \frac{d}{2} b_h^2 & n_z^2 b_h^4 \end{pmatrix}$$

Cette forme quadratique représente une conique et dépend des paramètres du miroir et du plan d'interprétation. Notons \mathbf{R}_c la matrice de rotation et \mathbf{t}_c le vecteur de translation entre le repère miroir \mathcal{F}_m et le repère caméra \mathcal{F}_c . Sans perte de généralité, on peut fixer $\mathbf{R}_c = \mathbf{I}_{3 \times 3}$. En outre, $\mathbf{t}_c = (0 \ 0 \ d)^T$ puisque le centre de projection de la caméra perspective doit coïncider avec la deuxième focale de l'hyperbole. Soit \mathbf{p}_c les coordonnées du point \mathbf{p} dans le repère caméra \mathcal{F}_c alors $\mathbf{p}_c = \mathbf{R}_c \mathbf{p} + \mathbf{t}_c$, d'où :

$$\mathbf{p}_c = \mathbf{p} + [0 \ 0 \ d]^T \quad (7)$$

En outre (se référer à (4)) :

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ -\frac{n_x x + n_y y}{n_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{n_x}{n_z} & -\frac{n_y}{n_z} & 0 \end{pmatrix} \underline{\mathbf{p}}$$

Soit en combinant la relation précédente à (7) :

$$\mathbf{p}_c = \begin{pmatrix} x \\ y \\ -\frac{n_x x + n_y y}{n_z} + d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{n_x}{n_z} & -\frac{n_y}{n_z} & d \end{pmatrix} \underline{\mathbf{p}}$$

\mathbf{B}

Soit \mathbf{p}_i les coordonnées métriques de la projection perspective de \mathbf{p} dans l'image, alors :

$$\mathbf{p}_i = \frac{f}{z_c} \mathbf{p}_c = \frac{f}{z_c} \mathbf{B} \mathbf{p} \quad (8)$$

où f est la distance focale de la caméra perspective. Il est clair que la matrice \mathbf{B} est de rang plein, elle est donc inversible, avec :

$$\mathbf{B}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{n_x}{n_z d} & \frac{n_y}{n_z d} & \frac{1}{d} \end{pmatrix} \quad (9)$$

\mathbf{p} peut donc s'écrire :

$$\mathbf{p} = \frac{z_c}{f} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{p}_i \quad (10)$$

En utilisant (10) dans (6), nous obtenons :

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{B}^{-T} \mathbf{A}_h \mathbf{B}^{-1} \mathbf{p}_i = 0 \quad (11)$$

En tenant compte de la matrice des paramètres intrinsèques pour le passage mètre/pixel (se référer à (1)), l'équation quadratique s'écrit finalement :

$$\mathbf{u}^T \mathbf{K}^T \mathbf{B}^{-T} \mathbf{A}_h \mathbf{B}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{u} = 0 \quad (12)$$

Dans la suite et sans perte de généralité, on prendra $\mathbf{K} = \mathbf{I}_{3 \times 3}$. L'équation quadratique de la projection d'une droite dans l'image catadioptrique est de la forme :

$$A_{h0}x^2 + A_{h1}y^2 + 2A_{h2}xy + 2A_{h3}x + 2A_{h4}y + A_{h5} = 0$$

avec :

$$\begin{cases} A_{h0} = c_2 n_x^2 - c_1 n_z^2 \\ A_{h1} = c_2 n_y^2 - c_1 n_z^2 \\ A_{h2} = c_2 n_x n_y \\ A_{h3} = c_3 n_x n_z \\ A_{h4} = c_3 n_y n_z \\ A_{h5} = c_2 n_z^2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{où : } c_1 = a_h^2, c_2 = \frac{b_h^4}{d^2} \text{ et } c_3 = b_h^2 \left(\frac{b_h^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right)$$

Miroir parabolique-projection orthographique. De la même manière que pour les miroirs hyperboliques, nous décrivons le modèle de projection pour la combinaison miroir parabolique-caméra orthographique. La caméra orthographique est placée de manière à ce que la projection des rayons provenant de la surface du miroir parabolique soit orthographique sur le plan CCD de la caméra conventionnelle. A cette fin, l'axe Z de la caméra est confondu avec l'axe de symétrie Z du miroir (voir Figure 3). L'équation décrivant la forme géométrique de la parabole est donnée par :

$$z = \frac{x^2 + y^2}{2a_p} - \frac{a_p}{2} \quad (14)$$

$$a_p = 2p \quad (15)$$

où p est le paramètre de la parabole. L'ensemble (\mathcal{F}_p) des points d'intersection du plan d'interprétation (Π) avec la surface du miroir définit la projection de la droite sur le miroir parabolique. Les points \mathbf{p} de coordonnées

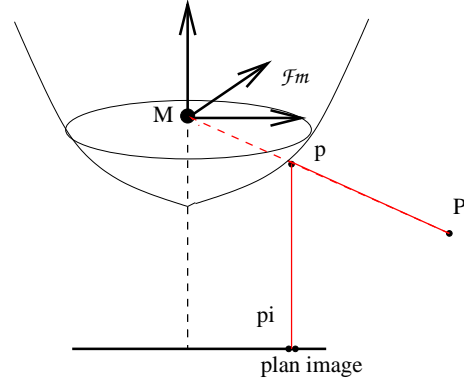


FIG. 3 – Miroir parabolique-caméra orthographique

$[x \ y \ z]^T$ dans \mathcal{F}_m appartenant à (\mathcal{F}_p) vérifient, comme dans le cas du miroir hyperbolique, deux contraintes. D'une part, \mathbf{p} doit appartenir à la surface du miroir parabolique et donc vérifier la relation (15). D'autre part tout point appartenant à (\mathcal{F}_p) appartient également au plan d'interprétation et vérifie donc la relation (4). En combinant les relations (4) et (15), on montre que tout point \mathbf{p} de coordonnées $[x \ y \ z]^T$ dans \mathcal{F}_m appartenant à (\mathcal{F}_p) vérifie :

$$\mathbf{p}^T \mathbf{A}_p \mathbf{p} = 0 \quad (16)$$

avec $\mathbf{p} = [x \ y \ 1]^T$ et

$$\mathbf{A}_p = \begin{pmatrix} n_z & 0 & a_p n_x \\ 0 & n_z & a_p n_y \\ a_p n_x & a_p n_y & -a_p^2 n_z \end{pmatrix} \quad (17)$$

Cette forme quadratique et un cercle et dépend des paramètres du miroir et du plan d'interprétation. Notons que si les pixels ne sont pas carrés et si le passage mètre-pixel est pris en compte alors la conique dans l'image est une ellipse. De la même manière et en utilisant les mêmes notations que pour la combinaison miroir hyperbolique-caméra perspective, nous obtenons pour la combinaison miroir parabolique-caméra orthographique :

$$\begin{cases} A_{p0} = n_z \\ A_{p1} = n_z \\ A_{p2} = 0 \\ A_{p3} = a_p n_x \\ A_{p4} = a_p n_y \\ A_{p5} = -a_p^2 n_z \end{cases} \quad (18)$$

3 Loi de commande

Afin de contrôler les mouvements d'un robot à partir d'informations visuelles, nous définissons une fonction de tâche [14] :

$$\mathbf{e} = \hat{\mathbf{L}}^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (19)$$

où :

- \mathbf{s} est composé des primitives visuelles courantes extraites de l'image catadioptrique. Nous définirons plus précisément ce vecteur dans la suite.
- \mathbf{s}^* est la valeur désirée de \mathbf{s}

– \mathbf{L}^+ est la pseudo-inverse d'un modèle de la matrice d'interaction \mathbf{L} . Elle lie les variations des primitives visuelles au vecteur vitesse de la caméra $\mathbf{T} = [\mathbf{V}, \mathbf{W}]^T$:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}\mathbf{T} \quad (20)$$

Si l'on désire une décroissance exponentielle de la fonction de tâche \mathbf{e} vers $\mathbf{0}$ et si la scène est supposée statique la loi de commande en vitesse est donnée par :

$$\mathbf{T} = -\lambda \hat{\mathbf{L}}^+(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (21)$$

La matrice jacobienne \mathbf{L} joue donc un rôle central pour la synthèse de la commande. Dans la suite, après avoir choisi le vecteur de primitives visuelles \mathbf{s} , nous donnons la forme analytique de la matrice d'interaction pour les combinaisons miroir hyperbolique-caméra perspective et miroir parabolique-caméra orthographique.

3.1 Miroir hyperbolique-caméra perspective

Les coefficients A_{hi} de la forme quadratique (se référer à (16)) sont définis à un facteur non nul près. Afin d'utiliser ces coefficients dans la boucle de commande, il est donc nécessaire d'éliminer ce facteur. On peut pour cela diviser chaque coefficient de la forme quadratique par une combinaison linéaire adéquate de ceux-ci. Afin de minimiser, l'ensemble des configurations dégénérées (telles que le paramètre de normalisation soit nul), nous avons choisi A_{h5} comme paramètre de normalisation. Dans ce cas, l'ensemble des configurations dégénérées pour le plan d'interprétation est donné par le plan $Z = 0$ (cas où la projection d'une droite de l'espace est une droite dans l'image catadioptrique). Le vecteur des primitives visuelles est donc :

$$\mathbf{s} = \frac{1}{A_{h5}} \begin{pmatrix} A_{h0} \\ A_{h1} \\ A_{h2} \\ A_{h3} \\ A_{h4} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Le calcul de la matrice d'interaction pour ce vecteur de primitives est basé sur la décomposition suivante de la matrice d'interaction :

$$\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{n}} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \mathbf{r}} \quad (23)$$

Le premier terme $\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{n}}$ représente l'interaction entre le mouvement des primitives visuelles dans l'image et les variations du vecteur normal au plan d'interprétation. Le second terme $\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \mathbf{r}}$ lie les variations du vecteur normal aux mouvements de la caméra. En notant que [1] :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{h}} = -\mathbf{W} \times \mathbf{h} \\ \dot{\mathbf{n}} = -\mathbf{V} \times \mathbf{h} - \mathbf{W} \times \mathbf{n} \end{cases} \quad (24)$$

nous obtenons l'interaction entre les variations du vecteur normal et les mouvements de la caméra $\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \mathbf{r}}$:

$$\begin{pmatrix} 0 & -u_z & u_y & 0 & -n_z & n_y \\ u_z & 0 & -u_x & n_z & 0 & -n_x \\ -u_y & u_x & 0 & -n_y & n_x & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

L'interaction entre le mouvement des primitives visuelles dans l'image et les variations du vecteur normal au plan d'interprétation $\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{n}}$ est aisément obtenue en dérivant (22) par rapport aux composantes de \mathbf{n} :

$$\frac{1}{c_2 n_z^2} \begin{pmatrix} 2c_2 n_x & 0 & -2(c_1 n_z + \frac{c_2 n_x^2 - c_1 n_z^2}{n_z}) \\ 0 & 2c_2 n_y & -2(c_1 n_z + \frac{c_2 n_y^2 - c_1 n_z^2}{n_z}) \\ c_2 n_y & c_2 n_x & -2c_2 \frac{n_x n_y}{n_z} \\ c_3 n_z & 0 & -c_3 n_x \\ 0 & c_3 n_z & -c_3 n_y \end{pmatrix} \quad (26)$$

La matrice d'interaction est alors obtenue en utilisant (23). Ce jacobien est de rang 2, son noyau est donné par les vecteurs suivants :

$$\begin{aligned} & (1, \frac{-u_3 n_z^2 - n_y u_2 n_z - u_3 n_x^2}{n_y (n_x u_3 - u_1 n_z)}, 0, 0, \frac{u_3^2 n_z + n_y u_2 u_3 + u_3 n_x u_1}{n_y (n_x u_3 - n_z u_1)}, 0) \\ & (0, \frac{n_y n_x + n_x^3 + n_x n_z^2}{n_y (n_x u_3 - n_z u_1)}, 0, 0, -\frac{n_x u_3 n_z + n_y^2 u_1 + n_x^2 u_1}{n_y (n_x u_3 - n_z u_1)}, 1) \\ & (0, \frac{u_1 n_x^2 + n_x n_y u_2 + n_x^2 u_1}{n_y (n_x u_3 - u_1 n_z)}, 1, 0, -\frac{u_3 n_z u_1 + n_y u_1 u_2 + n_x u_1^2}{n_y (n_x u_3 - n_z u_1)}, 0) \\ & (0, \frac{n_z^2 + n_x n_y^2 + n_x n_z^2}{n_y (n_x u_3 - n_z u_1)}, 0, 1, \frac{u_3 n_z^2 + n_x u_1 n_z + u_3 n_y^2}{n_y (n_x u_3 - n_z u_1)}, 0) \end{aligned}$$

Il faut donc au minimum trois droites pour contrôler les six degrés de liberté de la caméra. Si l'on considère un ensemble de n droites la matrice d'interaction correspondante est :

$$\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1^T \dots \mathbf{L}_n^T]^T$$

3.2 Miroir parabolique-caméra orthographique

De la même manière que dans le cas d'une combinaison miroir hyperbolique-caméra perspective, les coefficients A_{pi} de la forme quadratique (se référer à (21)) sont définis à un facteur multiplicatif près. Il faut donc les normaliser. Nous avons choisi, de la même manière que dans le cas précédent A_{p5} comme paramètre de normalisation. Le vecteur des primitives visuelles est donc :

$$\mathbf{s} = \frac{1}{A_{p5}} \begin{pmatrix} A_{p3} \\ A_{p4} \end{pmatrix} \quad (27)$$

L'interaction entre les variations du vecteur normal et les mouvements de la caméra est de nouveau donnée par (25) et l'interaction entre le mouvement des primitives visuelles dans l'image et les variations du vecteur normal au plan d'interprétation est aisément obtenue en dérivant (27) par rapport aux composantes de \mathbf{n} :

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{n}} = \frac{1}{a_p n_z} \begin{pmatrix} -1 & 0 & \frac{n_x}{n_z} \\ 0 & -1 & \frac{n_y}{n_z} \end{pmatrix} \quad (28)$$

La matrice d'interaction est alors obtenue en utilisant (23). Ce jacobien est de rang 2, son noyau est donné par les vecteurs suivants :

$$\begin{aligned} & (1, -\frac{u_3 n_z^2 + u_3 n_x^2 + n_y n_z u_2}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 0, 0, \frac{u_3 n_x u_1 + u_3 n_y u_2 + u_3^2 n_z}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 0) \\ & (0, \frac{n_x^3 + n_x n_y^2 + n_x n_z^2}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 0, 0, -\frac{u_3 n_x n_z + n_y^2 u_1 + n_x^2 u_1}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 1) \\ & (0, \frac{n_x n_y u_2 + n_x^2 u_1 + u_1 n_z^2}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 1, 0, -\frac{n_x u_3 u_1 + n_y u_1 u_2 + n_x u_1^2}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 0) \\ & (0, -\frac{n_z^3 + n_y^2 n_z + n_x n_z^2}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 0, 1, \frac{u_3 n_z^2 + n_x u_1 n_z + u_3 n_y^2}{n_y (u_3 n_x - u_1 n_z)}, 0) \end{aligned}$$

Il faut également au minimum trois droites pour contrôler les six degrés de liberté de la caméra.

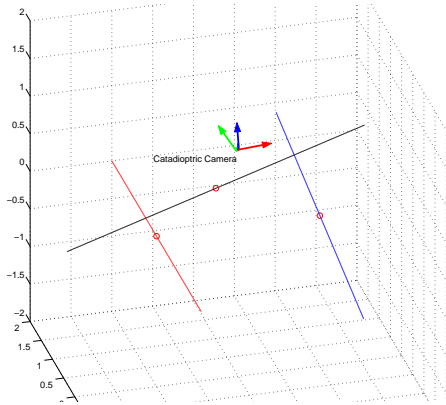


FIG. 4 – Scène 3D

4 Résultats

Dans cette partie, nous présentons des résultats de simulation de l'asservissement visuel omnidirectionnel à partir de droites en utilisant la loi de commande (21). Nous distinguerons les cas des combinaisons miroir hyperbolique-caméra perspective et miroir parabolique-caméra orthographique. Dans les résultats de simulation que nous présenterons, l'attitude initiale du repère caméra par rapport au repère du monde est donnée par $\mathbf{r}_i = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$ (les trois premiers termes de \mathbf{r}_i étant les composantes de translation en mètre et les trois derniers les composantes de rotation en radians). L'image désirée est acquise à la position de la caméra donnée par $\mathbf{r}_d = [0.1, 0.1, 1.1, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8}]^T$. Les trois droites utilisées durant l'asservissement visuel sont définies dans l'espace du monde par les coordonnées de Plücker suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\mathfrak{S}1) : \left(\begin{array}{l} u_1 = (0 \ 1 \ 0)^T \\ n_1 = (0 \ 0 \ -1)^T \end{array} \right) \\ (\mathfrak{S}2) : \left(\begin{array}{l} u_2 = (0 \ 0.9806 \ 0.1961)^T \\ n_2 = (0 \ -0.1961 \ 0.9806)^T \end{array} \right) \\ (\mathfrak{S}3) : \left(\begin{array}{l} u_3 = (0.9623 \ 0.1925 \ 0.1925)^T \\ n_3 = (0.1961 \ 0 \ -0.9806)^T \end{array} \right) \end{array} \right.$$

La figure 4 est une représentation de la scène 3D (les droites de l'espace et la caméra dans sa position initiale). Les figures 5 à 7 sont relatives à la combinaison miroir hyperbolique-caméra hyperbolique et les figures 8 à 10 relatives à la combinaison miroir parabolique-caméra orthographique. Avec les deux combinaisons, les résultats obtenus sont satisfaisants. En particulier, comme on peut le constater sur les figures représentant les erreurs, la tâche de positionnement est correctement réalisée dans les deux cas.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une stratégie de commande de robots manipulateurs à six degrés de liberté en utilisant comme entrée d'une boucle d'asservissement visuel des primitives relatives à la projection de droites dans le plan image d'une caméra panoramique.

La matrice d'interaction a été obtenue dans les cas des combinaisons miroirs hyperbolique-caméra perspective et miroir parabolique-caméra orthographique, ce qui a permis la construction d'une loi de commande adéquate. Dans la suite de ces travaux nous souhaitons étudier le cas des robots non-holonomes.

Références

- [1] N. Andreff, B. Espiau, et R. Horaud. Visual servoing from lines. *International Journal of Robotics Research*, 21(8) :679–700, Aout 2002.
- [2] S. Baker et S. K. Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *International Journal of Computer Vision*, 35(2) :1–22, Novembre 1999.
- [3] F. Chaumette. *La relation Vision-Commande : théorie et application à des tâches robotiques*. Thèse de doctorat Université de Rennes I, France, 1990.
- [4] F. Chaumette. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *The Confluence of Vision and Control*, D. Kriegman, G. Hager, A.Morse (eds), LNCIS Series, Springer Verlag, 237 :66–78, 1998.
- [5] P. Corke et S. Hutchinson. A new partitioned approach to image-based visual servo control. Dans *IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2521–2526, Sydney, Décembre 2000.
- [6] N.J. Cowan, G.A.D. Lopes, et D.E. Koditschek. Rigid body visual servoing using navigation functions. Dans *IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, pages 3920–3926, Sydney, Australie, 2000.
- [7] F. Martin, J. P. Barreto et R. Horaud. Visual servoing/tracking using central catadioptric images. Dans *ISER2002 - 8th International Symposium on Experimental Robotics*, pages 863–869, Bombay, India, Juillet 2002.
- [8] R. Benosman et S. Kang. *Panoramic Vision*. Springer Verlag, 2000.
- [9] E. Malis, F. Chaumette, et S. Boudet. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(2) :238–250, Avril 1999.
- [10] P. Martinet et J. Gallice. Position based visual servoing using a nonlinear approach. Dans *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 531–536, Kyongju, Corée du Sud, Octobre 1999.
- [11] Y. Mezouar and F. Chaumette. Path planning for robust image-based control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(4) :534–549, Aout 2002.
- [12] T. Pajdla, T. Svoboda, and V. Hlavac. *Panoramic Vision : Sensors, Theory and Applications*, chapter Epipolar Geometry of Central Panoramic Catadioptric Cameras, pages 73–102. R. Benosman and S. B. Kang, 2001.
- [13] E. Malis S. Benhimane. Vision-based control with respect to planar and non-planar objects using a zooming camera. Dans *IEEE International Conference on Advanced Robotics*, Juillet 2003.
- [14] C. Samson and B. Espiau. Application of the task function approach to sensor-based-control of robot manipulators. In *11th IFAC World Congress*, volume 9, pages 286–291, Tallin, Estonie, URSS, Aout 1990.

Miroir hyperbolique-caméra perspective

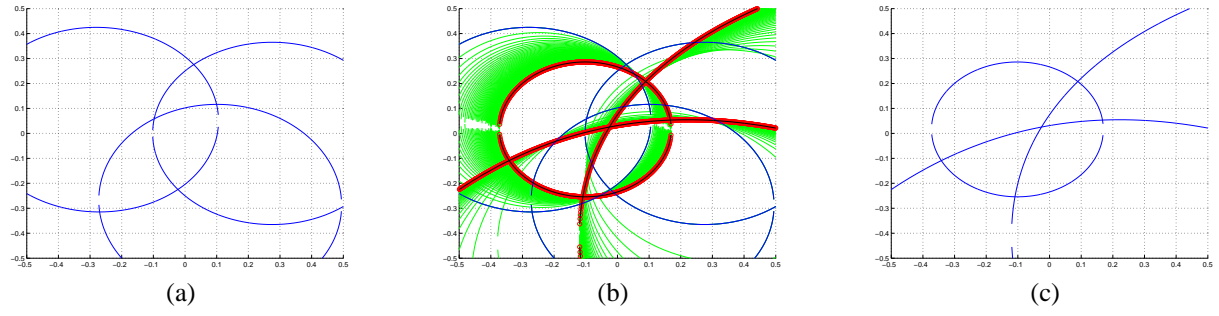


FIG. 5 – (a) Image initiale, (b) trajectoire de la projection des droites dans l'image, (c) image désirée

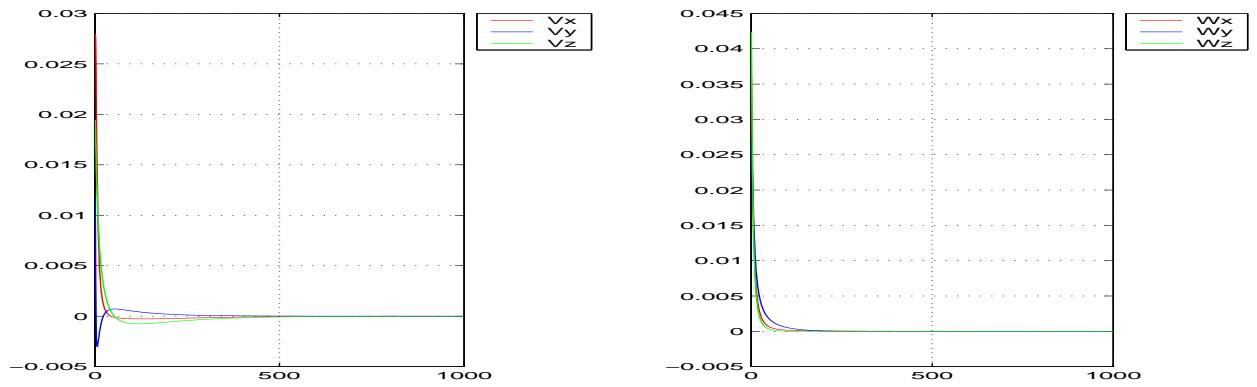


FIG. 6 – Vitesse de translation [m/s] et vitesse de rotation [rad/s]

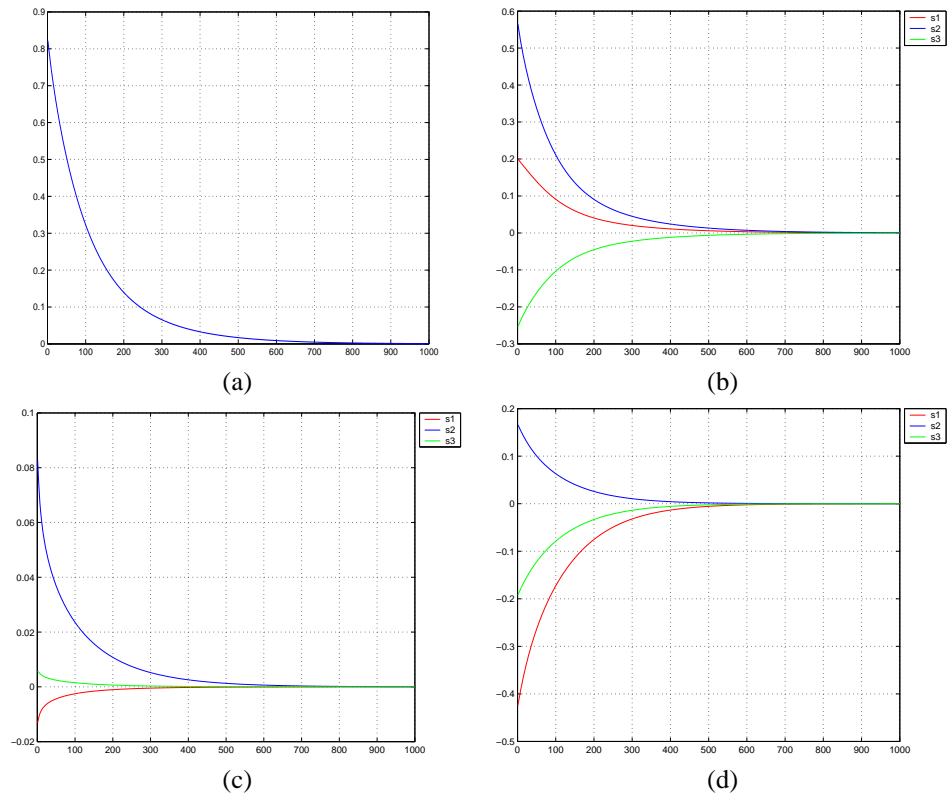


FIG. 7 – (a) norme de l'erreur $\|s - s^*\|$, (b) erreur sur les primitives visuelles pour la première droite, (c) erreur sur les primitives visuelles pour la deuxième droite, (d) erreur sur les primitives visuelles pour la troisième droite

Miroir parabolique-caméra orthographique

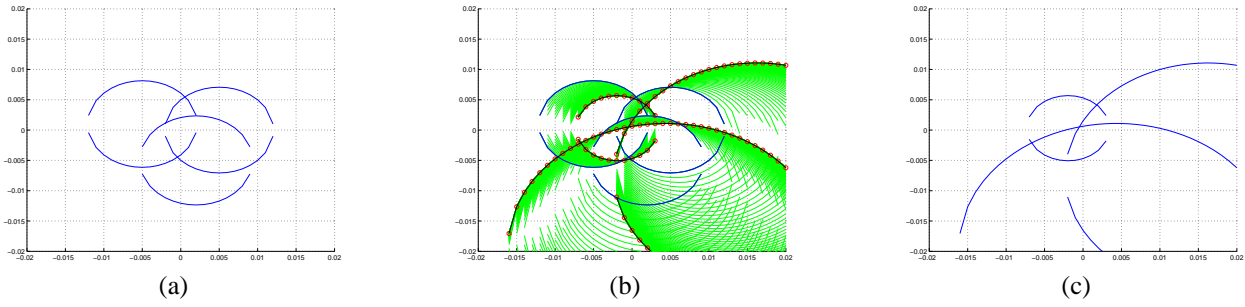


FIG. 8 – (a) Image initiale, (b) trajectoire de la projection des droites dans l'image, (c) image désirée

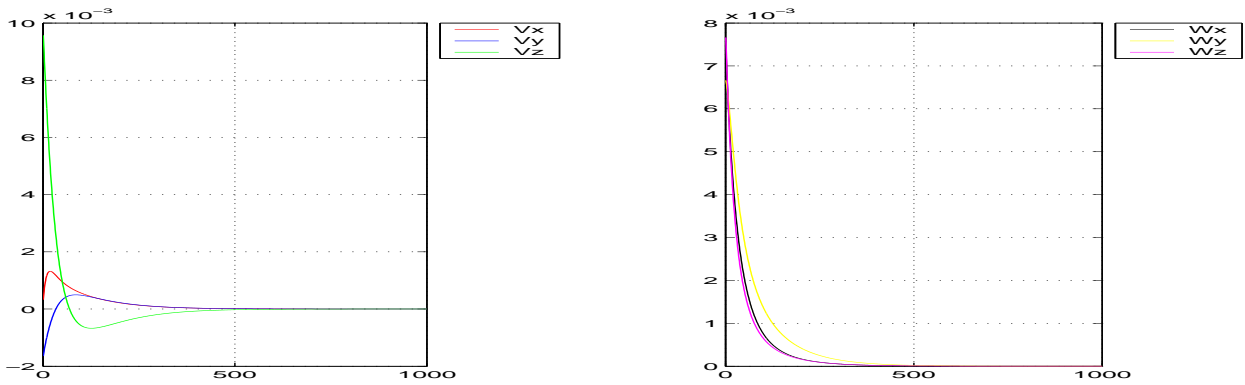


FIG. 9 – Vitesse de translation [m/s] et vitesse de rotation [rad/s]

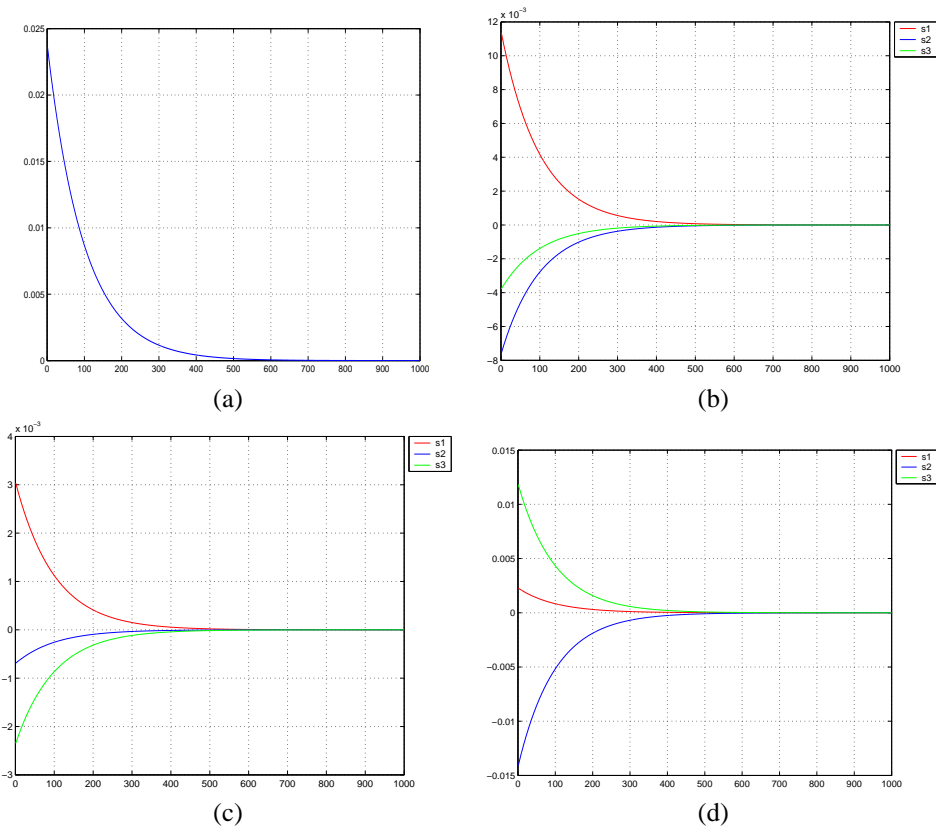


FIG. 10 – (a) norme de l'erreur $\|s - s^*\|$, (b) erreur sur les primitives visuelles pour la première droite, (c) erreur sur les primitives visuelles pour la deuxième droite, (d) erreur sur les primitives visuelles pour la troisième droite