

# Couplage asservissement visuel et lumière structurée pour la réalisation d'une tâche de positionnement plan à plan

Jordi Pagès<sup>†</sup> Christophe Collewet<sup>‡</sup> François Chaumette<sup>\*</sup> Joaquim Salvi<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Institut d'Informàtica i Aplicacions  
University of Girona  
Girona, Spain

<sup>‡</sup> Cemagref  
17 Avenue de Cucillé  
Rennes, France

<sup>\*</sup> IRISA / INRIA Rennes  
Campus Universitaire de Beaulieu  
Rennes, France

**Abstract**— Cet article traite de la réalisation d'une tâche de positionnement par asservissement visuel consistant à amener une caméra en face d'un objet supposé plan. Notre approche est basée sur l'utilisation de plusieurs faisceaux laser fixés sur la caméra de telle façon que leur configuration géométrique permettent l'obtention d'un ensemble d'informations visuelles particulièrement intéressant du point de vue de la loi de commande. Par conséquent, le but ici de la lumière structurée n'est pas tant de faciliter le traitement de l'image ou encore d'apporter de l'information dans le cas de figure d'un objet faiblement texturé mais surtout de conduire à l'élaboration d'une loi de commande particulièrement optimisée. En effet, nous montrerons que cette façon de faire permet d'obtenir des propriétés intéressantes de découplage, de stabilité, mais aussi permet l'obtention d'une trajectoire optimale de la caméra.

## I. INTRODUCTION

Les asservissements visuels 2D permettent la réalisation de tâches robotiques directement à partir d'informations visuelles acquises par une caméra solidaire d'un porteur [4]. Le but consiste à amener la caméra à une position désirée de telle sorte qu'un ensemble d'informations visuelles décrites par un  $k$ -vecteur  $\mathbf{s}$  deviennent en position désirée le  $k$ -vecteur  $\mathbf{s}^*$  appelé consigne visuelle.

La vitesse  $\dot{\mathbf{s}}$  de ces informations visuelles peut alors être reliée à la vitesse relative caméra/objet par la relation suivante :

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_{\mathbf{S}} \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

où  $\mathbf{L}_{\mathbf{S}}$  est la matrice dite d'interaction et  $\mathbf{v} = (V_x \ V_y \ V_z \ \Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z)^T$  la vitesse relative caméra/objet ou *torseur cinématique*. Ce torseur est composé de 3 termes de translation et de 3 termes de rotation. Généralement, cette relation linéaire est utilisée pour synthétiser une loi de commande basée sur la régulation à zéro de la fonction de tâche suivante :

$$\mathbf{e} = \mathbf{C}(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (2)$$

où  $\mathbf{C}$  est une matrice de *combinaison* choisie égale à l'identité quand le nombre d'axes contrôlés est égal à la dimension de  $\mathbf{s}$ . Par suite, en imposant une décroissance exponentielle de la fonction de tâche :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e} \quad (3)$$

il vient la loi de commande :

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{S}}^+ \mathbf{e} \quad (4)$$

où  $\lambda$  est un gain positif et  $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{S}}^+$  la pseudo-inverse d'une estimation de la matrice d'interaction.

Le bon comportement d'une tâche d'asservissement visuel repose sur le choix judicieux d'un ensemble d'informations visuelles et sur l'obtention de la matrice d'interaction associée. À la lumière de travaux précédents sur ce sujet, nous pouvons identifier 3 conditions importantes portant sur les informations visuelles garantissant un bon comportement du système bouclé :

- En premier lieu, les informations visuelles choisies doivent permettre la convergence du système. Une condition suffisante la garantissant est telle que la matrice d'interaction associée aux informations visuelles ne soit pas singulière ou, le cas échéant, que les singularités soient limitées en nombre et clairement identifiées. Une façon d'éviter ce problème consiste à déterminer un ensemble d'informations visuelles découplées de telle façon qu'une information visuelle ne contrôle qu'un unique axe. Même si élaborer une telle loi de commande semble hors de portée, des travaux récents s'y sont intéressés [2], [8].

- Il est également important de minimiser le nombre de conditionnement de la matrice d'interaction. En effet, il est bien connu que le minimiser améliore la robustesse de la loi de commande vis-à-vis du bruit des informations visuelles mais améliore également sa stabilité [3].

- Finalement, même en présence d'une décroissance exponentielle de la fonction de tâche  $\mathbf{e}$ , la trajectoire de la caméra peut ne pas être satisfaisante. Cela est dû à d'importantes non linéarités présentes dans la matrice d'interaction  $\mathbf{L}_{\mathbf{S}}$ . Cependant, il a été montré qu'elles pouvaient être réduites en choisissant correctement les informations visuelles [7], [10] conduisant ainsi à une meilleure trajectoire 3D.

Les travaux présentés ici exploitent les potentialités de la lumière structurée vis-à-vis de l'amélioration des performances de l'asservissement visuel. Un des premiers avantages d'une telle utilisation consiste à simplifier grandement le traitement de l'image [9]. En effet, il ne dépend plus de la texture ou de la forme de l'objet. Le second est relatif directement à l'asservissement visuel. En effet, nous verrons que cette façon de faire permet d'obtenir d'une matrice d'interaction optimale.

La littérature ne rapporte que très peu de travaux concernant le couplage de la lumière structurée et de l'asservissement visuel. Andreff *et al.* [1] ont introduit dans leur schéma de commande un faisceau laser dans le but de contrôler la distance de la caméra à l'objet. De façon similaire, Krupa *et al.* [6] ont fixé un faisceau laser à un instrument chirurgical

de manière à contrôler sa distance par rapport à un organe. Précisons que dans ce cas le laser et l'organe sont observés par une caméra statique. D'une façon générale, la plupart des applications utilisent la lumière structurée pour le contrôle d'un unique axe ou pour simplifier le traitement d'images. Très peu de travaux ont traité le cas de plusieurs axes. La contribution majeure dans ce domaine est due à Motyl *et al.* [5]. En effet, ils ont modélisé la variation des informations visuelles obtenues par projection d'un plan laser sur des objets plans ou sphériques dans le but de réaliser une tâche de positionnement par asservissement visuel.

En fait, les potentialités inhérentes au couplage de la lumière structurée et de l'asservissement visuel n'ont pas encore été pleinement exploitées. En effet, nous verrons, qu'en contraignant la configuration géométrique des faisceaux laser, il est possible d'obtenir une loi de commande optimale en terme de minimisation des singularités de la matrice d'interaction, de robustesse mais également en obtenant une trajectoire 3D de la caméra satisfaisante. Ces travaux constituent en fait un premier pas vers l'optimisation de la matrice d'interaction vis-à-vis d'un ensemble d'informations visuelles, c'est pourquoi nous nous focaliserons ici sur le cas d'un objet de forme simple, un objet plan.

## II. PROJECTION D'UN FAISCEAU LASER SUR UN PLAN

Le cas le plus simple de couplage asservissement visuel/lumière structurée s'obtient en considérant un faisceau laser fixé à une caméra conduisant à l'obtention d'un point 3D sur l'objet (voir la figure 1).

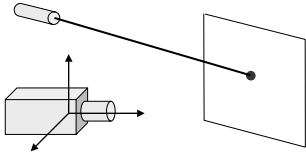


Fig. 1. Cas d'un faisceau laser fixé sur une caméra observant un objet plan.

La matrice d'interaction  $\mathbf{L}_x$  correspondant à l'information visuelle obtenue par projection du point 3D sur le capteur a été obtenue par Motyl *et al.* [5]. Pour ce faire, le faisceau laser a été modélisé grâce à l'intersection de deux plans. De ce fait, la matrice d'interaction résultante fait intervenir 12 termes 3D : 4 termes pour la modélisation du plan de l'objet considéré et 4 autres termes pour chacun des plans intervenant dans la modélisation du faisceau laser. Même en considérant que ces deux derniers plans sont orthogonaux, la matrice d'interaction obtenue reste complexe.

Dans le but de limiter le nombre de termes 3D intervenant dans la matrice d'interaction nous proposons une autre façon de procéder. Pour ce faire, nous modélisons le faisceau laser sous la forme vectorielle suivante :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_r + \lambda \mathbf{u} \quad (5)$$

Notons que  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  est le vecteur directeur unitaire porté par le faisceau laser et  $\mathbf{X}_r = (X_r, Y_r, Z_r)$  l'origine de ce faisceau. Le plan de l'objet s'exprime, quant à lui, sous la forme :

$$A_3 X + B_3 Y + C_3 Z + D_3 = 0 \quad (6)$$

où  $\mathbf{u} = (A_3, B_3, C_3)$  est le vecteur unitaire normal au plan.

Il est alors possible d'exhiber la profondeur du point d'intersection du plan de l'objet avec le faisceau laser en fonction des coordonnées normalisées  $x = X/Z$  et  $y = Y/Z$  correspondant à la projection du point visé dans le plan image :

$$Z = -\frac{D_3}{A_3 x + B_3 y + C_3}. \quad (7)$$

Par suite, grâce à (5) et (7) et à l'utilisation des coordonnées normalisées, il vient une expression de  $\lambda$  en fonction du plan de l'objet et de l'origine du faisceau :

$$\lambda = -\frac{1}{\mu} (A_3 X_r + B_3 Y_r + C_3 Z_r + D_3) \quad (8)$$

où  $\mu = \mathbf{n}^T \mathbf{u} \neq 0$ . En effet,  $\mu$  ne s'annule que si l'intersection entre le faisceau et le plan est vide, auquel cas la normale au plan et le vecteur directeur sont orthogonaux.

Connaissant  $\lambda$ , et en tenant compte que  $\mathbf{X}_r$  et  $\mathbf{u}$  ne varient pas dans le repère de la caméra, il vient une expression de la dérivée temporelle de  $\lambda$  :

$$\dot{\lambda} = \eta_1 \dot{A}_3 + \eta_2 \dot{B}_3 + \eta_3 \dot{C}_3 + \eta_4 \dot{D}_3 \quad (9)$$

avec :

$$\begin{cases} \eta_1 &= -(\lambda u_x + X_r)/\mu &= -xZ/\mu \\ \eta_2 &= -(\lambda u_y + Y_r)/\mu &= -yZ/\mu \\ \eta_3 &= -(\lambda u_z + Z_r)/\mu &= -Z/\mu \\ \eta_4 &= -1/\mu \end{cases} \quad (10)$$

Par suite, à partir des dérivées temporelles de  $A_3, B_3, C_3$  et  $D_3$  impliquées dans (9) et données dans [5], (9) ne dépend plus que de  $\mathbf{u}, \mathbf{X}_r, \mathbf{u}, D_3$  et  $\mathbf{v}$ . De plus, les coordonnées du vecteur directeur unitaire  $\mathbf{u}$  peuvent s'exprimer en fonction des deux points  $\mathbf{X}_r$  et  $\mathbf{X}$  comme suit :

$$\mathbf{u} = (\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) / \|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r\| \quad (11)$$

En substituant cette dernière relation dans (9), l'expression obtenue ne dépend plus explicitement de l'orientation du faisceau. Cette orientation est maintenant implicite dans le point  $\mathbf{X}_r$ , le point dans le plan image  $(x, y)$  et sa profondeur  $Z$ .

Dans ces conditions, le calcul de  $\dot{x}$  et  $\dot{y}$  devient immédiat. En effet, en dérivant chaque composante de (5), les relations suivantes sont obtenues :

$$\dot{\mathbf{X}} = \dot{\lambda} \mathbf{u} \quad (12)$$

qui par utilisation des formules de transformation perspective deviennent :

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\dot{\mathbf{X}}}{Z} - \frac{\mathbf{X}}{Z^2} \dot{Z} \Rightarrow \dot{\mathbf{x}} = \frac{\dot{\lambda}}{Z} (\mathbf{u} - \mathbf{x} \cdot u_z) \quad (13)$$

After some developments, and choosing as reference point  $\mathbf{X}_r = (X_0, Y_0, 0)$  we obtain the following interaction matrix

$$\mathbf{L}_x = \frac{1}{\Pi_0} \begin{pmatrix} \frac{-A_3 X_0}{Z} & \frac{-B_3 X_0}{Z} & \frac{-C_3 X_0}{Z} & X_0 \varepsilon_1 & X_0 \varepsilon_2 & X_0 \varepsilon_3 \\ \frac{-A_3 Y_0}{Z} & \frac{-B_3 Y_0}{Z} & \frac{-C_3 Y_0}{Z} & Y_0 \varepsilon_1 & Y_0 \varepsilon_2 & Y_0 \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (14)$$

where

$$\begin{aligned} \Pi_0 &= A_3(X_0 - xZ) + B_3(Y_0 - yZ) - C_3 Z \\ \varepsilon_1 &= B_3 - yC_3 \\ \varepsilon_2 &= C_3 x - A_3 \\ \varepsilon_3 &= A_3 y - B_3 x \end{aligned}$$

Signalons que par rapport à la matrice d'interaction proposée par Motyl *et al.*, le nombre de paramètres concernant le faisceau laser a été réduit de 8 à 3. Ces paramètres sont  $X_0$ ,  $Y_0$  and  $Z$ . Concernant le nombre de paramètres décrivant l'objet, il a été également diminué, il est passé de 4 à 3. En effet,  $D_3$  s'exprime maintenant en fonction des coordonnées image  $(x, y)$ , de la profondeur  $Z$  du point et de la normale au plan (voir la relation (7)).

Par ailleurs, en remarquant que le rang de la matrice d'interaction est toujours égal à l'unité, on en déduit que la variation des coordonnées  $x$  et  $y$  du point sont liées et par suite que la trajectoire dans l'image est une ligne droite. Cette contrainte avait déjà été mise en évidence dans [1].

### III. UTILISATION DE FAISCEAUX LASER POUR LA RÉALISATION D'UNE TÂCHE DE POSITIONNEMENT

Nous montrons dans cette section comment il est possible de réaliser une tâche de positionnement consistant à amener la caméra en face de l'objet grâce à l'utilisation de faisceaux laser. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur les 3 points suivants : augmenter la robustesse de loi de commande vis-à-vis du bruit contenu dans l'image tout en augmentant sa stabilité, découpler les axes contrôlés et améliorer la trajectoire de la caméra. Pour ce faire, il nous faut définir le nombre de faisceaux laser à utiliser puis la façon de les positionner les uns par rapport aux autres.

Précisons également qu'un plan ayant 3 degrés de liberté, seuls 3 axes de la caméra seront contrôlés. En théorie, 3 lasers sont donc suffisants pour contrôler les axes de la caméra pourvus qu'ils ne conduisent pas à 3 points alignés (auquel cas la matrice d'interaction serait singulière). Cependant, nous préconisons l'utilisation de 4 lasers. En effet, nous verrons qu'en choisissant leur configuration spatiale il est possible d'optimiser la loi de commande par rapport aux 3 points évoqués au début de cette section.

Plus précisément, nous proposons de placer les 4 faisceaux laser à chaque sommet d'une croix centrée au point principal et dont les axes coïncident avec les axes  $X$  et  $Y$  de la caméra comme rapporté sur la figure 2. De plus, nous imposons que la direction des lasers soit parallèle à celle de l'axe optique. Nous nommerons dorénavant  $L$  la distance d'un laser au point principal.

Avec une telle configuration, une image symétrique est obtenue en position désirée de la caméra comme le montre la figure 3.

Dans ces conditions les coordonnées de l'origine de chaque laser ainsi que les coordonnées désirées dans l'image sont données dans le tableau I.

Le premier élément visuel que nous proposons est la surface du quadrilatère défini par les 4 points dans l'image. C'est une information visuelle qui a déjà été largement

TABLE I

COORDONNÉES DE L'ORIGINE DES LASERS ET COORDONNÉES DÉSIRÉES DANS L'IMAGE.

Laser	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$x^*$	$y^*$
1	0	L	0	0	L/Z
2	-L	0	0	-L/Z	0
3	0	-L	0	0	-L/Z
4	L	0	0	L/Z	0

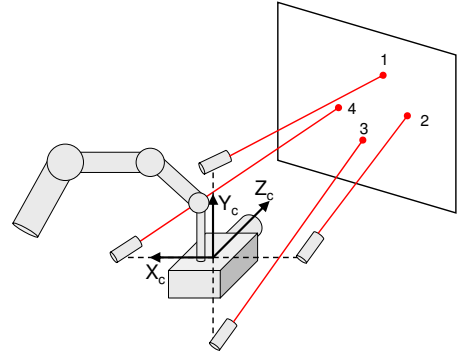


Fig. 2. Configuration des faisceaux laser.

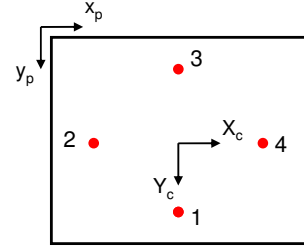


Fig. 3. Image obtenue en position désirée.

utilisée pour le contrôle de la profondeur comme dans [7] et [10] par exemple.

Dans notre cas, la surface formée par les 4 points dans l'image peut être obtenue en sommant la surface des triangles définis respectivement par les points 1, 2 et 3 puis 3, 4 et 1. Nous obtenons ainsi :

$$a = \frac{1}{2} ((x_3 - x_1)(y_4 - y_2) + (x_2 - x_4)(y_3 - y_1)) \quad (15)$$

conduisant à la matrice d'interaction suivante calculée en position désirée :

$$\mathbf{L}_a^{\parallel} = ( 0 \ 0 \ 4L^2/Z^3 \ 0 \ 0 \ 0 ) \quad (16)$$

Les deux axes restant à contrôler le sont en considérant les informations visuelles construites à partir des 4 segments virtuels représentés sur la figure 4. Plus précisément, nous utilisons les angles formés par les segments adjacents tels que l'angle  $\alpha_j$  soit construit grâce aux segments  $l_{jk}$  et  $l_{ji}$ . Par suite,  $\alpha_j$  est obtenu par :

$$\sin \alpha_j = \frac{\|u \times v\|}{\|u\| \|v\|} \quad \cos \alpha_j = \frac{u \cdot v}{\|u\| \|v\|} \quad (17)$$

qui devient en développant les produits scalaire et vectoriel en fonction des coordonnées des sommets :

$$\alpha_j = \arctan \frac{(x_k - x_j)(y_i - y_j) - (x_i - x_j)(y_k - y_j)}{(x_k - x_j)(x_i - x_j) + (y_k - y_j)(y_i - y_j)} \quad (18)$$

La matrice d'interaction correspondante s'obtient facilement en dérivant  $f(x) = \arctan(x)$  par rapport au temps, soit  $\dot{f}(x) = \dot{x}/(1+x^2)$ . En choisissant  $\alpha_{13} = \alpha_1 - \alpha_3$  et  $\alpha_{24} = \alpha_2 - \alpha_4$ , il vient en position désirée la matrice d'interaction recherchée :

$$\mathbf{L}_{\alpha_{13}}^{\parallel} = ( 0 \ 0 \ 0 \ 2L/Z \ 0 \ 0 ) \\ \mathbf{L}_{\alpha_{24}}^{\parallel} = ( 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2L/Z \ 0 ). \quad (19)$$

À ce stade, en considérant les informations visuelles  $\mathbf{s} = (a, \alpha_{13}, \alpha_{24})$  nous obtenons une matrice diagonale conduisant

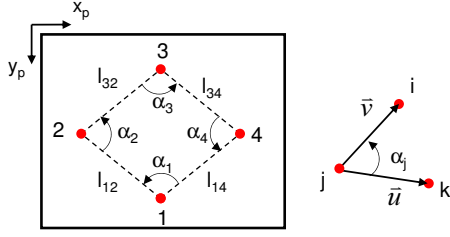


Fig. 4. Définitions des segments virtuels et de l'angle  $\alpha_j$ .

à un comportement découplé de la loi de commande (dans un voisinage de la position désirée) et absente de singularité.

Cependant, nous pouvons observer que les termes non nuls de la matrice d'interaction sont inversement proportionnels à  $Z^3$  ou à  $Z$ , donc non constants. Ces termes vont conduire à un comportement non satisfaisant de la trajectoire de la caméra. Comme spécifié dans [7], un comportement satisfaisant est obtenu lorsque chaque information visuelle contrôle un unique axe, ce que nous avons obtenu, mais aussi lorsque la fonction d'erreur relative à cet axe varie de façon proportionnelle à la vitesse de l'axe. Par exemple, concernant l'information visuelle  $a$ , nous recherchons une information visuelle  $a_n$  dont la dérivée en fonction du temps est proportionnelle à  $V_z$ . Remarquons tout d'abord que lorsque la caméra est en face de l'objet la surface 3D  $A$  obtenue à partir du carré formé par les 4 points sur l'objet ne dépend pas de la profondeur. Cela est vrai parce que la direction de chaque laser est parallèle à celle de l'axe  $Z$ . Elle prend pour valeur  $2L^2$ . En outre, la surface 2D est liée à la surface 3D par la relation  $a = A/Z^2$ . D'après (16), il vient alors :

$$\dot{a} = \frac{4L^2}{Z^3} V_z = \frac{2}{Z^3} A V_z. \quad (20)$$

Par conséquent, puisque la dérivée temporelle de la surface projetée  $a$  dépend de l'inverse de la profondeur, il est possible de chercher une information visuelle de la forme  $a_n = a^\gamma$  qui permettra de supprimer la dépendance vis-à-vis de  $Z$ . En effet,  $\gamma$  peut être déterminé comme suit :

$$a_n = a^\gamma \Rightarrow \dot{a}_n = \gamma a^{\gamma-1} \dot{a} = \frac{2\gamma A^\gamma}{Z^{2\gamma+1}} V_z \quad (21)$$

où l'on impose :

$$2\gamma + 1 = 0 \Rightarrow \gamma = -1/2 \quad (22)$$

qui fournit par suite une relation indépendante de  $Z$ .

Par conséquent, la matrice d'interaction relative à  $a_n = 1/\sqrt{a}$  s'écrit :

$$\mathbf{L}_{\alpha_{-1/2}}^{\parallel} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1/(\sqrt{2}L) & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

De la même façon, il est possible d'obtenir des matrices d'interaction constantes en choisissant  $\alpha_{13n} = \alpha_{13}/\sqrt{a}$  et  $\alpha_{24n} = \alpha_{24}/\sqrt{a}$ . On obtient alors :

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\alpha_{13n}}^{\parallel} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \mathbf{L}_{\alpha_{24n}}^{\parallel} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

#### IV. COMPARAISON AVEC UNE APPROCHE UTILISANT DES PRIMITIVES POINT

Nous nous proposons dans cette section de comparer les performances des informations visuelles proposées dans la section précédente avec celles qui seraient obtenues directement à partir des coordonnées des 4 points. Cette comparaison

est réalisée du point de vue de l'analyse de la stabilité de la loi de commande en présence d'un défaut d'alignement de la configuration spatiale des lasers. En effet, en pratique, il n'est pas garanti qu'ils soient placés de façon symétrique par rapport au point principal dont la position n'est qu'approximativement connue. Nous considérons donc un défaut d'alignement entre la position réelle et idéale modélisé grâce à la matrice de transformation suivante :

$${}^c\mathbf{M}_l = \begin{pmatrix} {}^c\mathbf{R}_l & {}^c\mathbf{T}_l \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

L'analyse de la stabilité locale du système bouclé s'effectue en considérant la relation suivante :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{C} \mathbf{L}_s^* (\widehat{\mathbf{C} \mathbf{L}_s})^{-1} \mathbf{e} \quad (26)$$

où  $\widehat{\mathbf{L}_s^*}$  est une estimation de la matrice d'interaction en position désirée et pour une configuration parfaitement alignée et centrée avec le repère de la caméra.  $\mathbf{L}_s^*$  représente la matrice d'interaction réelle en position désirée quand un mauvais alignement de la croix est considéré (décrit grâce à (25)). Dans ces conditions, la stabilité locale est assurée quand la partie symétrique du produit des matrices est positif, soit quand la partie réelle des valeurs propres de la matrice résultante est positif. Toutefois, en pratique, si un désalignement complet est considéré, le calcul devient trop complexe et ne permet pas d'aboutir. Nous utilisons donc un modèle de déformation plus simple où seules des translations sont prises en compte. Le modèle décrit par (25) devient alors simplement  ${}^c\mathbf{R}_l = \mathbf{0}_3$  et  ${}^c\mathbf{T}_l = (\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ . L'utilisation de cette déformation conduit maintenant aux valeurs données dans le tableau II concernant les origines des lasers et les coordonnées des sommets du carré en position désirée. Ces valeurs sont utilisées pour calculer la matrice réelle  $\mathbf{L}_s^*$  alors que les paramètres idéaux du tableau I (obtenus pour un alignement parfait) sont utilisés pour calculer  $\widehat{\mathbf{L}_s^*}$ . Dans les deux cas, puisque les matrices d'interaction ont des composantes nulles suivant  $V_x$ ,  $V_y$  et  $\Omega_z$ , nous pouvons les réduire à des matrices  $3 \times 3$  et choisir pour  $\mathbf{C}$  la matrice identité.

TABLE II  
ORIGINE DES LASERS ET COORDONNÉES EN POSITION DÉSIRÉE EN PRÉSENCE D'UN DÉALIGNEMENT.

Laser	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$x^*$	$y^*$
1	$\epsilon_x$	$L + \epsilon_y$	$\epsilon_z$	$\epsilon_x/Z$	$(L + \epsilon_y)/Z$
2	$-L + \epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\epsilon_z$	$(\epsilon_x - L)/Z$	$\epsilon_y/Z$
3	$\epsilon_x$	$-L + \epsilon_y$	$\epsilon_z$	$\epsilon_x/Z$	$(\epsilon_y - L)/Z$
4	$L + \epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\epsilon_z$	$(L + \epsilon_x)/Z$	$\epsilon_y/Z$

Analysons tout d'abord la stabilité locale résultant de l'ensemble visuel formé par  $\mathbf{s} = (x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4)$ . En calculant les valeurs propres de la partie symétrique du produit de matrice  $\mathbf{L}_s^* (\widehat{\mathbf{L}_s^*})^{-1}$  et en imposant leur positivité, il vient la condition suivante :

$$\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 < 2L^2 \quad (27)$$

qui n'est rien d'autre que l'équation d'un cercle de rayon  $\sqrt{2}L$ . Remarquons que  $\epsilon_z$  n'affecte pas la stabilité locale du système alors que les déplacements dans le plan  $XY$  du centre de la croix sont tolérés si ce déplacement reste inclus dans le cercle.

Par contre, quand cette même analyse est menée dans le cas du motif visuel défini par  $\mathbf{s} = (a_n, \alpha_{13_n}, \alpha_{24_n})$ , toutes les valeurs propres non nulles sont égales à 1. Cela signifie que, contrairement au motif visuel précédent, la stabilité locale est assurée quelque soit le déplacement de la croix par rapport au point principal.

## V. ASSERVISSEMENT VISUEL 3D

Comme nous avons supposé la configuration géométrique des lasers connue, il est légitime de considérer un asservissement visuel de type 3D puisque dans ce cas l'équation du plan de l'objet peut être obtenue par reconstruction 3D des 4 points d'intersection des faisceaux avec le plan de l'objet. Ce plan peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{1}{Z} = \alpha x + \beta y + \gamma \quad (28)$$

où  $\alpha = -A_3/D_3$ ,  $\beta = -B_3/D_3$  et  $\gamma = -C_3/D_3$ .

L'asservissement visuel 3D est connu pour produire une trajectoire 3D optimisée dans le sens où une ligne droite est obtenue. Toutefois, elle s'obtient dans le cas idéal où la pose est correctement calculée et la caméra parfaitement calibrée. Considérons ici le cas où  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont estimés à chaque itération et où un petit désalignement de la configuration spatiale est introduit. Plus précisément, nous supposons l'orientation des lasers correcte mais considérons un déplacement du centre de la croix de 5 mm suivant chacun des axes par rapport au point principal. Pour cette simulation la caméra est située à 1.5 m de l'objet, elle est orientée respectivement de 25 et 20 degrés par rapport aux axes  $X$  et  $Y$ . Le but de la tâche est de rendre les deux plans, le plan image et le plan de l'objet parallèles et distants de 60 cm. Les résultats sont représentés sur la figure 5.

Comme on peut le constater sur la figure 5.a, la trajectoire de la caméra n'est pas une ligne droite. En outre, la décroissance de l'erreur n'est pas exponentielle (5.c). De plus, si un désalignement plus important est considéré (1 cm ou plus) la loi de commande ne converge plus. En conclusion, comme prévu, l'approche basée sur l'asservissement visuel 3D est très sensible à la calibration du système et n'est donc pas recommandée.

## VI. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous comparons dans cette section les performances du motif visuel proposé avec celui obtenu directement à partir des coordonnées des sommets du quadrilatère dans l'image. La plate-forme expérimentale est constituée d'un porteur à 6 degrés de liberté sur lequel est embarquée une caméra où un dispositif permet d'assurer que chaque laser est distant de  $L = 15$  cm du centre de la croix formée par les lasers. Le but de la tâche consiste à amener, à une distance de 95 cm, la caméra parallèlement à un plan placé devant elle. L'image désirée a été acquise dans cette configuration.

La première expérimentation a été réalisée à partir d'un déplacement de  $-20$  cm suivant l'axe  $Z$  et pour des orientations d'environ  $-40$  et  $20$  degrés par rapport à la position désirée. Les résultats de l'asservissement utilisant les coordonnées des points sont représentés sur la figure 6a, ceux correspondant au motif proposé sont représentés sur la figure 6b. Comme nous pouvons le constater sur l'image finale, les lasers ne sont pas parfaitement alignés avec les axes de la caméra

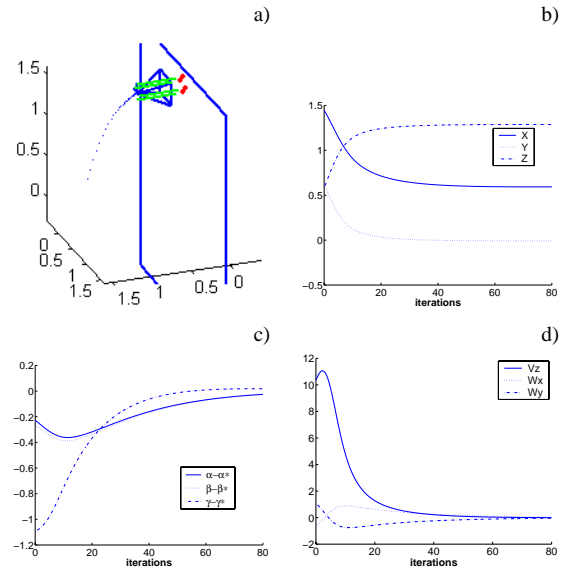


Fig. 5. Asservissement 3D dans le cas de petites erreurs de calibration : a) Trajectoire de la caméra dans un repère fixe. b) Coordonnées du point principal dans un repère fixe. c) Erreurs sur les informations visuelles. d) Composantes du torseur cinématique (cm/s ou deg/s).

conduisant ainsi à une image non symétrique. Toutefois, la convergence reste assurée même dans le cas de l'utilisation des points. Par ailleurs, comme prévu, la trajectoire des lasers dans l'image est une ligne droite. Remarquons que, dans le cas de l'approche basé sur les points, la décroissance de l'erreur est quasiment exponentielle. En revanche, la vitesse de la caméra n'est pas exponentielle. Cela est dû aux non linéarités présentes dans la matrice d'interaction. Dans le cas de l'ensemble visuel proposé, un comportement exponentiel est observé dans les deux cas. Concernant le conditionnement des matrices d'interaction l'utilisation du motif proposé conduit à une valeur plus faible (3.3 contre 11.2 pour le cas des points).

Une deuxième expérimentation a été réalisée dans le but de tester l'influence d'une erreur de positionnement du dispositif de fixation des lasers. Plus précisément, l'ensemble des 4 lasers a été déplacé de 6 cm le long de l'axe  $X$ . La consigne a été réapprise, puis la caméra a été déplacée de 40 cm suivant l'axe  $Z$  et de  $-20$  et  $20$  degrés suivant les rotations d'axes  $X$  et  $Y$  respectivement. Dans ce cas, l'approche basée sur les points ne converge pas alors que celle basée sur notre motif visuel converge comme en témoigne la figure 6c. Toutefois, dû à ce désalignement, la trajectoire des points 1 et 3 n'est plus parallèle à l'axe  $Y$ . Vraisemblablement pour la même raison, l'information  $\alpha_{24_n}$  contrôlant  $\Omega_y$  ne présente plus un comportement purement exponentiel alors que cela est toujours le cas pour celles contrôlant  $V_z$  et  $\Omega_x$ .

Ce résultat expérimental vis-à-vis de la robustesse à un désalignement des lasers n'est pas surprenant, il ne fait que corroborer l'étude menée à la section IV sur la stabilité locale. Intuitivement il se comprend également puisque les informations visuelles utilisées sont invariantes aux rotations, aux translations et au changement d'échelle dans l'image (certes dans le cas où le plan image et le plan objet sont parallèles).



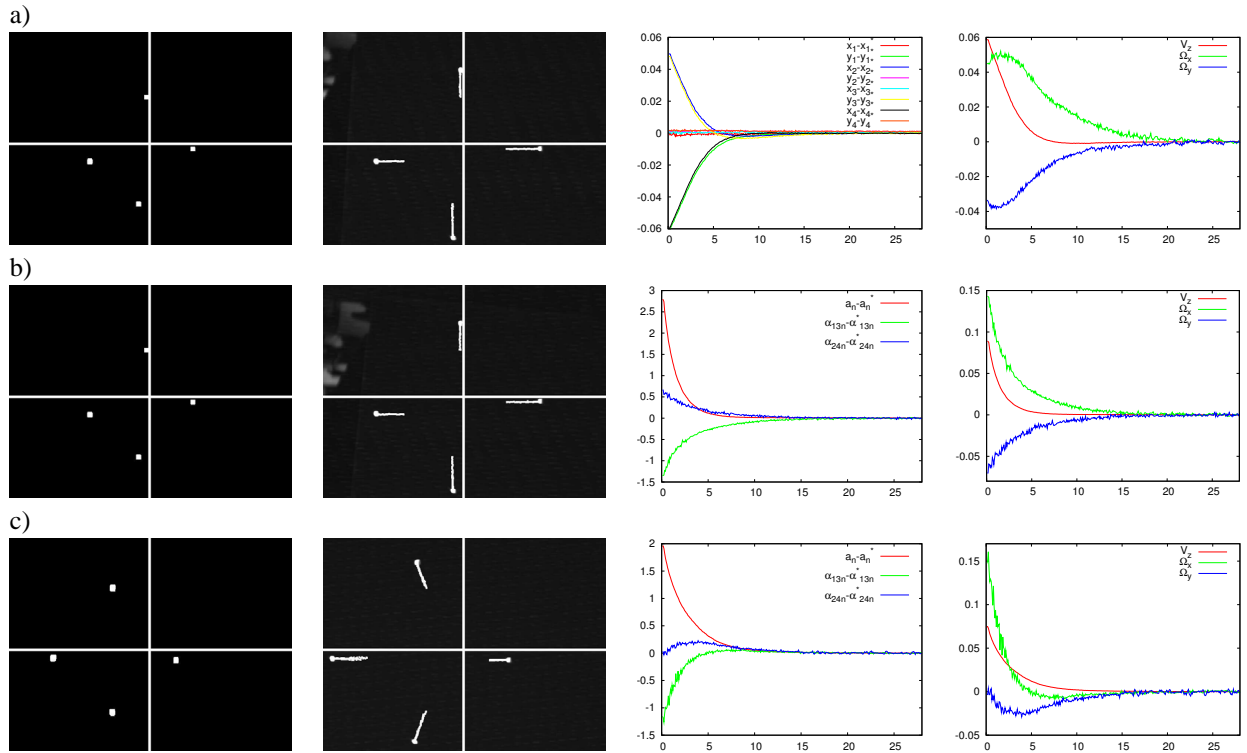


Fig. 6. a) 1<sup>re</sup> expérimentation — Utilisation des coordonnées des points, b) 1<sup>re</sup> expérimentation — Utilisation du motif proposé, c) 2<sup>ime</sup> expérimentation. Pour toutes les colonnes (de gauche à droite) : image initiale ; image finale (avec la trajectoire des points laser) ; information visuelle  $s - s^*$  en fonction du temps (en s) ; vitesses de la caméra (m/s et rad/s) en fonction du temps (en s)

## VII. CONCLUSIONS

Nous nous sommes intéressés dans ce papier à la réalisation d'une tâche de positionnement consistant à rendre parallèles le plan image et celui de l'objet et cela à une distance donnée. Pour ce faire, une approche basée sur le couplage asservissement visuel/lumière structurée a été présentée. Il a pu être montré que de cette manière le comportement du système bouclé pouvait être optimisé suivant plusieurs aspects : stabilité, découplage et bon conditionnement de la matrice d'interaction mais aussi trajectoire satisfaisante de la caméra.

Le capteur utilisé est composé de quatre pointeurs laser placés symétriquement par rapport à la caméra et suivant une orientation identique à celle de l'axe optique. Une telle configuration permet de définir un motif visuel garantissant (dans un voisinage de la position désirée) une forte robustesse vis-à-vis du dispositif de fixation des lasers contrairement à une approche classique utilisant les coordonnées des points dans l'image. De plus, les non linéarités de la matrice d'interaction ont été supprimées conduisant à un comportement similaire entre les informations visuelles et les vitesses de la caméra.

Les avantages de l'approche proposée ont été clairement mis en évidence grâce à l'étude de la stabilité local du système et aux résultats expérimentaux obtenus.

## REFERENCES

- [1] N. Andreff, B. Espiau, and R. Horaud. Visual servoing from lines. *Int. Journal of Robotics Research*, 21(8) :679–700, August 2002.
- [2] P. I. Corke and S. A. Hutchinson. A new partitioned approach to image-based visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 17(4) :507–515, August 2001.
- [3] J. T. Feddema, C. S. G. Lee, and O. R. Mitchell. Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 7(1) :31–47, February 1991.
- [4] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke. A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5) :651–670, 1996.
- [5] D. Khadraoui, G. Motyl, P. Martinet, J. Gallice, and F. Chaumette. Visual servoing in robotics scheme using a camera/laser-stripe sensor. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5) :743–750, 1996.
- [6] A. Krupa, J. Gangloff, M. Mathelin, C. Doignon, G. Morel, L. Soler, J. Leroy, and J. Marescaux. Autonomous retrieval and positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing and laser pointers. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3769–3774, Washington, DC, USA, May 2002.
- [7] R. Mahony, P. Corke, and F. Chaumette. Choice of image features for depth-axis control in image-based visual servo control. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, September 2002.
- [8] E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 15(2) :238–250, April 1999.
- [9] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, 37(4) :827–849, 2004.
- [10] O. Tahri and F. Chaumette. Image moments : Generic descriptors for decoupled image-based visual servo. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1185–1190, New Orleans, LA, April 2004.