



HAL
open science

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

Pagès Jordi, Collewet Christophe, Chaumette François, Salvi Joaquim

► To cite this version:

Pagès Jordi, Collewet Christophe, Chaumette François, Salvi Joaquim. Couplage asservissement visuel et lumière structurée pour la réalisation d'une tâche de positionnement plan à plan. Journées jeunes chercheurs en robotique, JCCR'18, Sep 2004, Douai, France. hal-04221805

HAL Id: hal-04221805

<https://hal.inrae.fr/hal-04221805v1>

Submitted on 30 Sep 2023

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.

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

Jordi Pagès[†] Christophe Collewet[‡] François Chaumette^{*} Joaquim Salvi[†]

[†] Institut d'Informàtica i Aplicacions
University of Girona
Girona, Spain

[‡] Cemagref
17 Avenue de Cucillé
Rennes, France

^{*} 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 :

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

où \mathbf{L}_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 :

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

où λ est un gain positif et $\widehat{\mathbf{L}}_S^+$ 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}_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).

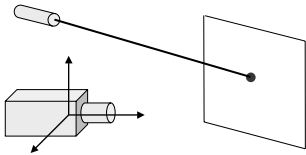


Fig. 1. Cas d'un faisceau laser fixé sur une caméra observant un objet plan.

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 :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} A_4 \\ B_4 \\ C_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Notons que (A_4, B_4, C_4) est le vecteur directeur unitaire porté par le faisceau laser et (X_r, Y_r, Z_r) l'origine de ce faisceau. Le plan de l'objet s'exprime, quant à lui, sous la forme :

$$A_3X + B_3Y + C_3Z + D_3 = 0 \quad (6)$$

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 :

$$Z = -\frac{D_3}{A_3x + B_3y + C_3}. \quad (7)$$

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

$$\lambda = -\frac{1}{\mu} (A_3X_r + B_3Y_r + C_3Z_r + D_3) \quad (8)$$

où $\mu = A_3A_4 + B_3B_4 + C_3C_4 \neq 0$. En effet, μ 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 λ , et en tenant compte que X_r, Y_r, Z_r et A_4, B_4, C_4 ne varient pas dans le repère de la caméra, il vient une expression de la dérivée temporelle de λ :

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

avec :

$$\begin{cases} \eta_1 = -(\lambda A_4 + X_r)/\mu = -xZ/\mu \\ \eta_2 = -(\lambda B_4 + Y_r)/\mu = -yZ/\mu \\ \eta_3 = -(\lambda C_4 + Z_r)/\mu = -Z/\mu \\ \eta_4 = -1/\mu \end{cases} \quad (10)$$

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 $(A_4 \ B_4 \ C_4)^T, (X_r \ Y_r \ Z_r)^T, (A_3 \ B_3 \ C_3 \ D_3)^T$ et \mathbf{v} . De plus, les coordonnées du vecteur directeur unitaire $(A_4 \ B_4 \ C_4)^T$ peuvent s'exprimer en fonction des deux points $(X_r \ Y_r \ Z_r)^T$ et $(X \ Y \ Z)$ comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_4 \\ B_4 \\ C_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\|(X, Y, Z)^T - (X_r, Y_r, Z_r)^T\|} \begin{pmatrix} X - X_r \\ Y - Y_r \\ Z - Z_r \end{pmatrix} \quad (11)$$

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 $(X_r \ Y_r \ Z_r)^T$, le point dans le plan image $(x \ y)^T$ 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 :

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{\lambda}A_4 \\ \dot{Y} = \dot{\lambda}B_4 \\ \dot{Z} = \dot{\lambda}C_4 \end{cases} \quad (12)$$

qui par utilisation des formules de transformation perspective deviennent :

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X}{Z^2} \dot{Z} \\ \dot{y} = \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y}{Z^2} \dot{Z} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{\lambda}(A_4 - xC_4)}{Z} \\ \dot{y} = \frac{\dot{\lambda}(B_4 - yC_4)}{Z} \end{cases} \quad (13)$$

et qui fournissent la matrice d'interaction recherchée. Elle est donnée en (14) (en haut de la page suivante) où nous avons choisi $(X_r, Y_r, Z_r) = (X_0, Y_0, 0)$.

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

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

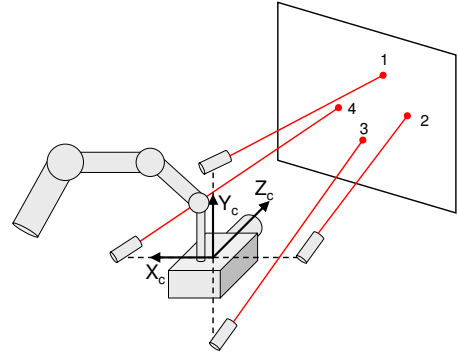


Fig. 2. Configuration des faisceaux laser.

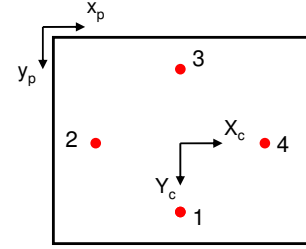


Fig. 3. Image obtenue en position désirée.

Les moments dans l'image d'un nuage de points discrets peuvent être obtenus par :

$$m_{pq} = \sum_k^n x_k^p y_k^q \quad (15)$$

où n est le nombre de points et où (p, q) définit l'ordre du moment considéré. Notons que le moment d'ordre 0, m_{00} , est égal au nombre de points et ne représente donc pas la surface. Comme dans [10], nous utilisons l'approximation suivante pour le calcul de la surface :

$$a = (\mu_{20} + \mu_{02})/2 \quad (16)$$

où μ_{pq} défini le moment centré obtenu par :

$$\mu_{pq} = \sum_k^n (x_k - x_g)^p (y_k - y_g)^q. \quad (17)$$

Par suite, il est possible d'obtenir l'expression de la surface en fonction des coordonnées des 4 points dans l'image :

$$a = \frac{1}{4} \left(\frac{3}{2} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2) - x_1(x_2 + x_3 + x_4) - x_2(x_3 + x_4) - x_3x_4 - y_1(y_2 + y_3 + y_4) - y_2(y_3 + y_4) - y_3y_4 \right) \quad (18)$$

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

$$\mathbf{L}_a^{\parallel} = (0 \ 0 \ 4L^2/Z^3 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (19)$$

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 α_j soit construit grâce aux segments l_{jk} et l_{ji} . Par suite, α_j est obtenu par :

$$\sin \alpha_j = \frac{\|u \times v\|}{\|u\| \|v\|} \quad \cos \alpha_j = \frac{u \cdot v}{\|u\| \|v\|} \quad (20)$$

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

avec $\Pi_0 = A_3(X_0 - xZ) + B_3(Y_0 - yZ) - C_3Z$.

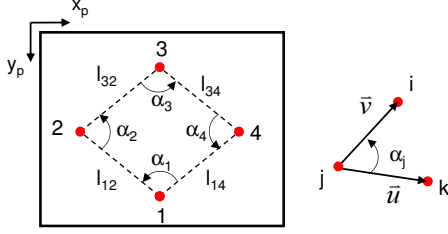


Fig. 4. Définitions des segments virtuels et de l'angle α_j .

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

$$\alpha_j = \arctan \frac{(x_k - x_j)(y_i - y_j) - (x_i - x_j)(y_k - y_j)}{(x_k - x_j)(x_i - x_j) + (y_k - y_j)(y_i - y_j)} \quad (21)$$

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 :

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\alpha_{13}}^{\parallel} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2L/Z & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \mathbf{L}_{\alpha_{24}}^{\parallel} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 2L/Z & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (22)$$

À ce stade, en considérant les informations visuelles $\mathbf{s} = (a, \alpha_{13}, \alpha_{24})$ nous obtenons une matrice diagonale conduisant 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 (19), il vient alors :

$$\dot{a} = \frac{4L^2}{Z^3} v_z = \frac{2}{Z^3} A v_z. \quad (23)$$

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, γ peut être déterminé comme suit :

$$a_n = a^\gamma \Rightarrow \dot{a}_n = \gamma a^{\gamma-1} \dot{a} = \frac{2\gamma A^\gamma}{Z^{2\gamma+1}} v_z \quad (24)$$

où l'on impose :

$$2\gamma + 1 = 0 \Rightarrow \gamma = -1/2 \quad (25)$$

qui fournit par suite une relation indépendante de Z .

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

$$\mathbf{L}_{a^{-1/2}}^{\parallel} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1/(\sqrt{2}L) & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\alpha_{13n}}^{\parallel} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \mathbf{L}_{\alpha_{24n}}^{\parallel} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

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 :

$${}^c\mathbf{M}_l = \begin{pmatrix} {}^c\mathbf{R}_l & {}^c\mathbf{T}_l \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

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

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{C} \mathbf{L}_s^* (\widehat{\mathbf{C} \mathbf{L}_s^*})^{-1} \mathbf{e} \quad (29)$$

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 (28)). Dans ces conditions, la stabilité locale est assurée quand le produit des matrices est positif, soit quand la partie réelle des valeurs propres de la matrice résultante est réelle. 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 (28) 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 $\widehat{\mathbf{L}}_s^*$.

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	ϵ_x	$L+\epsilon_y$	ϵ_z	ϵ_x/Z	$(L+\epsilon_y)/Z$
2	$-L+\epsilon_x$	ϵ_y	ϵ_z	$(\epsilon_x-L)/Z$	ϵ_y/Z
3	ϵ_x	$-L+\epsilon_y$	ϵ_z	ϵ_x/Z	$(\epsilon_y-L)/Z$
4	$L+\epsilon_x$	ϵ_y	ϵ_z	$(L+\epsilon_x)/Z$	ϵ_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 du produit de matrice $\mathbf{CL}_s^*(\widehat{\mathbf{CL}}_s^*)^{-1}$ et en imposant leur positivité, il vient la condition suivante :

$$\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 < 2L^2 \quad (30)$$

qui n'est rien d'autre que l'équation d'un cercle de rayon $\sqrt{2}L$. Remarquons que ϵ_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 $\mathbf{s} = (a_n, \alpha_{n13}, \alpha_{n24})$, 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. RÉSULTATS DE SIMULATION

Nous comparons dans cette section les performances du motif visuel proposé avec deux approches classiques : un asservissement visuel 2D basé sur l'utilisation des coordonnées des sommets du quadrilatère dans l'image et un asservissement visuel 3D basé sur une estimation de la pose de l'objet à chaque itération.

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 :

$$\frac{1}{Z} = \alpha x + \beta y + \gamma \quad (31)$$

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 α , β et γ 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

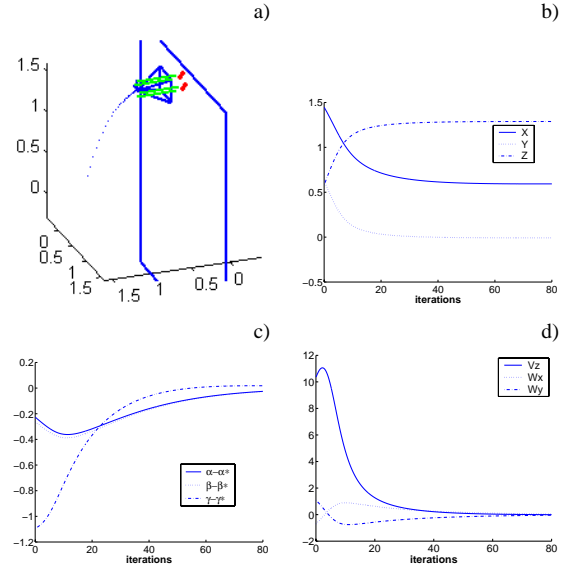


Fig. 5. Asservissement 3D dans le cas de petites erreurs de calibration : a) Trajectoire de la caméra dans un repère fixe. b) Coordonnées du point principal dans un repère fixe. c) Erreurs sur les informations visuelles. d) Composantes du torseur cinématique (cm/s ou deg/s).

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.

Comparons maintenant le comportement de la loi de commande lorsque les informations visuelles de type point sont utilisées et lorsque les informations visuelles proposées à la section III sont utilisées. Nous considérons tout d'abord le cas d'un petit désalignement de la croix par rapport au point principal soit un déplacement de 12, 8, et -15 mm respectivement sur chaque axe. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 6 et 7 respectivement dans le cas des points et du motif proposé. La trajectoire de la caméra est fortement affectée dans le cas des primitives point alors que dans le cas des informations visuelles proposées un haut degré de robustesse est observé. De plus, la décroissance de la fonction de tâche n'est pas exponentielle et les composantes du torseur cinématique ne sont pas découplées, contrairement au comportement observé avec le motif visuel proposé.

Pour terminer, nous considérons maintenant le cas d'une forte erreur d'alignement, les erreurs de translation suivantes sont introduites 50, 70 et -35 mm. De plus, une erreur d'orientation de la croix est considérée ici, respectivement 12, 10 et 8 degrés suivant les axes X , Y et Z . L'orientation des lasers est également modifiée, de l'ordre de 1 degré par rapport à la valeur exacte. Un bruit gaussien de déviation standard 1.5 pixels a été de plus ajouté aux coordonnées des points dans l'image. Les résultats sont rapportés sur la

figure 8. Comme on peut le constater le système converge même en présence des fortes erreurs introduites même si les composantes de rotation du torseur cinématique deviennent plus bruitées. Signalons que le contrôle de la profondeur est moins affecté par la présence de bruit. Précisons que dans ces conditions l'approche basée sur les points n'a pas convergé.

VI. 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.

La configuration géométrique des lasers proposée permet de définir un ensemble d'informations visuelles particulièrement robustes à la calibration géométrique des lasers et au bruit dans l'image, une trajectoire proche d'une ligne droite de la caméra peut être également obtenue.

Une analyse de la stabilité locale du système a permis de montrer la validité de notre approche, tout comme les résultats de simulation obtenus. En outre, ces résultats ont été confirmés par le biais de comparaison avec d'autres types d'asservissement ou d'informations visuelles. Dans tous les cas l'approche proposée s'est avérée être la plus robuste en présence de diverses erreurs de calibration ou de bruit.

La prochaine étape de ce travail consistera à valider ces premiers résultats sur site expérimental. Le cas des objets non plans sera également étudié.

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.

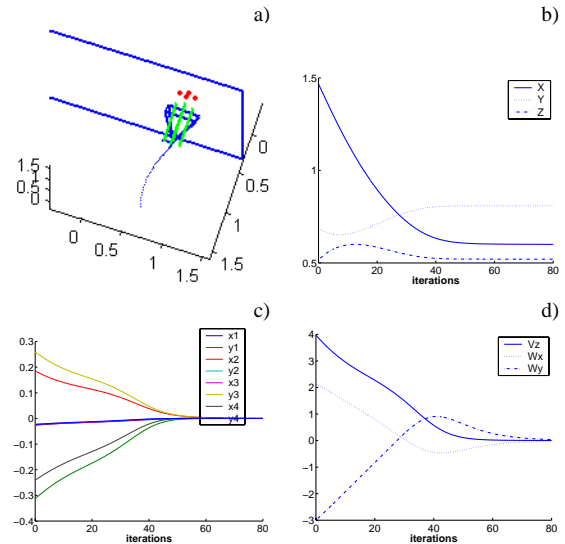


Fig. 6. Asservissement 2D basé sur des primitives de type point, cas de petites erreurs de calibration.

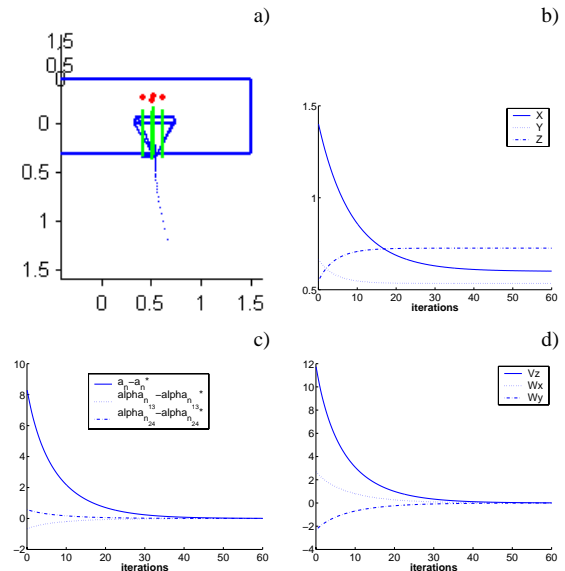


Fig. 7. Asservissement 2D basé sur le motif proposé, cas de petites erreurs de calibration.

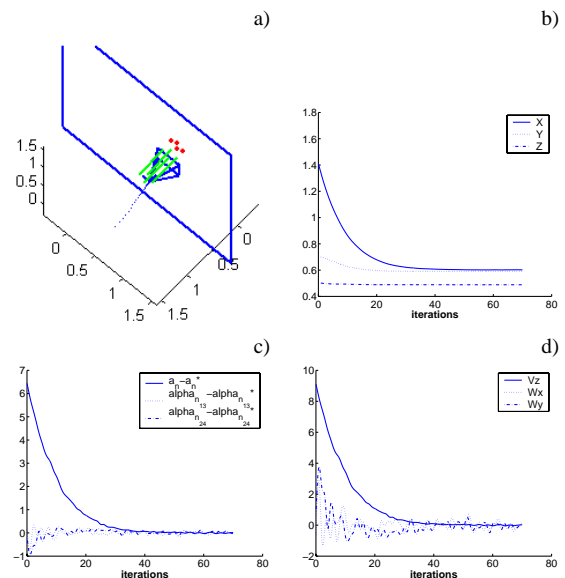


Fig. 8. Asservissement 2D basé sur le motif proposé, cas de fortes erreurs de calibration et de bruit dans l'image.