

# Estimation numérique des courbes épipolaires pour les capteurs omnidirectionnels

## Numerical estimation of epipolar curves for omnidirectional sensors

Jonathan Fabrizio, Jean Devars

### Résumé

La géométrie épipolaire des paires de capteurs omnidirectionnels est souvent difficile à exprimer analytiquement. Nous proposons un algorithme pour estimer numériquement les courbes épipolaires des paires de capteurs omnidirectionnels. Cet algorithme n'est toutefois pas limité à ce type de capteur et fonctionne, par exemple, avec une combinaison d'un capteur panoramique et d'une caméra classique. Bien que la charge de calcul requise soit lourde, cet algorithme a l'avantage de fonctionner avec tous les types de capteurs, si la paire de capteurs est complètement calibrée (tous paramètres déterminés). En particulier l'algorithme est applicable pour les capteurs catadioptriques ne respectant pas la contrainte du foyer de projection unique.

### Mots clés

Géométrie épipolaire, Stéréovision, Capteurs omnidirectionnels.

### Abstract

The epipolar geometry of couples of omnidirectional sensors is often difficult to express analytically. We propose an algorithm to estimate numerically epipolar curves from omnidirectional pairs of stereovision. This algorithm is not limited to this type of sensors and works, for example, with a combination

Revue Traitement du Signal Special Issue « Vision Omnidirectionnelle » Volume 22, Number 5, December, 2005
--

of a panoramic sensor and a traditional camera. Although the load of calculation necessary for this algorithm is heavy, it works with every kind of sensor (provided that the stereovision pair is completely calibrated) especially with sensor that do not respect the single viewpoint constraint.

## Keywords

Epipolar geometry, Stereovision, Omnidirectional sensors.

## 1 Introduction

La vision panoramique présente des avantages incontestables pour beaucoup d'applications, particulièrement dans les domaines de la vidéo surveillance et de la navigation. Il est intéressant de travailler en stéréovision et d'utiliser, soit des paires de caméras omnidirectionnelles, soit des paires mixtes qui associent caméra classique et caméra panoramique. Cela nécessite de déterminer la géométrie épipolaire de la paire de caméras.

Plusieurs études réalisent un travail en stéréovision à partir de capteurs omnidirectionnels. Ishiguro et al., dans [IYT92], simulent une paire de capteurs omnidirectionnels en utilisant une unique caméra en rotation et en traitant, dans son image, deux colonnes de pixels éloignées l'une de l'autre afin de simuler deux caméras linéaires en rotation. Benosman, dans [Ben97], réalise une paire de stéréovision avec deux barrettes CCD linéaires en rotation l'une au dessus de l'autre. Dans cette configuration, la géométrie épipolaire ne présente pas de difficulté. Récemment, Smadja, dans [Sma03], présente un couple de caméras omnidirectionnelles avec deux capteurs cylindriques dans une position quelconque.

Gluckman et al. ainsi que Lin et Bajcsy dans [GTN98] et [LB03] respectivement, proposent d'utiliser des capteurs panoramiques catadioptriques. Ils utilisent les deux capteurs de manière coaxiale pour contourner le problème de l'estimation de la géométrie épipolaire. C'est aussi le cas pour les capteurs à base de miroir à double courbure présentés dans [SBFR96, FB02]. Dans ces configurations, les courbes épipolaires sont les lignes radiales de l'image, indépendamment du profil du miroir des capteurs.

Les expressions analytiques des courbes épipolaires pour des paires de capteurs catadioptriques munis de miroirs hyperboliques, paracatadioptriques, ellipsoïdaux et plans sont données dans [NN98, Svo99]. Enfin Sturm, dans [Stu02], envisage de coupler des caméras classiques avec des capteurs paracatadioptriques.

Dans l'ensemble de ces travaux, les expressions analytiques des courbes épipolaires sont calculées, soit pour des capteurs disposant de foyer unique de projection, soit, dans le cas contraire, pour des configurations particulières. Dans le premier cas, il y a malheureusement peu de capteurs panoramiques catadioptriques qui disposent d'un tel foyer et les capteurs disposant de ce foyer sont soumis à certaines contraintes très restrictives. D'une part, seuls quelques profils de miroirs permettent d'obtenir cette propriété ([BN99]), il n'est donc pas toujours possible d'obtenir le champ visuel que l'on souhaite. D'autre part, le positionnement du miroir face à la caméra doit être parfait, un déplacement du miroir, même infime, annulerait la présence du foyer de projection unique. Dans la pratique, il est souvent préférable de ne pas supposer avoir un tel foyer tant il est difficile de l'obtenir. Dans le second cas, les courbes ne sont fournies que pour des configurations particulières. Pour pouvoir exprimer ces courbes dans le cas général, il faut prendre en considération les caustiques [SGK01], ce qui rend les calculs très complexes. Nous proposons une méthode numérique pour estimer les courbes épipolaires d'une paire de capteurs panoramiques basée sur le même principe que celui utilisé par Sturm dans [SR04]. Cette méthode n'est pas restreinte à ce type de capteurs. Nous l'utiliserons avec des paires de capteurs omnidirectionnels mais aussi avec des paires hétérogènes (caméra classique/caméra panoramique). Notre méthode impose que la paire de capteurs soit préalablement calibrée.

Nous décrirons d'abord la méthode puis, nous la vérifierons sur un cas idéal (dont l'expression analytique des courbes épipolaires est connue). Celui ci sera constitué d'une caméra classique et d'une caméra paracatadioptrique munie d'un miroir à profil hyperbolique idéalement placé. Ensuite nous présenterons quelques résultats obtenus à partir d'un couple panoramique/panoramique et d'autres obtenus à partir d'un couple hétérogène classique/panoramique. Enfin nous concluons.

## 2 Principe de la méthode

Deux pixels de deux capteurs peuvent être mis en correspondance si les droites de l'espace d'où proviennent ces pixels se croisent. Il nous suffit donc, pour un pixel donné d'une image d'un capteur, de parcourir l'image de l'autre capteur afin de trouver l'ensemble des droites de l'espace qui se coupent. Il est possible, en re-itérant la recherche pour l'ensemble des pixels de la première image, d'obtenir la totalité des courbes épipolaires du système. Ce processus est la base de notre algorithme. Toutefois, du fait de la discrétisation due au capteur, cette méthode ne fonctionne pas car, dans la pratique, il est qua-

siment impossible de trouver une intersection de droite dans l'espace. Nous avons cherché à contourner ce problème en fixant un seuil, sur la distance entre les droites, en dessous duquel on considère que les droites sont sécantes. Cependant, la détermination de ce seuil s'est avérée complexe, trop de paramètres entrant en jeu (type des capteurs, position relative des capteurs, position du pixel dans l'image...). Nous avons donc choisi de procéder de la façon suivante : pour un pixel de la première image, nous parcourons l'autre image en attribuant un score à chaque pixel. Ce score dépend uniquement de la distance qui sépare les deux droites de l'espace : plus la distance entre les droites diminue, plus le score est élevé. Au delà d'une certaine distance, le score est nul. La distance  $d$  entre deux droites non coplanaires de l'espace ( $D(A, \vec{u})$  et  $D'(A', \vec{u}')$ ) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$d(D, D') = \frac{\overrightarrow{AA'} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{u}')}{\|\vec{u} \wedge \vec{u}'\|} \quad (1)$$

Il devient alors aisé d'extraire les courbes épipolaires. En effet, cela revient à extraire les lignes de crête des tables des scores. Pour cela, nous sélectionnons uniquement un pixel si son score est soit supérieur à celui des pixels au dessus et en dessous de lui, soit supérieur à celui des pixels à sa droite et à sa gauche. Dans la pratique, nous utilisons des masques 3x1 et 1x3 comme cela se fait couramment. Cette méthode nous garantit d'obtenir des courbes de largeur 1 pixel, ce qui ne serait pas garanti en utilisant un seuil fixe. Il arrive que des artefacts apparaissent. Il est facile de les éliminer en ajoutant les contraintes :

- l'orientation de la crête en un point doit être quasi orthogonale à l'orientation du gradient,
- un point de crête ne doit jamais être adjacent à un point dont le score est nul dans la table des scores,
- éventuellement, les points de crête doivent avoir un score supérieur à un seuil calculé par rapport à la moyenne des scores.

Une des limites de cette méthode est sa grande charge de calcul. Nous accélérons les traitements par diverses améliorations. Par exemple, par sous-échantillonnage, il est possible de ne calculer le score que d'un pixel sur deux et de ne calculer le score d'un pixel intermédiaire que si le score de l'un de ses voisins est positif. Notons que pour des capteurs rigidement liés, le calcul est fait une fois pour toutes après calibrage.

Par ailleurs, pour accélérer la phase d'appariement, il faut rectifier l'image afin de redresser les courbes épipolaires comme proposé dans [GBL03, GD03]. Néanmoins, ces méthodes changent les voisinages de chaque pixel, ce qui peut nuire à la phase d'appariement. Nous préférons faire un adressage indexé des pixels : les coordonnées de chaque pixel d'une même courbe sont

ordonnées linéairement dans un tableau. Ainsi pour parcourir la courbe, il suffit de parcourir le tableau, qui nous fournit la position de chaque pixel dans l'image, nous avons donc aussi son voisinage. L'ensemble des tableaux obtenus représente l'ensemble des courbes épipolaires, donc une représentation des coordonnées des pixels de l'image rectifiée.

Vérifions sur un cas idéal notre algorithme.

### 3 Validation de l'algorithme

Pour valider notre méthode, simulons un couple de caméras composé d'un capteur catadioptrique panoramique respectant la contrainte du foyer unique et d'une caméra classique à capteur plan. Nous choisissons un miroir à profil hyperbolique pour le capteur catadioptrique.

Dans ce cas, nous trouvons l'expression analytique des courbes épipolaires. Dans le repère miroir (centré sur le centre de l'hyperboloïde et l'axe des  $z$  orienté vers le haut), le miroir  $M$  a pour équation :

$$\frac{(z + e)^2}{a^2} - \frac{x^2 + y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

avec  $e$ ,  $a$  et  $b$  les paramètres de l'hyperboloïde tel que :

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3)$$

d'où :

$$(z + e)^2 b^2 - (x^2 + y^2) a^2 - a^2 b^2 = 0 \quad (4)$$

Soient  $F_1$  et  $F_1'$  les foyers respectifs du miroir et de la caméra panoramique et  $F_2$  le foyer de la caméra classique. Soit un point image  $P_i$  de la caméra classique, l'équation du plan épipolaire  $(F_2, F_1, P_i)$  est :

$$\begin{vmatrix} x - F_{2x} & y - F_{2y} & z - F_{2z} \\ x - F_{1x} & y - F_{1y} & z - F_{1z} \\ x - P_{ix} & y - P_{iy} & z - P_{iz} \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

soit :

$$(F_{2y}P_{iz} - F_{2z}P_{iy})x + (P_{ix}F_{2z} - F_{2x}P_{iz})y + (F_{2x}P_{iy} - P_{ix}F_{2y})z = 0 \quad (6)$$

En posant :

$$p = (F_{2y}P_{iz} - F_{2z}P_{iy}) \quad (7)$$

$$q = (P_{ix}F_{2z} - F_{2x}P_{iz}) \quad (8)$$

$$s = (F_{2x}P_{iy} - P_{ix}F_{2y}) \quad (9)$$

(6) devient :

$$z = -\frac{p}{s}x - \frac{q}{s}y \quad (10)$$

En combinant (10) avec (4) nous trouvons l'expression de l'intersection du plan épipolaire avec le miroir :

$$\left(-\frac{p}{s}x - \frac{q}{s}y + e\right)^2 b^2 - (x^2 + y^2)^2 a^2 - a^2 b^2 = 0 \quad (11)$$

Ce qui donne :

$$\begin{pmatrix} x & y & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p^2 b^2 - s^2 a^2 & -pqb^2 & -sep b^2 \\ -pqb^2 & q^2 b^2 - s^2 a^2 & -seq b^2 \\ -sep b^2 & -seq b^2 & s^2 e^2 b^2 - s^2 a^2 b^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (12)$$

Cette intersection est une conique que nous noterons  $A(P_i)$ . Elle est exprimée dans le plan épipolaire. Pour trouver l'équation de cette courbe dans l'espace, nous avons deux possibilités : soit en utilisant le fait que la courbe appartient au miroir, soit en utilisant le fait que la courbe appartient au plan. Nous utiliserons le fait que la courbe appartient au plan.

Soit  $m$  un point de la conique :

$$m = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Dans le repère miroir nous avons (d'après (10)).

$$M = \begin{pmatrix} x \\ y \\ -\frac{px}{s} - \frac{qy}{s} \end{pmatrix} \quad (14)$$

donc :

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{p}{s} & -\frac{q}{s} & 0 \end{pmatrix} m \quad (15)$$

Dans le repère caméra nous obtenons :

$$M - F'_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{p}{s} & -\frac{q}{s} & 2e \end{pmatrix} m \quad (16)$$

d'où

$$m = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{p}{2se} & \frac{q}{2se} & \frac{1}{2e} \end{pmatrix} (M - F'_1) \quad (17)$$

Posons :

$$N = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{p}{2se} & \frac{q}{2se} & \frac{1}{2e} \end{pmatrix} \quad (18)$$

donc l'équation (12) devient :

$$(M - F'_1)^t N^t A(P_i) N (M - F'_1) = 0 \quad (19)$$

Que nous notons :

$$(M - F'_1)^t B(P_i) (M - F'_1) = 0 \quad (20)$$

Il faut maintenant trouver l'équation de cette conique dans l'image de la caméra panoramique. Pour cela, nous exprimons  $M$  de manière paramétrique :

$$M = F'_1 + \lambda \vec{w} \quad (21)$$

En calculant l'intersection avec le plan épipolaire nous trouvons :

$$\lambda = \mathcal{F}(\vec{w}) = \frac{2se}{pw_x + qw_y + sw_z} \quad (22)$$

donc

$$M - F'_1 = \mathcal{F}(\vec{w}) \vec{w} \quad (23)$$

l'équation (20) devient :

$$(\mathcal{F}(\vec{w}) \vec{w})^t B(P_i) (\mathcal{F}(\vec{w}) \vec{w}) = 0 \quad (24)$$

Ce qui peut se ré-écrire :

$$w^t C(P_i) w = 0 \quad (25)$$

avec

$$C(P_i) = K B(P_i) \quad (26)$$

$$K = 4s^2 e^2 \quad (27)$$

Si on a, pour un pixel  $q$  de l'image panoramique :

$$w = Hq \quad (28)$$

En remplaçant  $w$  dans l'expression (25) nous obtenons :

$$q^t H^t C(P_i) Hq = 0 \quad (29)$$

Ce qui donne :

$$q^t H^t K (N^t A(P_i) N) H q = 0 \quad (30)$$

Nous avons donc l'équation analytique des courbes épipolaires dans le plan image de la caméra panoramique.

Nous vérifions notre algorithme en prenant des points de l'espace puis en les projetant virtuellement sur le plan image de la caméra panoramique et sur le plan image de la caméra classique. Nous choisissons l'un de ces points sur le plan image de la caméra classique et calculons, à l'aide de l'équation (30), l'équation de la courbe épipolaire associée sur le plan image de la caméra panoramique (figure 1). De même, nous déterminons la courbe épipolaire à l'aide de notre algorithme : la recherche des crêtes de la table des scores nous fournit la courbe épipolaire (figure 2). Le courbe trouvée analytiquement et la courbe trouvée par notre méthode sont identiques (figure 3) à la différence que notre algorithme a éliminé une partie de la courbe. Cette partie correspond à une zone cachée derrière le miroir (cette zone ne peut donc pas être appariée).

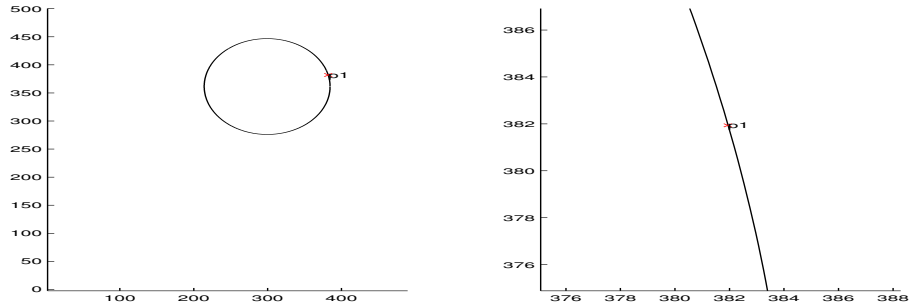


FIG. 1 – Courbe épipolaire théorique sur le plan image de la caméra panoramique. A gauche la courbe complète, à droite (zoom), la courbe passe bien par le pixel sélectionné.

## 4 Application à des images réelles

Appliquons notre algorithme sur deux configurations différentes : l'une reposant sur une paire composée de deux capteurs panoramiques et l'autre sur une paire composée d'un capteur panoramique et d'un capteur plan classique.



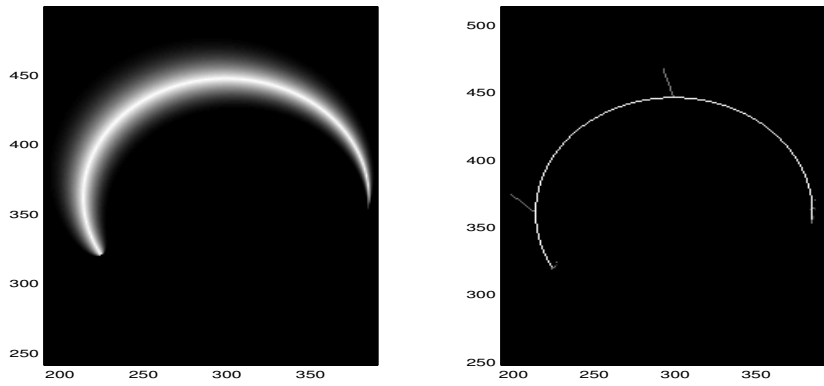


FIG. 2 – Détermination numérique de la courbe épipolaire. A gauche la carte des scores obtenus. A droite la ligne des crêtes de la table des scores (Nous noterons la présence d’artéfacts en gris qui sont supprimés par l’ajout des contraintes supplémentaires).

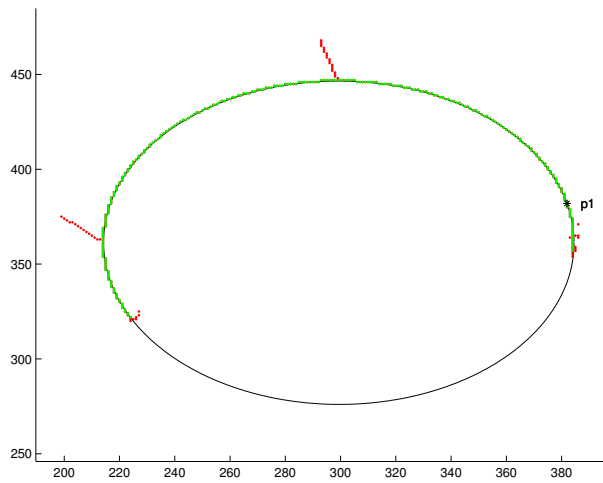


FIG. 3 – Les courbes épipolaires obtenues analytiquement et numériquement se superposent : en noir la courbe analytique, en vert la courbe estimée par notre algorithme, en rouge les points des crêtes rejetés par notre algorithme. Le pixel appartient bien à la zone commune aux deux courbes.

## 4.1 Couple de caméras panoramique/panoramique

Supposons les capteurs calibrés à l'aide de la méthode présentée dans [FTB02]. Les paramètres intrinsèques ainsi que la position relative du miroir face à la caméra sont donc connus. Nous calculons l'ensemble des droites de l'espace issues de chaque pixel. Prenons deux images (figure 4) et estimons la position relative entre les deux capteurs : chaque capteur est localisé relativement à

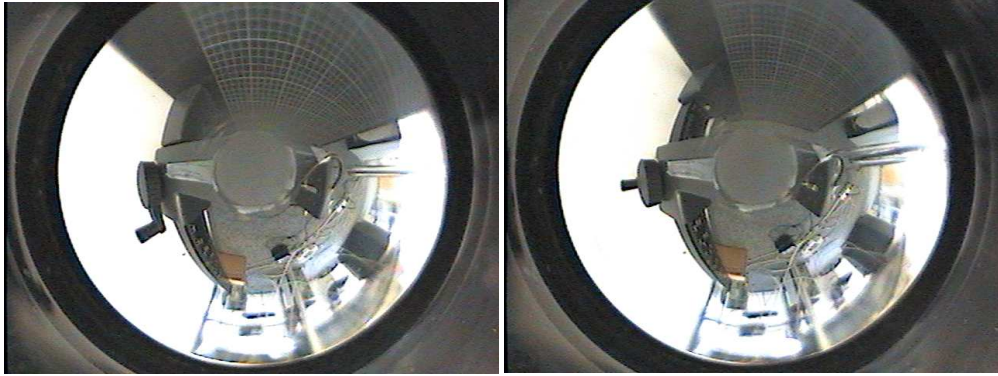


FIG. 4 – Deux images panoramiques de la scène.

un objet connu de la scène à l'aide du calcul de pose présenté dans [FD04] et les résultats sont recalés à l'aide de l'algorithme ICP [BM92] afin d'obtenir la transformation entre les deux repères capteurs.

Il ne reste plus qu'à appliquer notre algorithme. Nous sélectionnons un point dans la première image (figure 5), calculons la table des scores de la seconde images (figure 6) puis extrayons la crête pour obtenir la courbe épipolaire (figure 7). La courbe passe bien par le pixel déterminé au départ.

## 4.2 Couple de caméras panoramique/classique

Pour ce qui concerne un couple hétérogène panoramique/classique, procédons comme dans l'exemple précédent. Nous calibrons nos capteurs et nous calculons, une fois pour toutes, l'ensemble des droites de l'espace dont sont issus les pixels. Puis, nous estimons la position relative entre les deux capteurs. Enfin, nous appliquons notre algorithme. Nous avons deux images de la même scène, nous sélectionnons un point dans l'image panoramique (figure 8), nous calculons la table des scores sur l'image plan (figure 9). L'extraction des crêtes de la table des scores nous fournit la courbe épipolaire (figure 10).

Réciproquement, conduisons le test dans l'autre sens : nous choisissons un

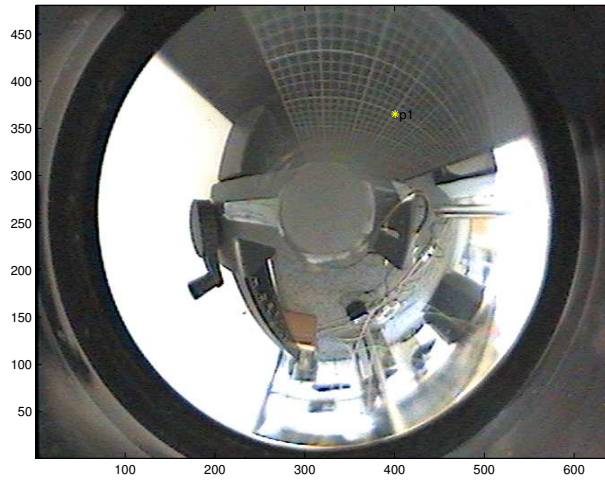


FIG. 5 – Sélection d'un point dans l'image panoramique.

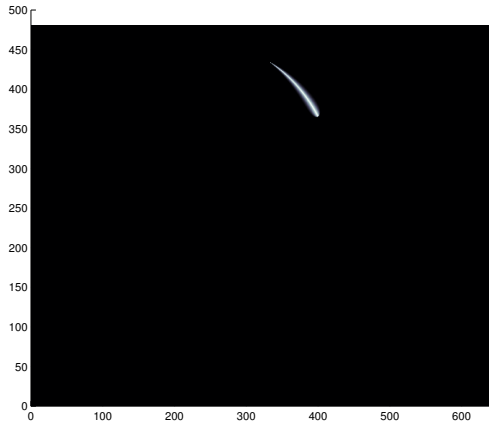


FIG. 6 – Table des scores.

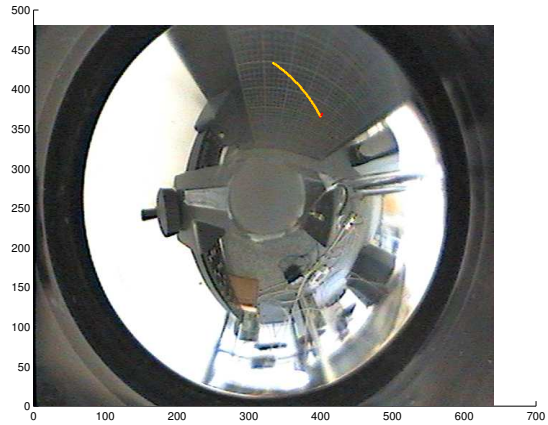


FIG. 7 – En jaune, la courbe épipolaire estimée dans l'image du second capteur. La courbe passe bien par le pixel origine. En rouge, des points de crête exclus de la courbe épipolaire.

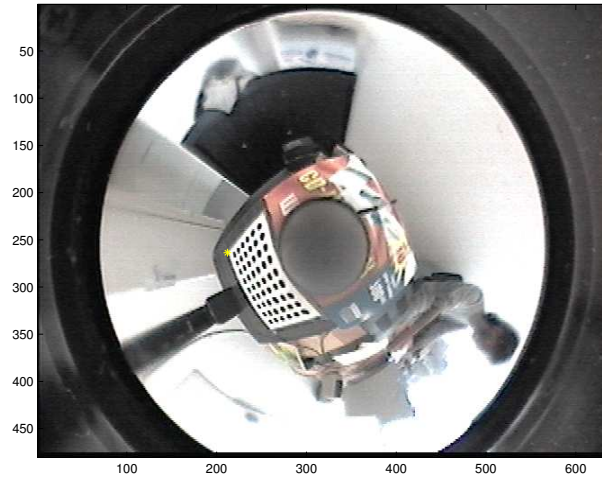


FIG. 8 – Sélection d'un point dans l'image panoramique

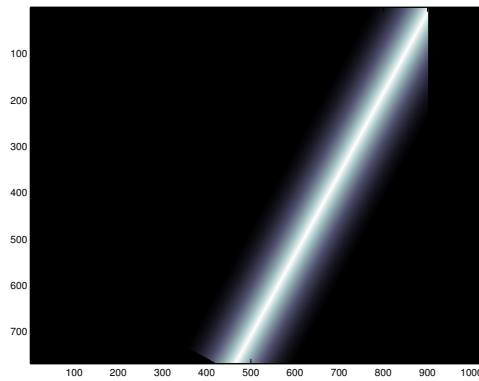


FIG. 9 – Table des scores.

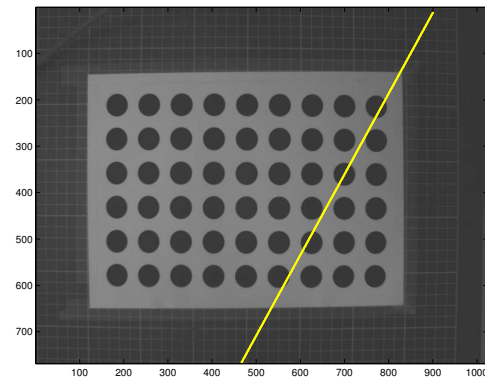


FIG. 10 – Courbe épipolaire obtenue sur l'image de la caméra classique.

point dans l'image plan (figure 11), calculons la table des scores de l'image panoramique (figure 12) puis, extrayons les lignes de crêtes (figure 13). Dans les deux démarches duales, les courbes épipolaires passent bien par le pixel sélectionné.

Remarquons que les courbes épipolaires fournies par notre méthode sont,

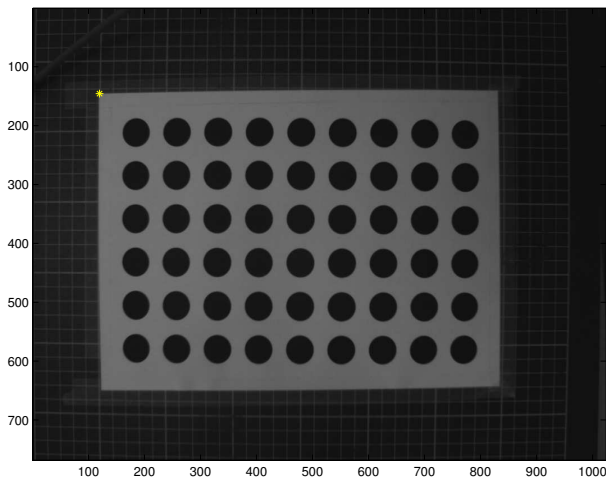


FIG. 11 – Sélection d'un point sur l'image de la caméra classique.

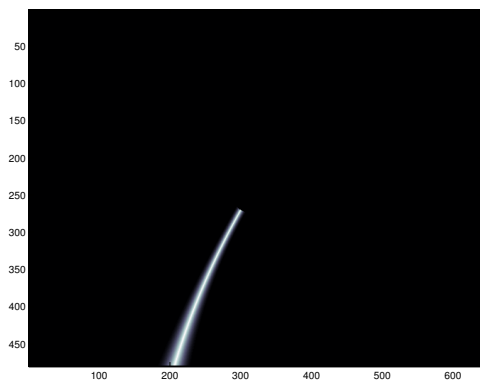


FIG. 12 – Table des scores.

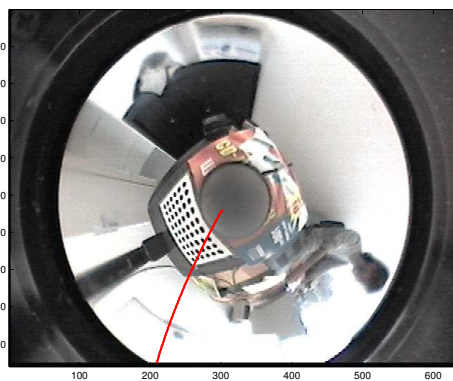


FIG. 13 – Courbe épipolaire estimée sur l'image de la caméra panoramique.

en général, plus réduites que les courbes épipolaires fournies analytiquement. En effet, notre algorithme présente l'avantage d'éliminer les pixels qui appartiennent au même plan épipolaire mais dont l'intersection des droites dans

l'espace à lieu derrière le capteur. Notre algorithme est une alternative aux méthodes d'élimination des faux appariements induits par les contraintes de visibilité ([Har93, WP01]).

## 5 Conclusion

Nous avons mis au point un algorithme pour estimer numériquement les courbes épipolaires, indépendamment du type de capteur utilisé. Nous avons vérifié cet algorithme sur une simulation analytique puis, nous l'avons appliqué sur deux exemples, l'un avec une paire de caméras panoramique/panoramique l'autre avec une paire de caméras panoramique/classique. Cet algorithme comporte une combinatoire élevée, mais il a l'avantage d'éviter des appariements de couples de points appartenant au même plan épipolaire incompatible physiquement. Il suffit de lui fournir la carte des vecteurs directeurs des droites espaces dont sont issus les pixels pour obtenir les courbes épipolaires. L'étape suivante consistera à mettre au point une méthode d'appariement robuste prenant en compte les voisinages des pixels.

## Références

- [Ben97] Ryad Benosman. *Reconstruction d'environnements percus par un capteur panoramique de stéréovision et détermination des modèles CAO*. PhD thesis, 1997.
- [BM92] Paul J. Besl and Neil McKay. A methode for registration of 3d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2) :239–256, February 1992.
- [BN99] Simon Baker and Shree K. Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *International Journal of Computer Vision*, 35(2) :175 – 196, 1999.
- [FB02] Mark Fiala and Anup Basu. Feature extraction and calibration for stereo reconstruction using non-svp optics in a panoramic stereo-vision sensor. *Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pages 79–86, June 2002.
- [FD04] Jonathan Fabrizio and Jean Devars. The perspective-n-point problem for catadioptric sensors : An analytical approach. *International conference on computer vision and graphics*, September 2004.
- [FTB02] Jonathan Fabrizio, Jean-Philippe Tarel, and Ryad Benosman. Calibration of panoramic catadioptric sensors made easier. In *Proceedings of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (Omni-vis'02)*, pages 45–52, Copenhagen, Denmark, 2002. IEEE Computer Society.
- [GBL03] Jose-Joel Gonzalez-Barbosa and Simon Lacroix. Un algorithme rapide de stéréovision panoramique dense. Technical Report 03561, LAAS-CNRS, 2003.
- [GD03] Christopher Geyer and Kostas Daniilidis. Conformal rectification of omnidirectional stereo pairs. *Proceedings of the 4th Workshop on Omnidirectional Vision*, June 2003.
- [GTN98] Joshua M. Gluckman, Keith Thorek, and Shree K. Nayar. Real time panoramic stereo. *Proc. of Image Understanding Workshop*, 1998.
- [Har93] R. Hartley. Cheirality invariants. pages 745–753, 1993.
- [IYT92] Hiroshi Ishiguro, Masashi Yamamoto, and Saburo Tsuji. Omnidirectional stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2) :257–262, 1992.

- [LB03] S. S. Lin and R. Bajcsy. High resolution catadioptric omnidirectional stereo sensor for robot vision. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1694–1699, September 2003.
- [NN98] Sameer A. Nene and Shree Nayar. Stereo with mirrors. *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, Bombay*, January 1998.
- [SBFR96] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala, and J. Reyda. Panoramic stereo. *International Conference on Pattern Recognition*, 1996.
- [SGK01] R. Swaminathan, M. D. Grossberg, and Nayar S. K. Caustics of catadioptric cameras. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, Vancouver, Canada, 2001.
- [Sma03] Laurent Smadja. *Génération d’environnements 3D denses à partir d’images panoramiques cylindriques*. PhD thesis, 2003.
- [SR04] Peter Sturm and Srikumar Ramalingam. A generic concept for camera calibration. *European Conference on Computer Vision*, May 2004.
- [Stu02] Peter Sturm. Mixing catadioptric and perspective cameras. *Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pages 37–44, June 2002.
- [Svo99] Tomáš Svoboda. *Central Panoramic Cameras Design, Geometry, Egomotion*. PhD thesis, 1999.
- [WP01] T. Werner and T. Pajdla. Cheirality in epipolar geometry. pages 548–553, July 2001.