

# Étude de la rotation d'objets dans une scène par analyse polarimétrique et radiométrique de fronts d'ondes

N. Chafiqi, E. Joubert, P. Miché, M. Kétata

LCIA/INSA de Rouen  
Place Emile Blondel  
BP 08

F-76131 Mont-Saint-Aignan Cedex

Tel. : (33) 02 35 52 84 07 - Fax : (33) 02 35 52 84 83 - E-mail : [chafiqi@aigne.insa-rouen.fr](mailto:chafiqi@aigne.insa-rouen.fr)

## RÉSUMÉ

Dans ce papier, nous présentons une méthode originale de détermination de paramètres de rotation d'objets fondée sur l'analyse de l'état de polarisation des faisceaux réfléchis par la scène étudiée et une mise en correspondance spatio-temporelle par étude des histogrammes. Des résultats sur scènes réelles sont présentés.

mots clés: stéréovision, mouvement 3D, polarisation.

## ABSTRACT

In this paper, we present an original method that enables determination of rotation parameters of objects, based on the analysis of polarization state of the reflected beams from the scene. Our method uses a spatio-temporal matching based on histograms analysis. Some results are presented for real scenes.

key words: stereovision, 3D motion, polarization.

## 1. Introduction

L'étude du mouvement et de la reconstruction d'objets en trois dimensions fait actuellement l'objet de nombreuses recherches, les domaines d'applications de telles méthodes sont en effet très variés et différentes approches ont été développées [2][6][1].

Dans le domaine de la reconstruction des surfaces en trois dimensions, des méthodes dites de *stéréovision passive* (sans aucune forme de contrôle d'éclairage) permettent par approche différentielle de leur processus [3] d'établir des résultats sous forme de cartes de profondeurs. Cependant, les résultats restent généralement limités aux contours de la scène. D'autres méthodes dites *actives* proposent des résultats intéressants, mais nécessitent des conditions de mesure bien particulières. Enfin, l'utilisation de l'analyse de l'état de *polarisation* des faisceaux réfléchis d'une scène [2] procure une information pertinente de l'orientation de la surface et permet une reconstruction passive de l'objet étudié.

En ce qui concerne l'étude de séquences d'images et la détermination des paramètres de mouvement, des algorithmes proposent le calcul de la composante axiale du mouvement [4] à partir d'une séquence de cartes de disparités établies à l'aide de couple d'images stéréoscopiques. Dans le domaine de la rotation des objets, la principale approche utilise le flot optique calculé à partir de deux paires successives d'images stéréoscopiques [6]. D'autres étudient le comportement des moments bidirectionnels des projections de l'objet suivant la direction de l'observation [1], ou utilisent les mouvements contrôlés de la caméra pour estimer les paramètres du mouvement. D'une

façon générale, toutes ces méthodes utilisent une analyse radiométrique des objets de la scène sans faire appel aux paramètres de *polarisation* de la lumière.

Par ailleurs, L. B. Wolff [5] utilise cette propriété pour dissocier des objets selon les matériaux qui les composent. Sa méthode est fondée sur le principe qu'un matériau donné réfléchit un faisceau dont l'état de polarisation varie en fonction de la constante diélectrique de celui-ci. A partir de propriétés similaires, E. Joubert [2] reconstruit l'objet en partant du principe que l'état d'une onde réfléchie est fonction également de l'orientation de l'objet. La méthode que nous proposons utilise cette dernière propriété et permet de faire collaborer un système de stéréovision passif et les paramètres de *polarisation* pour déterminer la rotation d'un objet dans une scène réelle.

## 2. Principe

Le procédé physique utilisé exploite le fait qu'un front d'ondes lumineuses prend un état de polarisation partiel particulier à la réflexion sur une surface.

L'onde réfléchie peut être décomposée en deux ondes polarisées rectilignement. Les plans de polarisation de ces ondes sont respectivement parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence conformément à la figure 1.

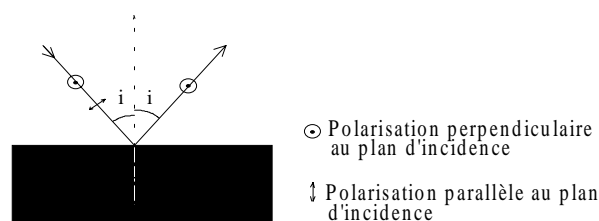


figure 1: Polarisation par réflexion sur une surface

Dans le cas d'une scène réelle éclairée par une source étendue et homogène, l'analyse de la direction d'un plan de polarisation prédominant permet d'obtenir une information concernant l'orientation du plan d'incidence du faisceau analysé. La principale caractéristique recherchée est l'angle existant entre une référence verticale et le plan de polarisation prédominant. Pour l'ensemble des points d'une scène réelle [2], les informations issues de l'analyse de l'état de polarisation de la scène permettent de construire les *cartes d'angles de polarisation*.

En définissant le plan image du système d'acquisition par les axes  $x$  et  $y$ , et par l'axe  $z$  l'axe optique de la camera, l'orientation d'un élément de surface  $dS$ , conforme à la figure 2, est entièrement caractérisée par  $p$  et  $q$ , dérivées partielles de  $z$  par rapport aux deux axes  $x$  et  $y$ .

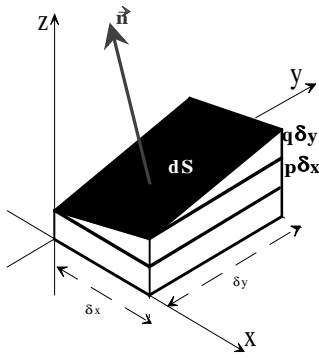


figure 2 : Caractérisation de l'orientation d'un élément de surface  $dS$

Les valeurs  $p$  et  $q$  permettent de plus de définir un vecteur normal  $\vec{n}$  à l'élément de surface  $dS$ . Ce vecteur est une donnée pertinente pour l'étude de la rotation des objets.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -p \\ -q \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Dans le cas d'une scène stéréoscopique, la connaissance des angles de polarisation dans chacune des images pour un même point physique de la scène permet de définir les orientations se rattachant à ce point. Il est possible de donner les pentes tridimensionnelles sous la forme suivante:

$$\begin{cases} p = \frac{-\sin(\alpha_g) \cdot x_{pd} \cdot \cos(\alpha_d) + \sin(\alpha_d) \cdot x_{pg} \cdot \cos(\alpha_g)}{f \cdot \sin(\alpha_d - \alpha_g)} \\ q = \frac{\sin(\alpha_d - \alpha_g) \cdot y_p - \cos(\alpha_d) \cdot \cos(\alpha_g) \cdot (x_{pg} - x_{pd})}{f \cdot \sin(\alpha_d - \alpha_g)} \end{cases} \quad (2)$$

où  $\alpha_d$  et  $\alpha_g$  représentent les angles de polarisation dans les images droite et gauche pour un même point réel,  $x_{pd}$  et  $x_{pg}$  les abscisses dans les plans images droit et gauche des projections de ce point et  $y_p$  l'ordonnée commune dans les deux images.  $f$  désigne la distance entre le centre optique de chaque camera et le plan image associé.

### 3. Rotation d'un objet dans une scène

Dans le cas de la rotation d'un objet rigide dans une scène, le vecteur normal à un élément de surface à l'instant  $t_1$  noté  $\vec{n}_1$ , subit une rotation d'axe  $(o'v)$  et d'angle  $\theta$ . La détermination de ses nouvelles coordonnées à l'instant  $t_2$  permet de situer dans l'espace le vecteur  $\vec{n}_2$  (figure 3a):

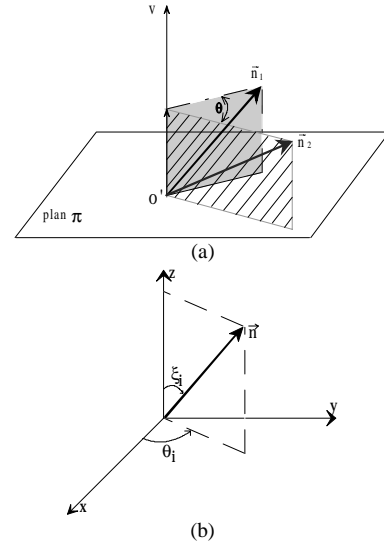


figure 3: (a) Rotation du vecteur normal  $\vec{n}_1$  autour d'un axe quelconque  
(b) Représentation du vecteur normal dans le repère  $(Oxyz)$

En effet, en effectuant la projection des deux vecteurs sur le plan  $\pi$  (plan perpendiculaire à l'axe  $(o'v)$ ) et sur l'axe de rotation  $(o'v)$ , l'expression de  $\vec{n}_2$  après une rotation d'un angle  $\theta$  de  $\vec{n}_1$  est donnée par:

$$\vec{n}_2 = \vec{n}_1 + (\sin \theta) \vec{v} \wedge \vec{n}_1 + (1 - \cos \theta) \vec{v} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{n}_1) \quad (3)$$

Le problème de la localisation du vecteur normal à l'instant  $t_2$  revient à établir une mise en correspondance spatio-temporelle des données polarimétriques. Pour cela, des cartes de pentes normées (issues du vecteur normé) sont calculées pour chaque position de l'objet. Par la suite, des histogrammes de répartition des pentes normées sont construits.

La construction des histogrammes de répartition met en évidence les classes d'orientation des surfaces de l'objet étudié. Ces classes sont caractérisées par des modes généralement centrés sur la pente moyenne d'une surface. Une mise en correspondance entre les cartes des pentes  $p$  et  $q$  réalisée après une segmentation en région permet de définir des couples de pentes  $(p, q)$  pour chaque facette extraite. Ce premier résultat est classé sous forme d'un tableau donnant le numéro de mode  $(Mi)$  et les pentes correspondant à ce mode. Ces mêmes opérations sont effectuées après chaque rotation.

Dans le cas d'une rotation du vecteur normal  $\vec{n}$  autour d'un axe donné d'un repère  $(Oxyz)$ , on définit par  $\xi_i$  l'angle existant entre le vecteur normal et l'axe de rotation, et par  $\theta_i$  l'angle de rotation. Ces deux angles sont directement

déterminés à partir des composantes du vecteur normal. Si l'on considère par exemple une rotation autour de l'axe z (figure 3b), les angles  $\xi_1$  et  $\theta_1$  sont donnés par:

$$\xi_1 = \arcsin\left(\frac{-p^*}{\cos \theta_1}\right) \text{ et } \theta_1 = \arctan\left(\frac{p^*}{q^*}\right) \quad (4)$$

avec

$$\begin{cases} p^* = \frac{p}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \\ q^* = \frac{q}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \end{cases} \quad (5)$$

Pour une rotation d'angle  $(\theta_{t2}-\theta_{t1})$ , l'angle  $\xi_1$  ne varie pas entre les deux instants. De même, les angles  $(\xi_2, \theta_2)$  et  $(\xi_3, \theta_3)$  définissent respectivement les rotations autour de y et x:

$$\xi_2 = \arccos(-q^*) \text{ et } \theta_2 = \arcsin\left(\frac{-p^*}{\sin \xi_2}\right) \quad (6)$$

$$\xi_3 = \arccos(-p^*) \text{ et } \theta_3 = \arcsin\left(\frac{-q^*}{\sin \xi_3}\right) \quad (7)$$

Sachant que  $\xi_i \in [0, \pi]$  et  $\theta_i \in [0, 2\pi]$ , le calcul de  $\theta_i$  et  $\xi_i$  sera différent selon les signes de  $q^*$  et  $p^*$ . L'équation (6), par exemple sera définie de la manière suivante:

$$\begin{cases} \xi_2 = \arccos(-q^*) \text{ si } q^* < 0 \\ \xi_2 = \pi - \arccos(-q^*) \text{ si } q^* \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

et

$$\begin{cases} \theta_2 = \arcsin\left(\frac{-p^*}{\sin \xi_2}\right) \text{ si } p^* < 0 \\ \theta_2 = 2\pi - \arcsin\left(\frac{-p^*}{\sin \xi_2}\right) \text{ si } p^* \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

En effet l'extraction des modes  $M_i(p_i, q_i)$  détermine à chaque instant les nouvelles orientations de l'objet. Cependant, aucune information concernant la rotation (axe et amplitude) n'est disponible; pour pallier ce problème, un processus en trois étapes a été défini.

Dans un premier temps, l'hypothèse est faite qu'un mode  $M_i$  à l'instant  $t_1$  peut correspondre à chacun des modes  $M_j$  à l'instant  $t_2$ . Partant de cette hypothèse, pour chaque couple  $(M_i, M_j)$ , les valeurs des angles  $(\xi_i, \theta_i)$  et  $(\xi_j, \theta_j)$  sont calculées. Dans une deuxième étape, la validité de l'hypothèse est vérifiée; pour cela, seules les valeurs  $\theta$  qui donnent un angle  $\xi$  constant entre les deux instants sont retenues. Enfin, à partir des validations précédentes, une valeur d'angle de rotation ainsi que l'axe associé (x, y ou z) sont proposés.

Ces différentes étapes donnent lieu à un algorithme qui présente la structure suivante:

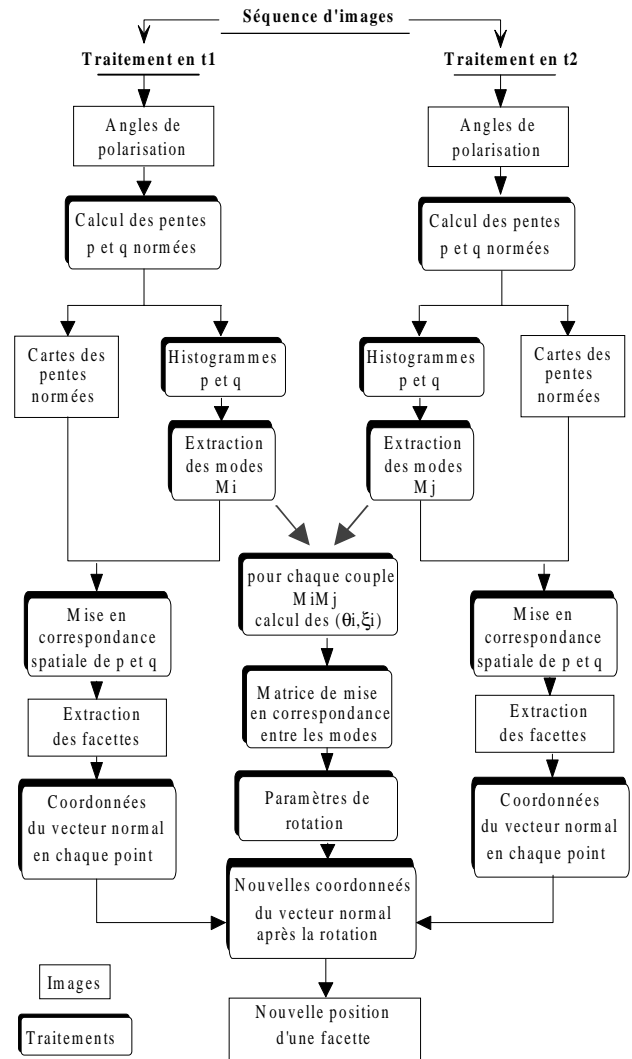
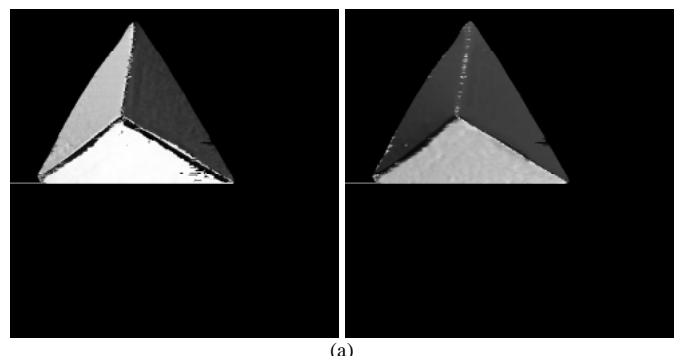


figure 4: Algorithme d'extraction de paramètres de rotation

### 4. Résultats

Les résultats présentés concernent la séquence d'une scène constituée d'une pyramide d'une taille approximative de 3cm. L'objet est placé sur un plan horizontal situé à 13cm du système d'acquisition. Entre les deux scènes, les conditions d'acquisition sont sensiblement identiques. Le système d'acquisition est constitué de deux caméras CCD coplanaires. Les images sont au format 512\*512 pixels. Le temps de traitement nécessaire pour l'élaboration des cartes des pentes p et q est de l'ordre de 3s (sur un Pentium 133Mhz) sans tenir compte des phases d'acquisition des cartes de polarisation.



(a)

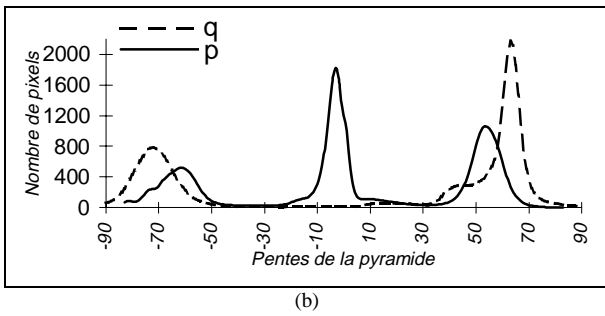


figure 5: (a) Cartes des pentes p et q en  $t_1$   
(b) Histogrammes des pentes normées en  $t_1$

La figure ci-dessus montre la répartition des classes de l'objet avant la rotation, les histogrammes présentés sont lissés à l'aide d'une gaussienne centrée (d'écart type  $\sigma=2$ ). Ces valeurs sont exprimées en pourcentage. Trois modes en  $t_1$  sont obtenus:

$$M_1 = (-61, 50) \quad M_2 = (-5, -73) \quad M_3 = (52, 62)$$

Une rotation de  $7^\circ$  de la pyramide est effectuée autour de l'axe z, la figure 6 donne le résultat de cette opération et les histogrammes correspondants.

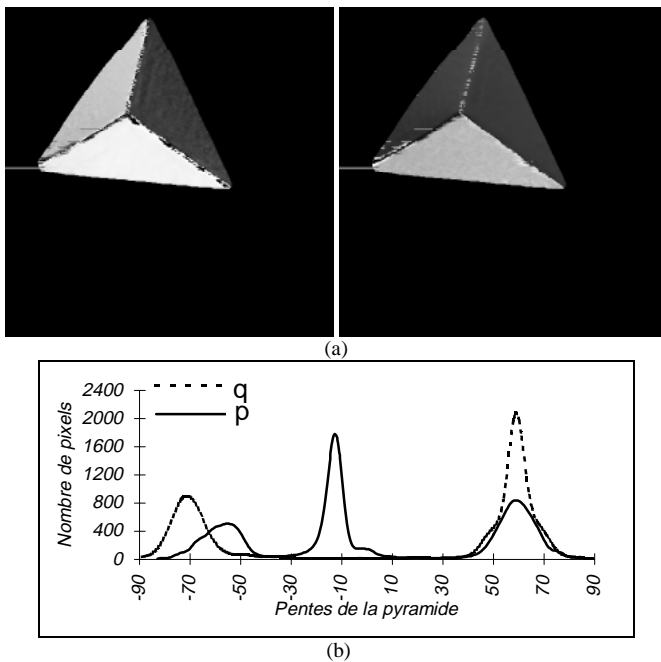


figure 6: (a) Cartes des pentes p et q en  $t_2$   
(b) Histogrammes des pentes normées en  $t_2$

Un décalage des classes de l'objet est constaté. Trois modes sont ainsi extraits:

$$M_1 = (-56, 57) \quad M_2 = (-13, -71) \quad M_3 = (59, 57)$$

A partir des équations (4)(6) et (7), les rotations sont calculées suivant les trois axes. Le tableau 1 donne l'exemple de calcul des angles pour une mise en correspondance entre  $M_1 = (-61, -50)$  en  $t_1$  et  $M_1 = (-56, 57)$  en  $t_2$ .

$\Delta\xi_1 = 0.97^\circ$	$\Delta\theta_1 = 6.16^\circ$
$\Delta\xi_2 = 4.75^\circ$	$\Delta\theta_2 = 1.81^\circ$
$\Delta\xi_3 = 3.53^\circ$	$\Delta\theta_3 = 4.29^\circ$

Tableau 1: variation des angles  $\theta_i$  et  $\xi_i$

Le tableau 1 montre que seule la rotation autour de l'axe z est prise en compte. Pour les deux surfaces représentées par  $M_1(t_1)$  et  $M_1(t_2)$ ,  $\Delta\theta_1 = 6.16^\circ$  est retenu, l'angle  $\xi_1$  étant sensiblement le même entre les deux instants.

$t_2 \setminus t_1$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
$M_1$	$(6.16^\circ; z)$	$(-; -)$	$(-; -)$
$M_2$	$(-; -)$	$(6.45^\circ; z)$	$(-; -)$
$M_3$	$(-; -)$	$(-; -)$	$(6.00^\circ; z)$

(-) indéfini

Tableau 2: Matrice de mise en correspondance temporelle des modes

L'étude de la matrice représentée en tableau 2 donne un angle de rotation d'environ  $6.5^\circ$  autour de l'axe z. L'équation (3) permet de retrouver la position spatiale d'un élément de surface après cette rotation. Une extension de ce calcul pour déterminer la rotation autour d'un axe quelconque est en cours d'étude.

### 5. Conclusion

La collaboration d'un système de stéréovision passif spécifique et de l'analyse de l'état de polarisation des faisceaux réfléchis nous a permis d'élaborer une nouvelle méthode de segmentation en régions fondée sur l'étude des pentes d'un objet. Les résultats présentés montrent la capacité à estimer l'angle de rotation d'un objet avec une précision correcte, même si quelques problèmes liés à une trop grande ressemblance polarimétriques entre les deux points de vue de la scène engendre une légère erreur dans la détermination des pentes. Cette erreur sera néanmoins limitée dans un avenir proche par une modification adaptée de la structure d'acquisition (écartement des caméras).

De manière générale, nous pouvons constater que cette collaboration procure des résultats intéressants pour la détermination des paramètres de rotation de l'objet sans connaissances *a priori*.

### 6. Bibliographie

- [1] J. Brochard, L. Coutin and M. Leard, *Modelling of rigid objects by bidimensional moments. Applications to the estimation of 3D rotation*, Pattern Recognition, Vol.29 (6), pp.889-902, 1996.
- [2] E. Joubert, P. Miché, R. Debrie, *Reconstruction de surface 3D par analyse en stéréovision passive de la polarisation de la lumière*, Congrès Opto94, pp.438-442.
- [3] A. Bensrhair, P. Miché, V. Oksenhendler, R. Debrie, *Fast and self-adaptive stereovision algorithms for implementation in a 3-D vision sensor*, Journal of Automation and CIM, Vol. 8 (2-3), pp.423-428, 1995.
- [4] S. Mousset, P. Miché, R. Debrie, *détermination de la composante axiale de la vitesse d'objets dans une scène réelle*, Journal of Automation and CIM, Vol. 8 (2-3), pp.279-284, 1995.
- [5] L. B. Wolff and E. Boulton, *Constraining object features using a polarization reflectance model*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13 (7), pp.635-657, 1991.
- [6] A. Yuk-Kwan Ho and T. Pong, *Cooperative fusion of stereo and motion*, Pattern Recognition, Vol.29 (1), pp.121-130, 1996.