



HAL
open science

Asservissement visuel basé sur des informations visuelles photométriques

Cadio Lucille

► **To cite this version:**

Cadio Lucille. Asservissement visuel basé sur des informations visuelles photométriques. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2008. hal-04210901

HAL Id: hal-04210901

<https://hal.inrae.fr/hal-04210901v1>

Submitted on 19 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.



IFSIC
Université de Rennes1
Campus Beaulieu
35042 Rennes Cedex



IRISA
projet Lagadic
Campus de Beaulieu
F-35042 Rennes Cedex

Asservissement visuel basé sur des informations visuelles photométriques

Rapport de stage

Sous la responsabilité de :
Christophe Collewet et Éric Marchand (IRISA)
Kadi Bouatouch (IFSIC)

Lucile Cadio
Diplôme d'ingénieur IFSIC-INC
2007/2008

Résumé

Alors que les approches classiques d'asservissement visuel dépendent d'informations géométriques (points, droites, etc.), la méthode présentée ici dépend directement de la luminance en chaque pixel de l'image. Une nouvelle loi de commande est alors reformulée car les approches classiques ne fonctionnent pas. Cependant, cette méthode est sensible aux variations d'intensité lumineuse. C'est pourquoi, dans le cadre de ce stage, des invariants couleurs sont utilisés pour compenser les variations d'illumination en chaque point de l'image. Une méthode de choix des invariants est ensuite proposée.

Mots clefs : Asservissement visuel, luminance, informations visuelles, invariants photométriques, variations d'illumination, modèles de réflexion.

Abstract

While the visual servoing classical approaches rely on geometric information (points, straight lines, etc.), the method presented here directly relies on the luminance of all pixels in the image. Thus, a new control law is reworded because classical approaches do not work any more. However, this method is sensitive to luminance variations. That is why, in this internship, some color invariants are used to compensate in each point for the illumination changes. Then, an invariants choice method is proposed.

Keywords : Visual servoing, luminance, visual features, photometric invariants, illumination variations, reflection models.

1 Remerciements

Je remercie François Chaumette, responsable de l'équipe Lagadic, de m'avoir accueilli au sein de son équipe.

Je remercie Christophe Collewet, chercheur au sein de l'équipe Lagadic, de m'avoir encadré avec attention pendant ce stage et d'avoir été très disponible.

Je tiens à remercier également Éric Marchand de m'avoir permis d'effectuer mon stage au sein de l'équipe Lagadic.

Je remercie enfin toute l'équipe Lagadic pour son accueil.

Table des matières

1 Remerciements	5
2 Introduction	9
3 Présentation	11
3.1 IRISA	11
3.2 Centre de recherche INRIA Rennes - Bretagne Atlantique . . .	12
3.3 Projet Lagadic	13
4 Sujet du stage	14
5 Asservissement visuel classique	14
6 Asservissement visuel basé sur l'intensité lumineuse	15
7 Rappels de photométrie	18
7.1 Luminance	18
7.2 Couleur	18
7.3 Modèle de réflexion de Shafer	19
8 Les invariants couleurs	19
8.1 Définition	19
8.2 Lien avec l'asservissement visuel	21
9 Apport des invariants couleurs pour un asservissement visuel	21
9.1 Asservissement visuel sans variation d'éclairage	22
9.2 Asservissement visuel avec variation d'éclairage	22
10 Choix des invariants couleurs	22
10.1 Objectif	22
10.2 Expérimentations	25
11 Méthodologie employée	26
12 Conclusion	28

2 Introduction

L'asservissement visuel est, d'une façon générale, une technique qui permet de contrôler le déplacement d'un système dynamique à l'aide d'une ou plusieurs caméras, embarquées ou non. Ce sont les informations visuelles qui permettent de contrôler le système dynamique car elles sont intégrées à la loi de commande. Dans le cadre de ce stage, on s'emploie en fait à commander un robot à six degrés de libertés, dont l'extrémité du bras est équipée d'une caméra. L'objectif est de déplacer le robot à une position souhaitée à partir de la connaissance des informations visuelles courantes \mathbf{s} et désirées \mathbf{s}^* .

Les techniques d'asservissement visuel nécessitent généralement une extraction et un suivi robuste des informations visuelles. Il faut dans un premier temps extraire les informations visuelles, les mettre en correspondance entre \mathbf{s}_0 et \mathbf{s}^* , puis entre \mathbf{s}_k et \mathbf{s}_{k-1} . Ce processus peut parfois être extrêmement complexe et très coûteux en temps de calcul. Contrairement aux approches classiques, lors de ce travail, les informations visuelles utilisées sont des informations photométriques. Des premiers résultats très prometteurs ont déjà été obtenus dans le cas simple d'une scène Lambertienne, en faisant l'hypothèse d'une intensité lumineuse constante, et pour des images des images en niveaux de gris. Ces travaux sont rapportés dans [2]. Lors de ce stage, il s'agit d'étendre ces premiers résultats à des scènes plus complexes (prise en compte des spécularités, des variations d'intensité de l'éclairage, etc.).

Ce rapport est structuré comme suit. Après avoir vu les asservissements visuels classiques et ceux basés sur l'intensité lumineuse, on s'intéressera à des notions de photométrie et d'invariance couleur. Enfin, nous verrons les avantages des invariants couleurs dans le contexte de la réalisation d'une tâche de positionnement par asservissement visuel.

3 Présentation

3.1 IRISA

L'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA¹) est une structure de recherche située à Rennes sur le campus de Beaulieu. Elle regroupe l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), le CNRS (Centre National de Recherche Scientifique), l'université de Rennes 1 et l'INSA de Rennes (Institut National des Sciences Appliquées).

Les thématiques de recherche de l'IRISA rassemblent les systèmes d'information, les télécommunications, le multimédia, la santé, l'environnement et les transports.

Les activités scientifiques de l'IRISA se situent dans des domaines largement orientés par les applications. Les recherches impliquent donc fréquemment des collaborations avec des partenaires industriels tels que de nombreuses entreprises françaises et européennes. Ces programmes de recherche sont reconnus internationalement.

Le centre est très impliqué dans la formation académique à travers l'enseignement dans les universités et les Écoles d'ingénieurs.

L'IRISA compte 618 personnes dont 96 chercheurs, 103 enseignants-chercheurs, 101 ingénieurs, techniciens ou administratifs, 198 doctorants, 70 ingénieurs sous contrat et 21 post-doctorants. L'IRISA est composée de 33 équipes de recherche.



¹<http://www.irisa.fr>

3.2 Centre de recherche INRIA Rennes - Bretagne Atlantique

J'ai effectué mon stage au centre de recherche public INRIA Rennes - Bretagne Atlantique. Ce centre est l'un des huit centres de l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique).

Trente-trois équipes-projets conduisent leurs recherches dans quatre grands domaines scientifiques : les systèmes et les réseaux, la conception de logiciel et le calcul symbolique, les interactions homme-machine et le multimédia, la simulation et l'optimisation de systèmes complexes. Ces grands thèmes scientifiques se déclinent dans de nombreux domaines d'application (télécommunications, multimédia, technologies avancées pour la santé et l'environnement, etc.) et donnent lieu à de multiples coopérations tant académiques qu'industrielles. Le centre est notamment très impliqué dans le pôle de compétitivité "Images & réseaux".

L'INRIA Rennes - Bretagne Atlantique est également fortement engagé dans la formation à travers l'enseignement dans les universités et les écoles d'ingénieurs, ainsi que dans la formation de doctorants.



3.3 Projet Lagadic

J'ai effectué mon stage au sein du projet Lagadic². Lagadic est un projet de recherche de l'INRIA Rennes - Bretagne Atlantique. Ses domaines de recherche sont la vision robotique et l'asservissement visuel.

L'asservissement visuel est le thème central de ce projet. L'objectif est de modéliser et d'élaborer des stratégies de perception et d'action à partir d'images pour des applications en robotique, vision par ordinateur, réalité virtuelle et réalité augmentée.

Il existe trois grands domaines d'application des recherches :

- la robotique : milieux hostiles (nucléaires), robotique sous-marine, robotique mobile, transport, agro-alimentaire, médical, etc.
- l'animation : cinématographie automatique, animation temps-réel.
- la réalité augmentée : audiovisuel, intervention.

L'équipe dispose d'un parc robotique comportant un robot manipulateur, une cellule de vidéo surveillance, un robot mobile et un robot médical.

Actuellement, l'équipe compte dix-sept personnes dont quatre chercheurs, un ingénieur, une assistante, huit doctorants, deux post-doctorants et un ingénieur contractuel.



²<http://www.irisa.fr/lagadic>

4 Sujet du stage

Ce sujet concerne les asservissements visuels basé sur l'intensité lumineuse. Des premiers résultats très prometteurs ont déjà été obtenus dans le cas simple d'une scène Lambertienne. Cependant, cette méthode est très sensible aux variations d'éclairage. Il s'agit donc, au cours de ce stage, d'étendre ces premiers résultats à des scènes plus complexes. Pour ce faire, il faut comprendre à travers un modèle d'illumination comment varie la luminance en fonction des directions de l'observateur, de l'éclairage et de l'objet observé. Ainsi mon stage a pour but de faire une étude approfondie des invariants photométriques afin de les utiliser dans le but de compenser les variations d'illumination, puis de choisir les meilleurs.

5 Asservissement visuel classique

En asservissement visuel, les informations visuelles issues d'une caméra sont utilisées pour contrôler le robot [1]. La loi de commande permet de déplacer un robot à la position souhaitée grâce aux k informations courantes $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ et désirées $\mathbf{s}^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_k^*)$; le but étant que le vecteur d'erreur $\mathbf{s} - \mathbf{s}^*$ tende vers zéro. Les variations temporelles de \mathbf{s} dans le temps dépendent du mouvement du robot. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître la matrice dite d'interaction \mathbf{L}_s associée à \mathbf{s} pour établir la loi de commande. Plus précisément, cette matrice exprime la relation liant la vitesse de la caméra \mathbf{v} par rapport à l'objet observé à la vitesse des informations visuelles choisies

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

où \mathbf{L}_s est de taille $k \times 6$ et $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$. La vitesse \mathbf{v} est décomposée en trois composantes de translation v_x, v_y, v_z et en trois composantes de rotation $\omega_x, \omega_y, \omega_z$. La loi de commande est alors obtenue de la façon suivante

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_s^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}^*) \quad (2)$$

où λ est un gain qui permet de régler la vitesse de convergence et où $\widehat{\mathbf{L}}_s^+$ est la pseudo-inverse de \mathbf{L}_s . Cette loi de commande, qui correspond à la méthode de Gauss-Newton, tente d'assurer une décroissance exponentielle de chaque composante de l'erreur $\mathbf{s} - \mathbf{s}^*$. Pour obtenir les informations visuelles \mathbf{s} à chaque instant, il est nécessaire d'avoir recours au traitement d'images.

6 Asservissement visuel basé sur l'intensité lumineuse

Désormais les informations visuelles choisies sont l'intensité lumineuse en tout point de l'image, c'est-à-dire :

$$\mathbf{s}(\mathbf{r}) = \mathbf{I}(\mathbf{r}) = (\mathbf{I}_{1\bullet}, \mathbf{I}_{2\bullet}, \dots, \mathbf{I}_{N\bullet}) \quad (3)$$

où $\mathbf{I}_{k\bullet}$ n'est autre que la ligne k de l'image. $\mathbf{I}(\mathbf{r})$ est donc un vecteur de taille $N \times M$ où $N \times M$ est la taille de l'image.

Les méthodes classiques basées sur la loi de commande donnée en (2) ne fonctionnent pas correctement [2]. Le problème est alors reformulé comme un problème de minimisation de la fonction de coût suivante :

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(\mathbf{r}) &= (\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}(\mathbf{r}^*))^\top (\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}(\mathbf{r}^*)) \\ &= \|\mathbf{s}(\mathbf{r}) - \mathbf{s}(\mathbf{r}^*)\|_2 \end{aligned} \quad (4)$$

où \mathbf{r} correspond à la position courante de la caméra par rapport à l'objet et \mathbf{r}^* la position de référence.

Les figures 1b et 1d rapportent, dans le sous espace (t_x, θ_y) , l'allure de la fonction de coût (4) quand l'objet (plan) observé est celui représenté sur la figure 1a et lorsque la pose souhaitée est telle que le plan du capteur et celui de l'objet soient parallèles à une distance $Z^* = 80$ cm. On observe que la fonction de coût présente une vallée très abrupte au milieu d'un plateau en pente douce et de pente constante. De plus, la fonction de coût n'est pas convexe. Par conséquent, la méthode de Gauss-Newton (2), qui correspond à la loi de commande classique, ne fonctionne plus. C'est ce qui motive l'élaboration d'une nouvelle loi de commande. Une approche basée sur la méthode de Levenberg-Marquardt est alors utilisée [2] :

$$\mathbf{v} = -\lambda(\mathbf{H} + \mu \text{diag}(\mathbf{H}))^{-1} \mathbf{L}_I^\top (\mathbf{I}(\mathbf{r}) - \mathbf{I}(\mathbf{r}^*)) \quad (5)$$

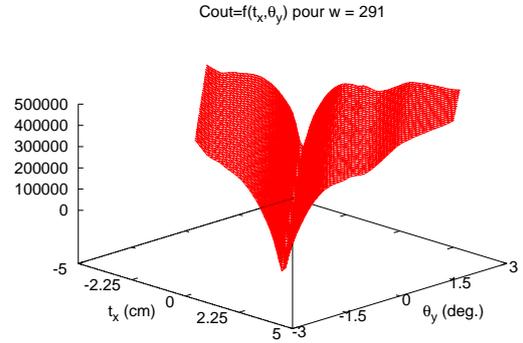
avec $\mathbf{H} = \mathbf{L}_I^\top \mathbf{L}_I$.

Le problème qui se pose désormais est le calcul de la matrice d'interaction. On fait l'hypothèse que lorsqu'un point se déplace de $d\mathbf{x}$ dans l'intervalle de temps dt la valeur de l'intensité lumineuse reste la même. C'est une hypothèse fautive mais elle est abondamment utilisée dans la littérature.

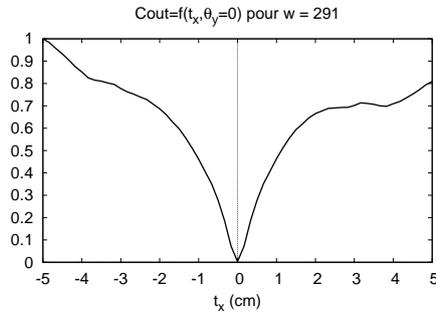
$$I(\mathbf{x} + d\mathbf{x}, t + dt) = I(\mathbf{x}, t) \quad (6)$$



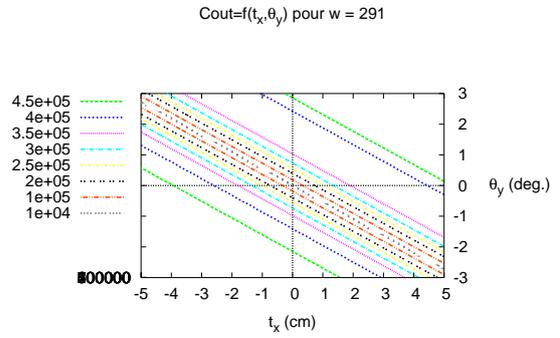
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 1 – (a) Photo observée ; (b) Allure de la fonction de coût dans le sous-espace (t_x, θ_y) ; (c) Profil de la fonction de coût dans le sous-espace $(t_x, \theta_y = 0)$; (d) Iso-contours dans le sous-espace (t_x, θ_y) .

Après un développement en série de Taylor au premier ordre en x on obtient

$$I(\mathbf{x}, t + dt) + \frac{\partial I(\mathbf{x}, t + dt)}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{dx} = I(\mathbf{x}, t)$$

et après une division par dt

$$\frac{I(\mathbf{x}, t + dt) - I(\mathbf{x}, t)}{dt} + \frac{\partial I(\mathbf{x}, t + dt)}{\partial \mathbf{x}} \frac{\mathbf{dx}}{dt} = 0$$

qui fournit quand dt tend vers zéro

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \nabla I^\top \dot{x} = 0 \quad (7)$$

où ∇I est le gradient spatial de I . Il vient alors

$$\begin{aligned}\frac{\partial I}{\partial t} &= -\nabla I^\top \dot{x} \\ &= -\nabla I^\top L_{\mathbf{x}} \mathbf{v}\end{aligned}\quad (8)$$

où $L_{\mathbf{x}}$ est la matrice d'interaction associée au point décrit par $\mathbf{x} = (x, y)$. La matrice d'interaction L_I associée à la luminance est donc :

$$L_I = -\nabla I^\top L_{\mathbf{x}} \quad (9)$$

où

$$L_{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -1/Z & 0 & x/Z & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -1/Z & y/Z & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\nabla I = \begin{pmatrix} \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$L_I^\top = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \frac{1}{Z} \frac{\partial I}{\partial y} \\ -x \frac{\partial I}{\partial x} - (1+y^2) \frac{\partial I}{\partial y} \\ (1+x^2) \frac{\partial I}{\partial x} + xy \frac{\partial I}{\partial y} \\ -y \frac{\partial I}{\partial x} + x \frac{\partial I}{\partial y} [1ex] \end{bmatrix} \quad (12)$$

Bien entendu, en considérant l'hypothèse de l'invariance de la luminance, ces équations ne sont valables que dans le cas d'un environnement Lambertien, c'est-à-dire diffusant la lumière de façon uniforme dans toutes les directions, mais aussi pour une source de lumière fixe par rapport à l'objet.

En conclusion, l'avantage de l'asservissement visuel photométrique par rapport à l'asservissement visuel classique est qu'il ne comporte aucun traitement d'image (sauf le calcul du gradient) et que le nombre d'informations est

très important car il correspond à la taille de l'image. Cependant, cette méthode fait l'hypothèse que les objets sont Lambertiens et qu'aucune variation de lumière ne se produit pendant toute la séquence. De plus, cette approche fait également l'hypothèse que la luminance reste constante entre deux images successives ; ce qui n'est évidemment pas toujours le cas. Par conséquent nous nous intéressons par la suite, à la Section 8, aux invariants photométriques afin d'éviter ce problème. Mais tout d'abord rappelons quelques définitions de photométrie.

7 Rappels de photométrie

7.1 Luminance

- La **luminance** \mathcal{L} est le rapport de l'intensité d'une source dans une direction donnée et l'aire apparente de cette source dans cette même direction. Elle est aussi appelée radiance.
- L'**éclairage énergétique** \mathcal{E} est le flux énergétique passant à travers une surface. Il est aussi appelé irradiance.
- La **réflectance** \mathcal{R} est le rapport entre la radiance émise par une surface dans une direction et l'irradiance reçue par cette même surface dans une autre direction.

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{\mathcal{L}(\lambda)}{\mathcal{E}(\lambda)} \quad (13)$$

avec λ la longueur d'onde.

La luminance lumineuse $f(p)$ mesurée par un capteur CCD au point p est obtenue par l'intégration suivante :

$$f(p) = K_c \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \mathcal{S}(\lambda) \mathcal{L}(\lambda, p) d\lambda \quad (14)$$

$$= K_c \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \mathcal{S}(\lambda) \mathcal{E}(\lambda, p) \mathcal{R}(\lambda, p) d\lambda \quad (15)$$

avec K_c est un paramètre dépendant de la géométrie de l'objectif et $\mathcal{S}(\lambda)$ est un paramètre représentant la sensibilité spectrale du capteur.

7.2 Couleur

La couleur peut être représentée dans différents espaces couleurs, ici nous utilisons l'espace RVB (pour Rouge Vert Bleu). Les coordonnées trichroma-

tiques RVB sont définies de la manière suivante :

$$R = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \mathcal{R}(\lambda)\mathcal{E}(\lambda)S_R(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

$$V = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \mathcal{R}(\lambda)\mathcal{E}(\lambda)S_V(\lambda) d\lambda \quad (17)$$

$$B = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \mathcal{R}(\lambda)\mathcal{E}(\lambda)S_B(\lambda) d\lambda \quad (18)$$

avec $S_R(\lambda)$, $S_V(\lambda)$ et $S_B(\lambda)$ les sensibilités spectrales des trois capteurs CCD.

7.3 Modèle de réflexion de Shafer

Le modèle de réflexion dichromatique proposé par Shafer [4], affirme que tout objet diélectrique inhomogène opaque (généralement dit Lambertien) et uniformément coloré, réfléchit la lumière soit sous forme de radiance de surface soit sous forme de radiance interne. Le modèle de réflexion dichromatique, permet ainsi de dissocier ces deux phénomènes, de telle sorte que la radiance d'un objet $\mathcal{L}(\lambda, p)$ devient la somme de la radiance issue de l'interface $\mathcal{L}_s(\lambda, p)$ et de la radiance interne $\mathcal{L}_b(\lambda, p)$:

$$\mathcal{L}(\lambda, p) = \mathcal{L}_s(\lambda, p) + \mathcal{L}_b(\lambda, p) \quad (19)$$

Selon ce modèle, chacune des radiances \mathcal{L}_s et \mathcal{L}_b est constituée du produit de deux termes, tel que :

$$\mathcal{L}(\lambda, p) = l_s(\lambda, p)m_s(p) + l_b(\lambda, p)m_b(p) \quad (20)$$

Les termes m_b et m_s sont des facteurs d'échelle dépendant uniquement de la géométrie de la scène. $l_b(\lambda, p)$ correspond à la radiance spectrale associée au phénomènes de réflexion diffuse. Enfin, $l_s(\lambda, p)$ est couramment associé au spectre de l'illuminant. Le modèle de réflexion dichromatique ne s'applique qu'aux scènes éclairées par une seule source de lumière, sans aucune lumière ambiante et sans interr réflexion. Malgré le fait que ce modèle puisse paraître très restreint, il peut s'appliquer à de nombreux matériaux et est très intéressant dans les applications de vision par ordinateur.

8 Les invariants couleurs

8.1 Définition

La couleur perçue varie en fonction des directions de l'observateur, de l'éclairage et de la capacité de la matière de l'objet à refléter la lumière.

Contrairement à l'homme qui parvient parfaitement à percevoir une couleur uniforme en toutes circonstances, en vision par ordinateur ce n'est pas le cas. C'est pourquoi nous nous intéressons à l'invariance des couleurs. Les invariants couleurs sont alors utilisés pour compenser les variations d'illumination et d'éclairage en chaque point. À l'inverse des images de luminance, l'utilisation d'images couleurs permet de définir des invariants en tout point de l'image. La plupart des méthodes de calcul d'invariants se base sur le modèle dichromatique de Shafer. Nous utilisons ici les invariants dédiés aux matériaux diélectriques inhomogènes opaques, dits Lambertiens. On considère que l'irradiance reçue par le capteur correspond directement à la radiance de l'objet. Nous étudions le cas où l'illuminant est blanc.

En considérant un objet diélectrique inhomogène opaque (objet dit Lambertien) et un illuminant blanc, le modèle de Shafer permet d'écrire la couleur $\mathbf{C} = (R, V, B)$ d'un matériau de la manière suivante :

$$\mathbf{C}(p) = I(P)m_b(P)\mathbf{D}(p) \quad (21)$$

avec $I(P)$ l'intensité lumineuse de l'illuminant au point P , \mathbf{D} une composante spectrale dépendant à la fois des sensibilités spectrales du capteur et du spectre de réflectance du matériau et m_b qui dépend de la géométrie de la scène (angle d'éclairage, d'observation, orientation de la surface). La démonstration est détaillée dans [3].

Tout rapport formé à partir de R , V et B est donc invariant à la géométrie et l'intensité lumineuse de l'illuminant.

Cette modélisation permet de définir plusieurs attributs invariants :

– Invariants couleurs de norme L_1 :

$$R^{L_1} = \frac{R}{R + G + B} \quad V^{L_1} = \frac{V}{R + G + B} \quad B^{L_1} = \frac{B}{R + G + B} \quad (22)$$

– Invariants couleurs de norme L_2 :

$$R^{L_2} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + V^2 + B^2}} \quad V^{L_2} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + V^2 + B^2}} \quad B^{L_2} = \frac{B}{\sqrt{R^2 + V^2 + B^2}} \quad (23)$$

– Invariants couleurs d'attributs $c_1c_2c_3$:

$$c_1 = \arctan \frac{R}{\max(V, B)} \quad c_2 = \arctan \frac{V}{\max(R, B)} \quad c_3 = \arctan \frac{B}{\max(R, V)} \quad (24)$$

Il existe d'autres invariants couleurs mais nous choisissons les invariants de normes L_1 et L_2 et les attributs $c_1c_2c_3$ car ce sont les invariants les plus courants, les plus simples et les plus rapides à calculer.

8.2 Lien avec l'asservissement visuel

Il est évident que l'hypothèse de l'invariance de la luminance (6) n'est pas toujours vérifiée en réalité. En effet, la méthode d'asservissement visuel basé sur des informations photométriques fonctionne lorsqu'il n'y a pas de changement d'éclairage. En revanche, cette méthode atteint ses limites lorsqu'il y a une variation d'illumination après avoir acquis \mathbf{I}^* . Le but est donc d'utiliser des modèles d'éclairement et surtout d'utiliser des invariants couleurs pour corriger ce problème. Pour cela, il faut réussir à choisir des invariants pertinents.

Si on souhaite se servir d'un invariant en asservissement visuel, il faut pouvoir calculer la matrice d'interaction. Il est dorénavant correct d'écrire que lorsqu'un point se déplace de $d\mathbf{x}$ dans l'intervalle de temps dt la valeur de l'invariant couleur reste la même.

$$Inv(\mathbf{x} + d\mathbf{x}, t + dt) = Inv(\mathbf{x}, t) \quad (25)$$

En faisant la même démonstration que dans la Section 6, on obtient directement la matrice d'interaction :

$$L_{Inv}^\top = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} \frac{\partial Inv}{\partial x} \\ \frac{1}{Z} \frac{\partial Inv}{\partial y} \\ -x \frac{\partial Inv}{\partial x} - \frac{y}{Z} \frac{\partial Inv}{\partial x} \\ -xy \frac{\partial Inv}{\partial x} - (1+y^2) \frac{\partial Inv}{\partial y} \\ (1+x^2) \frac{\partial Inv}{\partial x} + xy \frac{\partial Inv}{\partial y} \\ -y \frac{\partial Inv}{\partial x} + x \frac{\partial Inv}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (26)$$

9 Apport des invariants couleurs pour un asservissement visuel

Lors de la réalisation d'un asservissement visuel, l'illumination varie. Ces variations d'illumination sont issues d'un déplacement relatif de l'objet par rapport à l'objet et/ou de l'objet par rapport aux sources d'éclairage de la scène. Nous effectuons ici un asservissement visuel sans variations d'éclairage pour la luminance et pour un invariant couleur puis nous réalisons un asservissement visuel avec variation d'éclairage. Les tests ont été réalisés avec une

image couleur très saturée (de couleur vive) car certains invariants ne sont pas définis dans le cas contraire.

9.1 Asservissement visuel sans variation d'éclairage

L'asservissement visuel est réalisé de manière classique avec la luminance puis avec un invariant couleur : l'invariant R^{L^1} . Les figures 2c et 3c nous indiquent que la loi de commande converge sans problème pour la luminance et l'invariant R^{L^1} .

9.2 Asservissement visuel avec variation d'éclairage

L'asservissement visuel est désormais réalisé en simulant une variation d'éclairage. En pratique, une variation sinusoïdale a été utilisée .

Les simulations ont montré que lorsqu'un asservissement visuel est effectué avec la luminance, la loi de commande diverge comme le montre la figure 4. La raison est que l'image acquise ne peut jamais correspondre à l'image désirée puisqu'elle est soumise à une variation d'intensité lumineuse. En revanche, comme prévu par la théorie, avec les invariants couleurs il n'y a pas de perturbation : les figures 3 et 5 sont identiques. Avec les invariants, on ne retrouve pas de problème de divergence comme pour la luminance car dans le calcul d'un invariant le coefficient multiplicatif s'élimine. En effet, tout rapport de deux composantes couleur R, V et B satisfait l'hypothèse d'invariance par élimination du coefficient multiplicatif. Comme le montre la figure 6 la valeur des intensités de l'invariant reste identique lorsque l'éclairage varie. Compenser les variations d'illumination et d'éclairage pendant la séquence améliore donc la robustesse de l'asservissement visuel.

10 Choix des invariants couleurs

Maintenant que nous avons prouvé l'intérêt des invariants couleurs lors d'un asservissement visuel, il est important de choisir le ou les meilleurs invariants parmi les invariants de normes L_1 et L_2 et les attributs $c_1c_2c_3$.

10.1 Objectif

Pour la fonction de coût, l'idéal serait d'avoir une demi-sphère car les iso-contours seraient alors concentriques. En effet, la convergence est assurée lorsqu'on utilise une fonction quadratique. Dans ce cas, avec la méthode du gradient, la direction de descente du gradient est directement orientée vers

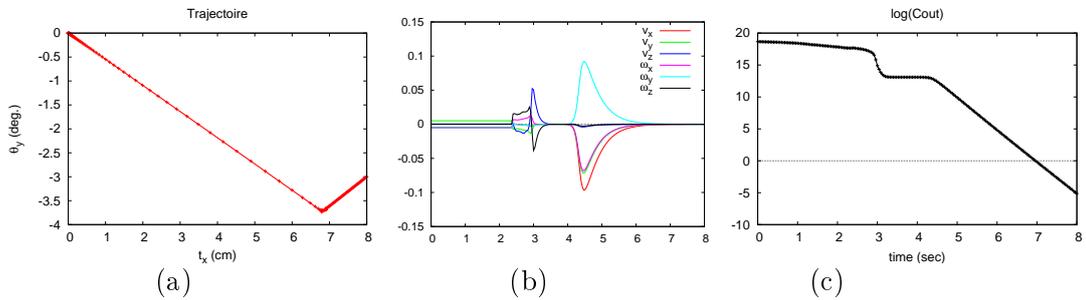


FIG. 2 – Luminance sans variation d'éclairage : (a) Chemin dans le sous-espace (t_x, θ_y) ; (b) Vitesse de la caméra (m/s ou rad/s); (c) Logarithme de la fonction de coût en fonction du temps (en s).

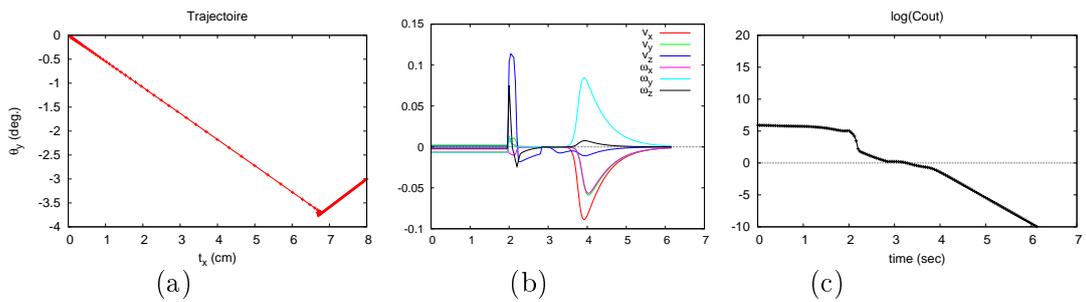


FIG. 3 – Invariant R^{L1} sans variation d'éclairage : (a) Chemin dans le sous-espace (t_x, θ_y) ; (b) Vitesse de la caméra (m/s ou rad/s); (c) Logarithme de la fonction de coût en fonction du temps (en s).

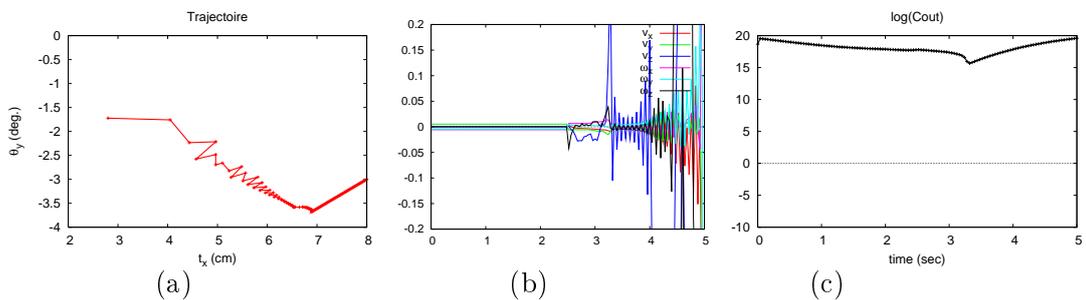


FIG. 4 – Luminance avec variation d'éclairage : (a) Chemin dans le sous-espace (t_x, θ_y) ; (b) Vitesse de la caméra (m/s ou rad/s); (c) Logarithme de la fonction de coût en fonction du temps (en s).

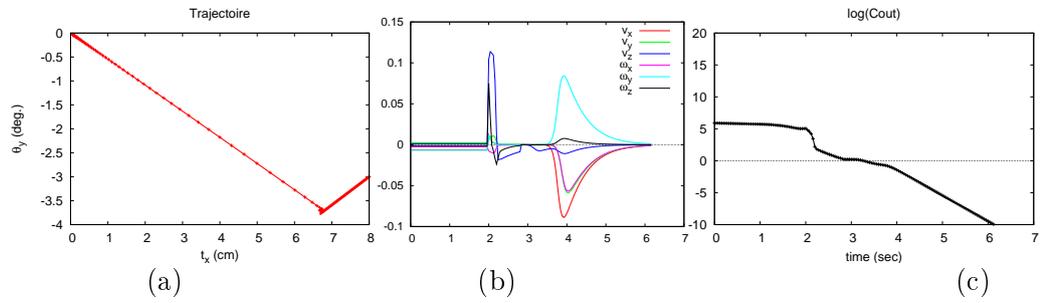


FIG. 5 – Invariant R^{L1} avec variation d'éclairage : (a) Chemin dans le sous-espace (t_x, θ_y) ; (b) Vitesse de la caméra (m/s ou rad/s); (c) Logarithme de la fonction de coût en fonction du temps (en s).

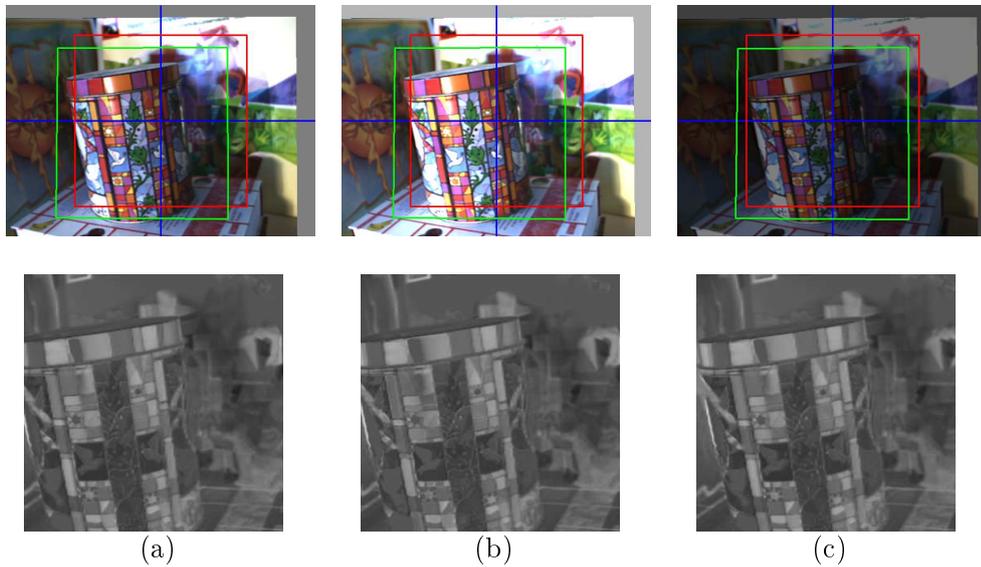


FIG. 6 – Séquence d'images lors d'une variation d'éclairage (la 2^e ligne correspond à l'image de l'invariant R^{L1} : (a) $t = 0$ s; (b) $t = 20$ s; (c) $t = 80$ s.

le minimum ; la minimisation est alors beaucoup plus facile.

Examinons à présent plus précisément (4) dans un voisinage de \mathbf{r}^* . Pour ce faire, réalisons un développement en série de Taylor au premier ordre de l'invariant $\mathbf{Inv}(\mathbf{r})$ en \mathbf{r}^*

$$\mathbf{Inv}(\mathbf{r}) = \mathbf{Inv}(\mathbf{r}^*) + \mathbf{L}_{\mathbf{Inv}^*} \Delta \mathbf{r} \quad (27)$$

où $\Delta \mathbf{r}$ correspond à la pose relative pour passer de \mathbf{r} à \mathbf{r}^* . Par suite, en portant (27) dans (4), il vient une approximation du coût dans un voisinage de \mathbf{r}^*

$$\widehat{\mathcal{C}}(\mathbf{r}) = \Delta \mathbf{r}^\top \mathbf{H}^* \Delta \mathbf{r} \quad (28)$$

avec $\mathbf{H}^* = \mathbf{L}_{\mathbf{Inv}^*}^\top \mathbf{L}_{\mathbf{Inv}^*}$. Si on s'intéresse au sous-espace (t_x, θ_y) (respectivement (t_y, θ_x)) la fonction de coût est un parabolôïde elliptique. Nous avons vu précédemment, comme le montre la figure 1d, que les iso-contours sont quasiment parallèles entre eux. L'explication est que la valeur du grand axe est très grande vis-à-vis de celle du petit axe ; c'est-à-dire que la valeur de la plus grande valeur propre est très supérieure à celle de la plus petite valeur propre. Pour obtenir des iso-contours concentriques, il faut que toutes les valeurs propres soient égales. On cherche à avoir une hypersphère localement car la minimisation est plus facile. On voudrait avoir des valeurs propres les plus similaires possibles pour éviter ce qu'on obtient sur la figure 1d.

10.2 Expérimentations

La matrice \mathbf{H} est une matrice de taille 6×6 ; elle contient donc 6 valeurs propres. Les trois premières valeurs propres correspondent aux composantes de translation et les trois dernières aux composantes de rotation. Pour être plus efficace, on choisit un invariant pour chaque composante. Chacune des six composantes de translation et de rotation peut appartenir à un invariant différent. Nous choisissons de nous intéresser uniquement aux invariants de normes L_1 et L_2 et aux attributs $c_1 c_2 c_3$, ce qui fait un total de neuf invariants. Nous avons choisi ces invariants car ce sont les plus courants et le plus simples à calculer. Cette dernière caractéristique est importante car le calcul de la matrice d'interaction doit se faire en temps réel. Nous testons toutes les combinaisons possibles (9^6) puis nous calculons le rapport de la plus grande valeur propre sur la plus petite. Le plus faible rapport obtenu correspond à la meilleure combinaison. Pour l'image choisie, les meilleurs invariants sont les invariants c_1 et c_2 tandis que le pire invariant est l'invariant R^{L_2} . Bien évidemment, le choix du meilleur invariant dépend de l'image utilisée.

Malheureusement les résultats obtenus jusqu'à présent sont plutôt décevants car les rapports sont relativement similaires à ceux obtenus avec la luminance. Nous allons, par la suite, effectuer des recherches sur de nouveaux invariants.

11 Méthodologie employée

Dans un premier temps, j'ai lu les travaux de François Chaumette et Seth Hutchinson [1] sur l'asservissement visuel classique, puis ceux de Christophe Collewet, Éric Marchand et François Chaumette [2] sur l'asservissement visuel photométrique. Enfin, j'ai lu la thèse de Michèle Gouiffès [3] qui m'a permis d'avoir une première approche des invariants couleurs et des modèles de réflexions utilisés en vision par ordinateur. Le fait d'intégrer un projet si important m'a permis de voir à quel point il est difficile de plonger dans une application conséquente déjà existante. J'ai donc dû étudier longuement la documentation et demander des renseignements avant de comprendre les techniques utilisées.

Dans un second temps, je me suis familiarisée avec la bibliothèque utilisée pour simuler des asservissements visuels et pour obtenir l'allure de la fonction de coût. Cette bibliothèque est implémentée en langage C sous Linux. Après une phase d'adaptation durant laquelle j'ai dû bien étudier l'existant et comprendre le code et les concepts utilisés, j'ai pu commencer à programmer. Pour ma part, j'ai fait en sorte de coder de manière logique et de réaliser une arborescence de fichiers correctes afin que mon travail soit facile à utiliser ultérieurement. Pour commencer, il a fallu que je complète la bibliothèque pour pouvoir traiter des images couleurs. Les tests effectués avec la luminance montrent que l'allure de la fonction de coût n'est pas très bonne. En effet, la fonction de coût est trop "pointue". De plus, lorsqu'on utilise les informations de luminance, les variations d'éclairage ne sont pas prises en compte. Pour tenter de corriger ce problème, nous avons pensé utiliser des invariants couleurs obtenus à l'aide du modèle de Shafer. Nous nous sommes alors intéressés au calcul de la matrice d'interaction dans le cas de chaque invariant couleur utilisé. Nous avons, dans un premier temps, cherché à montrer que lorsqu'on simule une variation d'éclairage l'asservissement visuel avec la luminance ne converge pas tandis qu'avec un invariant couleur il y a convergence. Enfin, nous avons effectué des tests pour trouver la combinaison d'invariants qui produit la meilleure fonction de coût.

Tout au long de ce stage, j'ai eu l'opportunité de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de ma formation. En effet, je me suis perfectionnée au langage C et j'ai dû utiliser et enrichir mes connaissances en

optimisation. J'ai également appris à utiliser \LaTeX pour rédiger quelques rapports de mes résultats et pour effectuer mon rapport de stage. Enfin, j'ai appris à me servir du logiciel Maple pour faire du calcul formel. J'ai beaucoup appris durant ce stage, notamment en robotique, en vision par ordinateur et en asservissement visuel. Toutes ces connaissances acquises me serviront sans aucun doute dans le futur.

12 Conclusion

Ce stage d'une durée de trois mois effectué dans un laboratoire de recherche m'a permis de me mettre en situation réelle et d'acquérir une expérience pratique du développement de projet technique en milieu professionnel. De plus ce stage m'a initié au monde de la recherche. Ce stage fut l'occasion de mettre en pratique les connaissances techniques acquises durant ma formation du diplôme d'ingénieur de l'IFSIC telles que la programmation en langage C, les problèmes d'optimisation, le traitement d'images, les modèles d'illumination, ainsi que des notions sur la luminance et la couleur.

J'ai présenté dans ce rapport les techniques d'asservissement visuel photométriques. Nous pouvons nous affranchir de tout traitement d'images en utilisant directement l'information de luminance en tout point de l'image dans la loi de commande. Cependant, nous avons vu que ces algorithmes échouent quand ils font face à des variations d'illumination ; c'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte les variations d'éclairage. L'utilisation des invariants couleurs a été mise en avant dans ce rapport pour améliorer la convergence et la robustesse des asservissements visuels. Cette approche a été validée en réalisant des simulations de variations d'éclairage avec des invariants photométriques.

Pour conclure, il me reste encore plus d'un mois de stage pour rechercher de nouveaux invariants photométriques et pour faire des expérimentations réelles sur la plateforme robotique du projet Lagadic. Elle est composée d'une caméra CCD montée sur l'effecteur d'un robot cartésien AFMA à six degrés de liberté 7. Ce robot est piloté par un PC Linux.



FIG. 7 – Le robot cartésien du projet Lagadic

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] C. Collewet, E. Marchand, and F. Chaumette. Visual servoing set free from image processing. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'08*, Pasadena, CA, May 2008.
- [3] M. Gouiffès. *Apport de la Couleur et des Modèles de Réflexion pour l'Extraction et le Suivi de Primitives*. PhD thesis, Université de Poitiers, Traitement du Signal et des Images, Décembre 2005.
- [4] S. Shafer. Using color to separate reflection components. *Color search and Applications*, 10(4) :210–218, 1985.