

# Positionnement relatif d'une caméra et d'une source lumineuse en utilisant les gradients d'intensité de l'image

Eric Marchand

INRIA, IRISA, CRI Rennes - Bretagne Atlantique, Rennes, France

e-mail : Eric.Marchand@irisa.fr

## Résumé

*Dans cette article nous proposons une solution originale à la commande des mouvements d'une caméra en utilisant uniquement l'information contenue dans les gradients de l'intensité lumineuse de l'image. Notre objectif est d'assurer à la fois une vision adéquate de l'objet et des conditions d'illumination optimales pour des tâches de vision (reconnaissance, positionnement, suivi, etc). En utilisant les techniques d'asservissement visuel, nous proposons de résoudre deux problèmes différents : maximiser l'intensité perçue et maximiser le contraste dans l'image. Les solutions proposées considèrent d'une part une caméra mobile et une source lumineuse statique et, d'autre part, une source lumineuse mobile et une caméra statique ou mobile. Des résultats expérimentaux sur des images synthétiques ou réelles sont proposés.*

## Abstract

*In this paper, we propose an original approach to control camera position and/or lighting conditions in an environment using image gradient information. Our goal is to ensure a good viewing condition and good illumination of an object to perform vision-based task (recognition, tracking, etc.). Within the visual servoing framework, we propose solutions to two different issues : maximizing the brightness of the scene and maximizing the contrast in the image. Solutions are proposed to consider either a static light and a moving camera, either a moving light and a static/moving camera. The proposed method is independent of the structure, color and aspect of the objects. Experimental results on both synthetic and real images are finally presented.*

## 1 Introduction

Dans cet article, nous étudions le problème du positionnement relatif entre un objet, une source lumineuse et une caméra. Assurer un positionnement optimal de la caméra ou de la source lumineuse est une étape essentielle pour le développement d'un système de vision industriel. Un bon éclairage assure en effet une bonne qualité de l'image et donc permet de simplifier et d'améliorer la robustesse des algorithmes de vision.

La plupart des recherches concernant l'illumination se fo-

calisent sur les problèmes de "shape from shading" (eg, [29]), de l'estimation de la position des sources lumineuses (eg, [13]), ou encore le suivi (eg, [17, 11]). Certains de ces travaux supposent la conservation de la luminance sur toute la séquence d'image [15] mais la plupart considèrent des modèle d'illumination plus complexe comme les modèles Phong [23] ou de Torrance-Sparrow [27]. Dans tous les cas, les travaux considérant les conditions d'illumination sont relativement rares principalement en ce qui concerne le contrôle de cette illumination ou la commande de caméra en fonction de l'illumination pour la réalisation de tâches robotique.

Sakane et Sato [24] présentent une méthode de planification automatique des positions de la caméra et d'une source lumineuse pour minimiser l'ombre induite par l'environnement. Cowan et al. [5, 7] étendent le système reposant sur des modèles CAO présenté dans [6] de manière à assurer que l'intensité lumineuse perçue de la surface de l'objet soit maintenue entre deux bornes correspondant aux saturations de la caméra (la surface ne devant être ni trop sombre, ni trop claire). Une extension de ce travail [7] vise à optimiser le placement de la source lumineuse afin d'améliorer le processus d'extraction de contour. Dans les deux cas, la méthode initialement proposée dans [6] est utilisée pour synthétiser les régions de l'espace 3D où la position de la caméra est compatible avec ces contraintes. Chaque critère (résolution, champ de vue, visibilité, contraste sur les contours, dynamique de la caméra, etc.) permet de définir une région spécifique de l'espace. L'intersection de ces régions définit l'ensemble des positions possibles de la caméra. Le système ICE décrit dans [28] par Yi *et al.* permet de calculer les meilleurs positions de la caméra et de la source lumineuse pour observer de manière optimale un contour à extraire et pour maximiser la précision de sa position. Les positions de la caméra et des sources lumineuses sont choisies de façon à ce que les mesures sur le contour soient obtenues avec un minimum d'incertitude. L'information principalement utilisée est le contraste et le modèle d'illumination est celui décrit dans [27]. Murase et Nayar [21] propose une méthode reposant sur l'analyse en composantes principale pour déterminer les conditions d'illumination pour lesquelles un objet se distingue facilement du fond pour des applications de reconnaissance. Eltoft et al. [8] présentent un système permettant d'améliorer

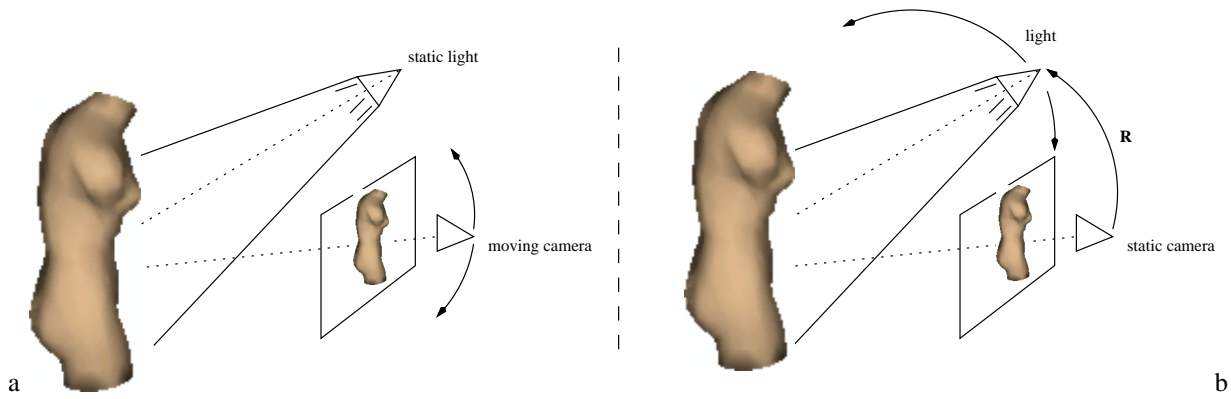


FIG. 1 – Commande des conditions d'éclairage. (a) éclairage statique/caméra mobile (b) éclairage mobile/caméra statique

rer l'extraction de primitives visuelles (contours ou points d'intérêt) par un processus d'illumination actif. Dans ce cas des modèles d'illumination plus complexes sont considérés [14, 26]. Précisons que dans la plupart de ces systèmes, une bonne connaissance de la géométrie des objets et de l'environnement est requise afin de pouvoir évaluer hors-ligne les différents critères permettant de déterminer la meilleure position de la source lumineuse et de la caméra.

Dans le contexte du suivi 2D, Hager et al.[12] ont dérivé la matrice d'interaction qui relie la variation de l'intensité lumineuse aux mouvements 2D de l'objet. Dans cet article, nous considérerons les modèles classiquement utilisés en analyse du mouvement pour déterminer la matrice d'interaction qui relie la variation de l'intensité lumineuse aux mouvements 3D de la caméra ou de la source lumineuse et qui est nécessaire à la commande. Évidemment le modèle retenu, reposant sur la dérivation de l'équation de contrainte du mouvement apparent (ECMA) est apparemment très restrictif. Il est cependant exact dans le cas d'une source lumineuse statique et d'un objet Lambertien. Les résultats expérimentaux montrent qu'il demeure valide en pratique au delà de ces conditions.

Dans le contexte de l'asservissement visuel, et en utilisant le formalisme de la redondance, nous proposons de résoudre deux problèmes différents : maximiser l'intensité perçue et maximiser le contraste dans l'image. Les solutions proposées considèrent d'une part une caméra mobile et une source lumineuse statique (voir Figure 1.a) et d'autre part une source lumineuse mobile et une caméra statique ou mobile (voir Figure 1.b). Les tâches proposées consistent à optimiser ces fonctions de coût en déplaçant automatiquement et par asservissement visuel soit la caméra, soit la source lumineuse.

Dans la suite de cet article nous rappellerons dans un premier temps l'équation de contrainte du mouvement apparent et montrerons comment elle peut être utilisée pour contrôler les mouvements d'une caméra (Section 2). Les fonctions de coût (section 3) reposant sur l'intensité lumineuse et le contraste et leur intégration dans des lois de commande d'asservissement visuel seront ensuite présen-

tées dans la section 4. Finalement des résultats expérimentaux démontreront la validité de cette approche.

## 2 Variation temporelle de l'information lumineuse

### 2.1 Équation de contrainte du mouvement apparent

L'hypothèse de base de notre approche repose sur l'invariance temporelle de l'intensité lumineuse perçue (luminance) pour un même point physique entre deux instants (deux images). Cette hypothèse permet d'obtenir l'équation de contrainte du mouvement apparent (ECMA) qui lie la variation temporelle de la luminance au mouvement 2D du point dans l'image.

Plus précisément, supposant que le point ait un déplacement  $(dx, dy)^T$  dans l'intervalle de temps  $dt$ , l'hypothèse précédente permet d'écrire [15] :

$$I(x + dx, y + dy, t + dt) = I(x, y, t). \quad (1)$$

Une développement de Taylor au premier ordre permet de déduire la relation suivante :

$$\frac{\partial I}{\partial x} dx + \frac{\partial I}{\partial y} dy + \frac{\partial I}{\partial t} dt = 0. \quad (2)$$

En notant  $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$  et  $\frac{dy}{dt} = \dot{y}$  le mouvement du point dans l'image et  $\nabla I_x = \frac{\partial I}{\partial x}$  et  $\nabla I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$  le gradient spatial de l'intensité et  $\frac{\partial I}{\partial t} = \dot{I}$  la variation temporelle de la luminance, nous obtenons finalement l'équation de contrainte du mouvement apparent donnée par :

$$\dot{I} = -\nabla I_x \dot{x} - \nabla I_y \dot{y} \quad (3)$$

### 2.2 Matrice d'interaction associée à la luminance

Notre objectif est de relier la variation temporelle de la luminance à la variation temporelle de la position de la caméra (ou le torseur cinématique de la caméra  $\mathbf{v} = (\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$  où  $\mathbf{v}$  est la vitesse de translation et  $\boldsymbol{\omega}$  est la vitesse de

rotation). Connaissant la matrice d'interaction associée au point :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -1/Z & 0 & x/Z & xy & -(1+x^2) & y \end{pmatrix} \mathbf{v} \quad (4)$$

qui peut se réécrire  $\dot{x} = \mathbf{L}_x \mathbf{v}$ ,

$$\dot{y} = \begin{pmatrix} 0 & -1/Z & y/Z & 1+y^2 & -xy & -x \end{pmatrix} \mathbf{v} \quad (5)$$

qui peut se réécrire  $\dot{y} = \mathbf{L}_y \mathbf{v}$ , et l'ECMA (équation (3)) nous avons

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial I}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

ou encore :

$$\dot{I} = -(\nabla I_x \mathbf{L}_x + \nabla I_y \mathbf{L}_y) \mathbf{v} = \mathbf{L}_{I(x,y)} \mathbf{v}. \quad (6)$$

$\mathbf{L}_{I(x,y)}$  est la matrice d'interaction associée à la luminance dans le cas d'un point mobile et d'une caméra fixe.

Évidemment, considérant les hypothèses nécessaires à la dérivation de l'ECMA, l'équation (6) n'est valable que dans le cas d'un environnement Lambertien (i.e., qui diffuse la lumière de façon uniforme dans toutes les directions) et pour une source de lumière fixe par rapport à l'objet. Cette hypothèse peut paraître restrictive mais nous verrons qu'en pratique le champ d'application est beaucoup plus large.

### 3 Contrôle des conditions d'illumination

Comme nous l'avons déjà mentionné, notre objectif premier est de contrôler l'illumination d'un objet. Pour cela nous allons considérer deux informations différentes relatives aux conditions d'éclairage :

- l'intensité globale de l'image (ou sur une sous partie de celle-ci). Pour notre tâche, l'objectif sera de maximiser la luminance perçue de l'objet dans l'image.
- le contraste. Maximiser la luminance n'est pas toujours un critère significatif. En effet, pour certains objets (principalement, mais pas uniquement, les objets non Lambertiens), trop de lumière peut supprimer de l'information (présence de spéularités par exemple). C'est pourquoi, un second critère peut consister à maximiser les gradients d'intensité dans l'image. Cette information sur les gradients (contours) est en effet directement reliée au contraste.

Considérant les spécifications de ces "bonnes" conditions d'éclairage, nous pouvons proposer deux fonctions de coût qui reflètent ces comportements.

#### 3.1 Maximiser la luminance

L'objectif est donc de positionner une caméra par rapport au coté éclairé de l'objet ou de déplacer la source lumineuse de manière à optimiser l'éclairage. Nous souhaitons donc maximiser la quantité de lumière (ré)émise par l'objet et perçue par la caméra. En utilisant les développements

précédents, il est possible de proposer la fonction de coût suivante :

$$h_s = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (7)$$

où  $I(x, y)$  est l'intensité du point 2D  $(x, y)$ . La variation de  $h_s$  due au mouvement de la caméra (voir section 4), est alors donnée par :

$$\frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}} = \sum_x \sum_y \frac{\partial I(x, y)}{\partial \mathbf{r}} \quad (8)$$

où  $\mathbf{r}$  représente la position de la caméra (translation et rotation).  $\frac{\partial I(x,y)}{\partial \mathbf{r}}$  est la matrice d'interaction  $\mathbf{L}_{I(x,y)}$  définie par l'équation (6). Considérant (6) on obtient :

$$\frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}} = \sum_x \sum_y (\nabla I_x \mathbf{L}_x + \nabla I_y \mathbf{L}_y). \quad (9)$$

#### 3.2 Maximiser le contraste

Si l'objectif est de maximiser le contraste dans l'image (ce qui est intéressant pour des tâches de suivi par exemple), un bon critère est de maximiser la somme des gradients d'intensité dans l'image. La fonction de coût correspondante est donnée par :

$$h_s = \sum_x \sum_y (\nabla I_x^2 + \nabla I_y^2). \quad (10)$$

Comme dans la section 3.1, il est nécessaire de calculer le gradient  $\frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}}$  qui est donné par :

$$\frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}} = \sum_x \sum_y \left( \frac{\partial h_s}{\partial x} \mathbf{L}_x + \frac{\partial h_s}{\partial y} \mathbf{L}_y \right) \quad (11)$$

avec

$$\frac{\partial h_s}{\partial x} = 2 \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right)$$

et

$$\frac{\partial h_s}{\partial y} = 2 \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial y} \right)$$

Après quelques réécritures, on obtient finalement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}} = & 2 \sum_x \sum_y \left[ \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \nabla I_x + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial x} \nabla I_y \right) \mathbf{L}_x \right. \\ & \left. + \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \nabla I_x + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \nabla I_y \right) \mathbf{L}_y \right] \quad (12) \end{aligned}$$

### 4 Introduction des contraintes d'illumination en asservissement visuel

Dans ce paragraphe, nous verrons comment utiliser les contraintes présentées dans la section 3 pour contrôler les mouvements d'une caméra ou d'une source lumineuse. Dans les deux cas, la méthode proposée repose sur les techniques d'asservissement visuel et considère l'utilisation du formalisme de la redondance.

## 4.1 Positionnement d'une caméra

L'asservissement visuel consiste à contrôler les mouvements d'un système dynamique à partir d'un ensemble d'informations visuelles extraites des images acquises par une ou plusieurs caméras vidéos montées sur (ou observant) l'effecteur d'un robot [9, 16]. Une bonne synthèse des techniques d'asservissement visuel est donnée dans [1, 2]. Ceci revient à minimiser l'erreur :

$$\Delta = \mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}^* \quad (13)$$

Les lois de commande consistent à contrôler le mouvement d'un système dynamique afin que les informations visuelles calculées à partir des mesures dans l'image  $\mathbf{s}(\mathbf{r})$ , où  $\mathbf{r}$  définit la position ou pose de la caméra par rapport à la scène, atteignent une valeur désirée (ou consigne)  $\mathbf{s}^*$ . Afin d'élaborer une loi de commande en boucle fermée sur des mesures  $\mathbf{s}$ , il est nécessaire d'estimer ou d'approximer la relation qui lie la variation de  $\mathbf{s}$  aux variables de contrôle. En dérivant  $\mathbf{s}(\mathbf{r})$  par rapport au temps on obtient :

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, Z) \mathbf{v} \quad (14)$$

où  $\mathbf{v}$  est le torseur cinématique de la caméra et où  $\mathbf{L}_s(\mathbf{s}, Z)$  est la matrice d'interaction associée à  $\mathbf{s}$ . Cette matrice dépend de la valeur courante de  $\mathbf{s}$ , mais aussi de la profondeur de l'objet considéré, représentée par les paramètres notés  $Z$ .

Une tâche de vision est alors définie par  $\mathbf{e}_1$  :

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{C}(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (15)$$

où  $\mathbf{C}$ , appelée matrice de combinaison, doit être choisie telle que  $\mathbf{C}\mathbf{L}_s$  soit de rang plein. Elle peut être définie comme  $\mathbf{C} = \mathbf{L}_s^+(\mathbf{s}, Z)$ .

Pour obtenir une décroissance exponentielle de l'erreur  $\mathbf{e}_1$ , la vitesse de la caméra peut être calculée de la manière suivante :

$$\mathbf{v} = -\lambda \mathbf{e}_1 \quad (16)$$

où  $\lambda$  est un gain positif.

## 4.2 Introduction de contrainte dans la tâche de positionnement

Si la tâche de vision ne contraint pas les six degrés de liberté du manipulateur, une tâche secondaire peut être considérée. On obtient alors :

$$\mathbf{e} = \mathbf{W}^+ \mathbf{W} \mathbf{e}_1 + (\mathbf{I}_6 - \mathbf{W}^+ \mathbf{W}) \mathbf{e}_2 \quad (17)$$

où

- $\mathbf{e}_2$  est une tâche secondaire. Classiquement la tâche  $\mathbf{e}_2$  est définie comme le gradient d'une fonction de coût  $h_s$  à minimiser ( $\mathbf{e}_2 = \frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}}$ ). Cette fonction de coût sera minimisée sous la contrainte que  $\mathbf{e}_1$  soit elle même réalisée.
- $\mathbf{W}^+$  et  $\mathbf{I}_6 - \mathbf{W}^+ \mathbf{W}$  sont deux opérateurs de projection qui garantissent que le mouvement de la caméra due à la tâche secondaire est compatible avec la régulation de  $\mathbf{s}^*$ .

$\mathbf{W}$  est définie comme une matrice de rang plein telle que  $\text{Ker } \mathbf{W} = \text{Ker } \mathbf{L}_s$  [18, 25, 10]. En raison du choix de  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{I} - \mathbf{W}^+ \mathbf{W}$  appartient théoriquement au noyau  $\text{Ker } \mathbf{L}_s$ , ce qui implique que la réalisation de la tâche secondaire n'aura aucun effet sur la tâche primaire ( $(\mathbf{L}_s(\mathbf{I}_n - \mathbf{W}^+ \mathbf{W})) \mathbf{e}_2 = \mathbf{0}, \forall \mathbf{e}_2$ ).

La loi de commande est dans ce cas donnée par :

$$\mathbf{v} = -\lambda \mathbf{e} - (\mathbf{I}_6 - \mathbf{W}^+ \mathbf{W}) \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial t} \quad (18)$$

L'utilisation de la redondance en asservissement visuel a déjà été utilisée dans [3, 22] mais principalement pour la gestion des configurations internes du manipulateur (butées, singularités). Son utilisation relative à des informations extraites de l'image peut cependant aussi être considérée (par exemple dans [19] pour l'évitement des occultations).

## 4.3 Commande de la caméra versus commande de la source lumineuse

Afin de contrôler les positions relatives de la caméra et de la source lumineuse, nous considérerons deux cas. Dans le premier cas, la caméra sera contrôlée et focalisée (par asservissement visuel) sur l'objet, la source lumineuse demeurant statique. Ce contexte expérimental n'est cependant pas toujours le plus intéressant. En effet si la caméra est en mouvement par rapport à l'objet, l'aspect de celui-ci va être modifié au cours du temps. Il est donc souvent plus intéressant de contrôler la position et l'orientation de la source lumineuse pendant que la caméra reste statique. C'est le second cas qui sera considéré.

Considérant le premier cas, la caméra se focalise sur l'objet d'intérêt en utilisant une tâche classique d'asservissement visuel. Si  $\mathbf{s} = (x, y)$  définit le centre de gravité de l'objet,  $\mathbf{s}^*$  est défini par  $\mathbf{s}^* = (0, 0)$  et la tâche globale qui permet à la fois la tâche de centrage et la contrainte sur la luminosité est donnée par :

$$\mathbf{e} = \mathbf{W}^+ \mathbf{W} \mathbf{L}_s^+(\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) + (\mathbf{I} - \mathbf{W}^+ \mathbf{W}) \frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}} \quad (19)$$

où  $\frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}}$  est donné soit par l'équation (9) soit par l'équation (12).

Considérant le second cas, l'objet demeure statique dans l'image (acquise par une caméra  $C_1$ ) et l'objectif est de maximiser la luminance ou le contraste en déplaçant la source lumineuse. Cette dernière étant en pratique directionnelle (ie, n'éclairant de manière uniforme dans toutes les directions), il est nécessaire de la maintenir focalisée sur l'objet en utilisant, là encore, une tâche d'asservissement visuel. Nous ajoutons donc à la source lumineuse une seconde caméra  $C_2$  dont l'axe optique est aligné avec la direction d'illumination. Dans ce contexte la tâche principale est là encore une simple tâche de centrage qui maintient l'objet centré dans l'image  $C_2$  et, donc, la direction du spot lumineux vers l'objet (deux degrés de liberté sont utilisés pour cette tâche). La redondance est alors utilisée

pour déplacer le couple caméra  $C_2$ /source lumineuse afin d'obtenir un éclairage correcte dans l'image  $C_1$ . La tâche globale est alors donnée par :

$$\mathbf{e} = \mathbf{W}^+ \mathbf{W} \underbrace{\mathbf{L}_s^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}^*)}_{\text{Tâche de centrage}} \quad (20)$$

$$+ (\mathbf{I} - \mathbf{W}^+ \mathbf{W}) \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}[-\mathbf{R}^T \mathbf{t}]_x \\ 0 & \mathbf{R} \end{pmatrix} \frac{\partial h_s}{\partial \mathbf{r}}}_{\text{tâche secondaire définie par rapport à la vue de la seconde caméra}}$$

où  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{t}$  représente le changement de repère (rotation et translation) entre les repères  $C_1$  et  $C_2$ .

Notons que dans ce dernier cas, si la caméra  $C_1$  est aussi en mouvement, le problème demeure le même tant que les transformations  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{t}$  entre le caméra  $C_1$  et la source lumineuse sont connues. La position de la source lumineuse sera modifiée pour s'adapter à ce nouveau point de vue (voir les résultats présentés dans la section 5.2).

## 5 Résultats expérimentaux

Les résultats présentés dans cette section ont été obtenus soit en simulation en utilisant la librairie OpenGL pour simuler l'éclairage soit sur la cellule robotique de l'Irisa-Inria Rennes. Le système a été implémenté en utilisant la librairie ViSP [20].

### 5.1 Source lumineuse statique/ caméra mobile

**Simulation.** L'objectif de cette première simulation est de valider l'approche proposée sur une scène simple où le comportement du système est aisément prévisible. L'objectif est donc de réaliser une tâche de positionnement par rapport à une sphère afin d'optimiser les conditions d'éclairage (le critère (7) est considéré). Dans cette expérience la source lumineuse est statique et la caméra est mobile. La loi de commande considérée sera donc définie par l'équation (19). L'avantage d'utiliser ici une sphère comme objet d'intérêt est que son aspect demeure inchangé en fonction des mouvements de la caméra. Seule sa luminance sera modifiée. Dans cette expérience nous supposons une source lumineuse positionnelle (qui éclaire de manière uniforme dans toutes les directions).

Les résultats de la tâche de positionnement sont montrés sur la Figure 2.a. L'intensité lumineuse moyenne dans l'image augmente de façon continue (voir Figure 2.b). La Figure 2.c montre la distance entre la caméra et l'axe reliant l'objet à la source lumineuse. Cette distance tend vers zéro, i.e., à la fin de la tâche de positionnement la caméra est située, comme il est possible de le prévoir *a priori*, exactement entre l'objet et la source lumineuse (voir Figure 2.d).

#### Expériences réelles.

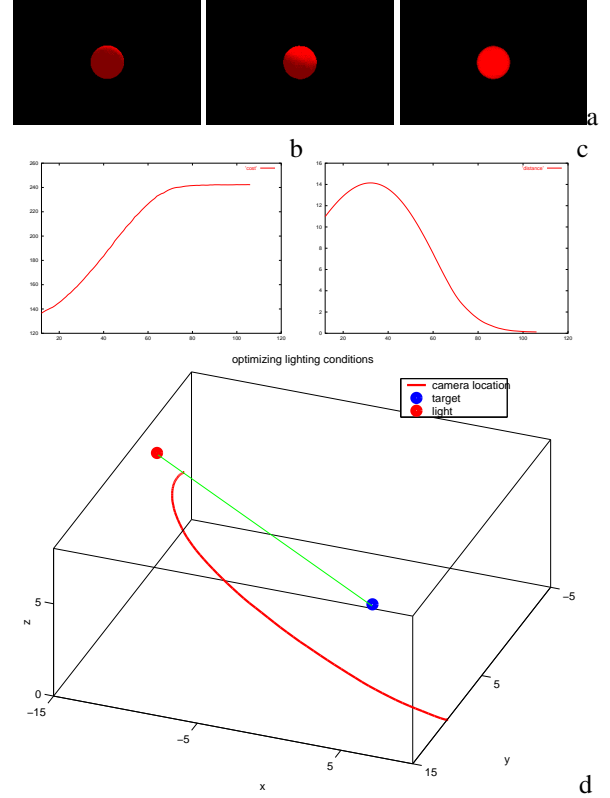


FIG. 2 – [Simulation] Maximisation de la luminance sur une sphère (a) images acquises pendant les mouvements de la caméra (la luminance augmente) (b) intensité moyenne de l'image (c) distance entre la caméra et l'axe objet/source lumineuse (d) position relative de la caméra, de la sphère et la source lumineuse au cours du temps

**Maximiser la luminance sur la sphère.** La même expérience a été réalisée sur le robot 6 axes de l'IRISA. Une sphère est éclairée par une spot lumineuse. Comme dans le paragraphe précédent la caméra est montée sur l'effecteur du robot et est contrôlée en utilisant la méthode décrite par l'équation (19) de manière à maximiser la luminance dans l'image. La luminance augmente (voir Figure 3a-b-c et la courbe 4.c) jusqu'à ce que la caméra, et donc l'effecteur du robot, se situe entre la sphère et la source lumineuse créant un "occultation de la lumière" (voir Figure 3.d et les dernières itérations de la courbe 4 où l'intensité lumineuse dans l'image décroît rapidement). Comme on peut s'y attendre le comportement du système est identique aux résultats de simulation du paragraphe précédent. Des résultats similaires sont obtenus quand la fonction de coût sur le contraste est utilisée.

**Maximisation de la luminance sur un objet complexe** La même expérience peut être réalisée sur un objet plus complexe (voir les figures 5.a et 5.b). Bien que la forme de l'objet soit modifiée à cause des mouvements de la caméra, la luminosité moyenne dans l'image dans l'image augmente conformément à la spécification de la tâche (voir

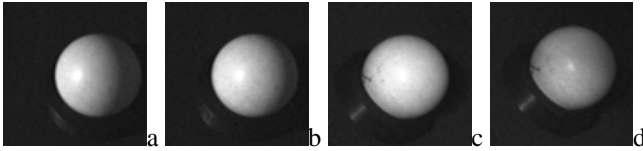


FIG. 3 – Maximisation de la luminance sur une sphère : sphère (a) première image (b-c) la luminance augmente (d) la caméra arrive entre l’objet et la source lumineuse (ce qui est effectivement la position optimale attendue mais qui, en pratique, provoque une “occlusion de la lumière”)

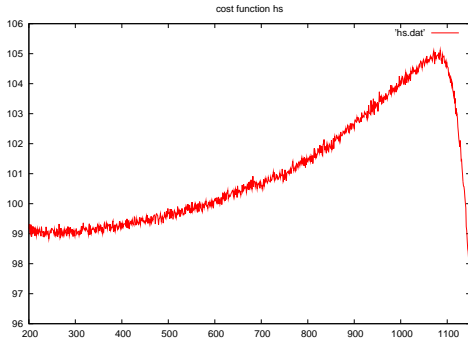


FIG. 4 – Maximisation de la luminance sur une sphère : évolution de la fonction de coût  $h_s$  qui reflète la luminance sur la sphère

la courbe 6 qui est reliée à la figure 5.b).

**Maximisation du contraste sur un objet complexe** Sur la figure 7, nous réalisons une expérience similaire mais en considérant la fonction de coût relative au contraste (qui consiste à maximiser la norme du gradient dans l’image). La norme des gradients dans l’image augmente conformément aux spécifications (Figure 7). Ceci est dû à la fois à la modification de la position relative entre la caméra et la source lumineuse mais aussi, aux modifications d’aspect de l’objet. Il est clair que la position atteinte par la caméra (dernière image de la séquence), grâce à la présence de fort gradients dans l’image, est plus adaptée pour des tâches de reconnaissance ou de suivi.

Dans ce paragraphe nous avons considéré une caméra mobile et une source lumineuse statique. Avec une telle configuration du système, l’aspect de la scène est modifié ce qui n’est pas toujours acceptable. Dans les expériences suivantes, nous considérerons donc une caméra statique et une source lumineuse contrôlable.

## 5.2 Contrôle de la source lumineuse

Considérons un objet complexe (voir Figure 8) : un modèle simulé de la Venus de Milo. Dans un premier temps, nous considérons que la caméra est statique et que seule la source lumineuse est en mouvement. Puis quand un maximum de la fonction de coût est atteint, la caméra est animée d’un mouvement arbitraire (un mouvement de rotation autour de l’objet couplé à une tâche de fixation). La source

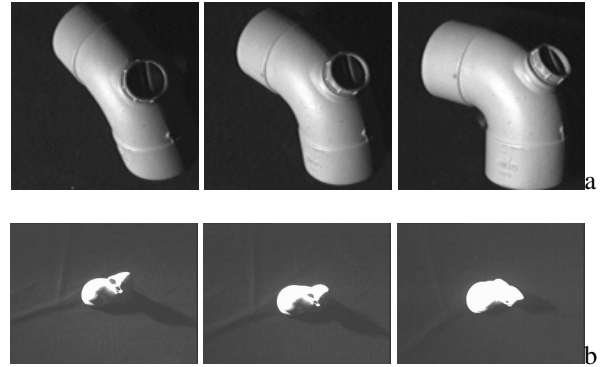


FIG. 5 – Maximiser la luminance sur un objet complexe

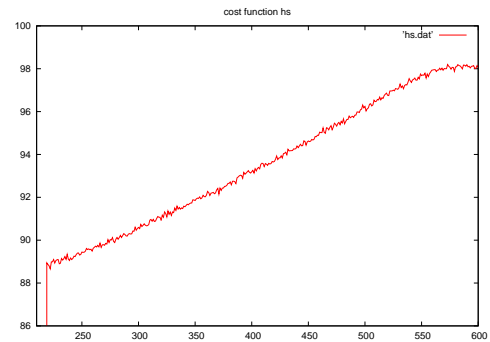


FIG. 6 – Maximiser la luminance (correspondant à l’expérience présentée sur la figure 5b) : fonction de coût  $h_s$

lumineuse doit alors se déplacer de manière à toujours assurer un éclairage correcte de la statue.

Les résultats présentés sur la Figure 8 démontre la validité de cette approche pour les deux fonctions de coût décrites dans cet article (luminance sur la figure 8a et contraste sur la figure 8b). La trajectoire de la source lumineuse dans les deux cas (ainsi que celle de la caméra) est montrée sur la figure 9.

## 6 Conclusion

Nous avons présenté une méthode permettant d’obtenir une illumination correcte d’un objet en utilisant une approche reposant sur l’asservissement visuel et sur l’utilisation de la luminance et/ou des gradients d’intensité dans l’image. Le modèle d’illumination considéré est sommaire mais valide pour des scènes Lambertiennes. Il permet cependant de contrôler la caméra ou la source lumineuse afin d’assurer un éclairage “optimal” (au moins au sens du critère spécifié).

La luminosité dans l’image dépend cependant de beaucoup d’autres paramètres certains intrinsèques à la scène (albedo, réflectance,...) d’autres dépendant des positions relatives entre la scène, l’objet, et la source lumineuse. L’une des perspectives de ce travail concerne donc le calcul analytique de la matrice d’interaction pour des modèles d’illumination plus complexes (Phong [23] ou Torrance-

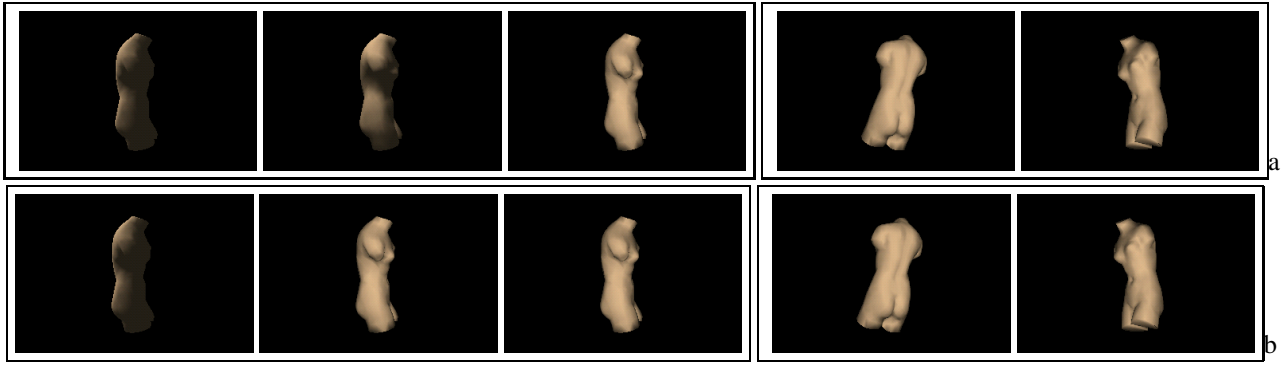


FIG. 8 – Illumination de la venus de Milo (a) maximisation de la luminance (b) Maximisation du contraste. Dans le trois premières colonnes, la caméra reste statique (seule la source lumineuse est contrôlée). Dans un deuxième temps (deux dernières colonnes) la caméra est animée d'un mouvement arbitraire et la source lumineuse est contrôlée pour assurer la tâche d'éclairage.

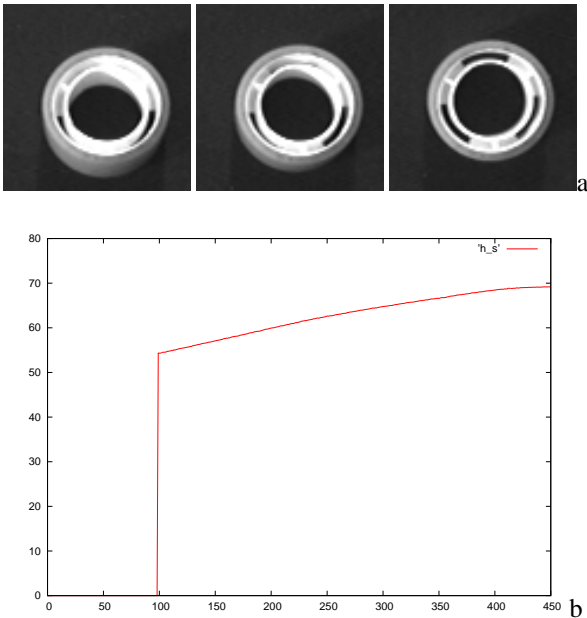


FIG. 7 – Maximisation de la norme du gradient (ou du contraste) : (a) images de la séquence (b) évolution de la fonction de coût  $h_s$

Sparrow [27]) et l'utilisation de ces matrices pour des tâches de positionnement ou de suivi [4].

## Références

[1] F. Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control, Part I : Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4) :82–90, December 2006.

[2] F. Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control, Part II : Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1) :109–118, March 2007.

[3] F. Chaumette and E. Marchand. A redundancy-based iterative scheme for avoiding joint limits : Application to visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 17(5) :719–730, Octobre 2001.

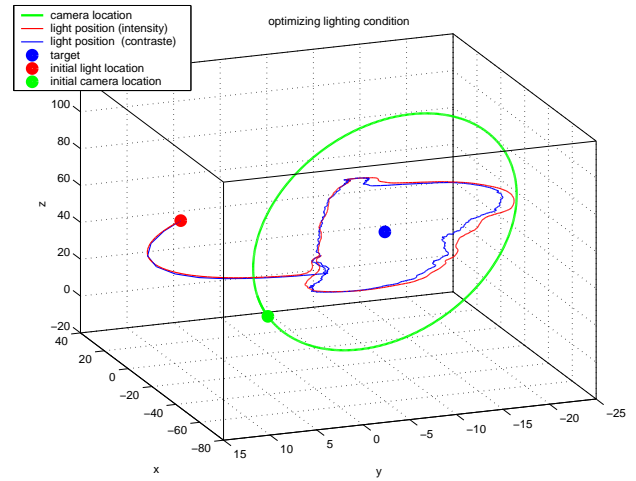


FIG. 9 – Illumination de la venus de Milo : trajectoire de la source lumineuse et de la caméra

[4] C. Collewet, E. Marchand, and F. Chaumette. Asservissement visuel basé sur des informations photométriques. In *16e congrès francophone AFRIF-AFIA Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, RFIA'08*, Amiens, France, Janvier 2008.

[5] C.K. Cowan and A. Bergman. Determining the camera and light source location for a visual task. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'89*, volume 1, pages 509–514, Scottsdale, Mai 1989.

[6] C.K. Cowan and P.D. Kovesi. Automatic sensor placement from vision task requirements. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine intelligence*, 10(3) :407–416, Mai 1988.

[7] C.K. Cowan and B. Modayur. Edge-based placement of camera and light source for object recognition and location. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'93*, volume 2, pages 586–592, 1993.

[8] T. Eltoft and R.J.P. de Figueiredo. Illumination control as a means of enhancing image features in active vision systems. *IEEE Trans. on Image Processing*, 4(11) :1520–1530, Novembre 1995.

- [9] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives. A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(3) :313–326, Juin 1992.
- [10] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives. A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(3) :313–326, Juin 1992.
- [11] M. Gouiffès, C. Collewet, C. Fernandez-Maloigne, and A. Trémeau. Feature point tracking : robustness to specular highlights and lighting variations. In *European Conf. on Computer Vision, ECCV'2006*, volume 3954 of LNCS, pages 92–93, Graz, Austria, May 2006.
- [12] G. Hager and P. Belhumeur. Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(10) :1025–1039, Octobre 1998.
- [13] K. Hara, K. Nishino, and K. Ikeuchi. Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(4) :493–505, Avril 2005.
- [14] B. Horn. *Robot Vision*. MIT Press, Cambridge, 1987.
- [15] B.K.P. Horn and B.G. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17(1-3) :185–203, Août 1981.
- [16] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke. A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5) :651–670, Octobre 1996.
- [17] H. Jin, P. Favaro, and S. Soatto. Real-Time feature tracking and outlier rejection with changes in illumination. In *ICCV*, pages 684–689, Juillet 2001.
- [18] A. Liegeois. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 7(12) :868–871, Décembre 1977.
- [19] E. Marchand and G.-D. Hager. Dynamic sensor planning in visual servoing. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 3, pages 1988–1993, Leuven, Belgium, Mai 1998.
- [20] E. Marchand, F. Spindler, and F. Chaumette. ViSP for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(4) :40–52, Décembre 2005. Special Issue on "Software Packages for Vision-Based Control of Motion", P. Oh, D. Burschka (Eds.).
- [21] H. Murase and S.K. Nayar. Illumination planning for object recognition using parametric eigenspaces. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(12) :1219–1227, 1994.
- [22] B. Nelson and P.K. Khosla. Integrating sensor placement and visual tracking strategies. In *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, volume 2, pages 1351–1356, San Diego, Mai 1994.
- [23] B.T. Phong. Illumination for computer generated pictures. *Communication of the ACM*, 18(6) :311–317, Juin 1975.
- [24] S. Sakane and T. Sato. Automatic planning of light source and camera placement for an active photometric stereo system. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'91*, volume 2, pages 1080–1087, Sacramento, Avril 1991.
- [25] C. Samson, M. Le Borgne, and B. Espiau. *Robot Control : the Task Function Approach*. Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 1991.
- [26] H.D. Tagare and R.J.P. DeFigueiredo. A framework for the construction of reflectance maps for machine vision. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 57(3) :265–282, 1993.
- [27] K.E. Torrance and E.M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57 :1105–1114, 1967.
- [28] S.K. Yi, R.M. Haralick, and L.G. Shapiro. Optimal sensor and light-source positioning for machine vision. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(1) :122–137, Janvier 1995.
- [29] R. Zhang, P.S. Tsai, J.E. Cryer, and M. Shah. Shape-from-shading : a survey. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(8) :690–706, Août 1999.