

# Stéréovision panoramique dense : calibrage précis et rectification d'images panoramiques

## Dense panoramic stereovision : camera calibration and image rectification

Jose-Joel Gonzalez-Barbosa<sup>1\*</sup>, Simon Lacroix<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LAAS-CNRS, 7 Av. du Colonel Roche, 31077 Toulouse cedex 4 France  
{Jose-Joel.Gonzalez-Barbosa,Simon.Lacroix}@laas.fr

Manuscrit reçu le 24 janvier 2005

Résumé et mots clés

La stéréovision panoramique est une fonctionnalité très intéressante, particulièrement en robotique. Cependant, la géométrie particulière des caméras panoramiques définit des épipolaires dont les équations ne sont pas triviales. Dans cet article, nous présentons un moyen de rectifier les images d'un banc stéréoscopique panoramique, qui fournit des images dans lesquelles les épipolaires sont des lignes parallèles, ce qui permet l'application d'un algorithme optimisé de stéréovision par corrélation des pixels. La première partie de l'article présente un modèle géométrique de formation des images pour une caméra catadioptrique composée d'un miroir parabolique et d'un miroir sphérique, qui inclut les paramètres intrinsèques du système (surfaces des miroirs et paramètres intrinsèques de la caméra), et aussi les erreurs d'alignement entre les miroirs. Une procédure qui permet de rectifier les images panoramiques est ensuite présentée, et des résultats de calibrage et de stéréovision panoramique illustrent l'article.

Calibrage de caméra catadioptrique, erreurs d'alignement, rectification d'images panoramiques.

Abstract and key words

The particular geometry of panoramic cameras defines complex epipolar lines equations. In this paper, we present a way to warp images from a panoramic stereovision bench, so that the epipolar lines become parallel straight lines, thus allowing the use of an optimized fast pixel correlation based stereovision algorithm. The paper first introduces the geometric characterization of panoramic camera composed of parabolic and spherical mirrors, that computes both the intrinsic parameters of the system (mirror surfaces and intrinsic camera parameters) and the errors alignment between the mirrors. Then, it presents the warping equations that allow to generate rectified images. Calibration and stereovision results are presented.

Catadioptric camera calibration, alignment errors, panoramic image rectification.

---

\* Le séjour de Jose-Joel Gonzalez-Barbosa au LAAS est financé par CONACyT.

# 1. Introduction

La possibilité d'obtenir des informations tridimensionnelles dans l'ensemble des directions présente beaucoup d'intérêt en robotique mobile, qu'il s'agisse de construire un modèle de l'environnement, de localiser le robot dans cet environnement ou bien d'asservir ses déplacements. Dans un tel contexte, il est indispensable d'obtenir les données tridimensionnelles en un temps minimum.

Les algorithmes de stéréovision classique sont très rapides, notamment grâce au fait qu'il est possible de rectifier les images, ce qui permet d'optimiser considérablement la phase de mise en correspondance des pixels. Dans cet article, nous cherchons à adapter ces algorithmes bien connus de stéréovision à un banc composé de deux caméras panoramiques. Il est pour cela nécessaire de rectifier les images, et cela passe par une connaissance aussi précise que possible du modèle géométrique de leur formation.

- La section 2 propose une caractérisation complète d'un système catadioptrique composé d'un miroir parabolique et d'un miroir sphérique, qui possède la propriété de centre de projection unique. Notre modèle inclut les paramètres de désalignement inévitablement présents dans ce genre de système. Une procédure de calibrage est présentée, qui permet de déterminer l'ensemble des paramètres du modèle.

- Dans la section 3, nous analysons la géométrie épipolaire d'un banc stéréoscopique composé de deux caméras panoramiques à centre de projection unique, et proposons une procédure de rectification des images produites.

Différents résultats illustrent l'article, et les références à des méthodes existantes de calibrage et de stéréovision panoramique sont faites dans chacune des parties.

## 2. Calibrage d'une caméra panoramique

Plusieurs méthodes de calibrage des caméras catadioptriques ont été proposées dans la littérature, adaptées à différents modèles de formation d'image. Dans [Cauchois 99], une caractérisation d'une caméra catadioptrique avec un miroir conique et une méthode de calibrage adaptée est proposée pour différents modèles de projection. Une méthode pour les systèmes composés d'un miroir parabolique et d'une lentille télécentrique est présentée dans [Nayar 97] : elle utilise le cercle formé dans l'image omnidirectionnelle<sup>1</sup> par le contour externe du miroir. Le paramètre de la parabole et l'axe du miroir projeté dans

l'image peuvent être calculés en utilisant respectivement le rayon et le centre de ce cercle. Une méthode analogue est proposée dans [Kang 00] : elle permet d'initialiser une technique d'auto-calibrage basée sur le suivi de points caractéristiques dans une séquence d'images omnidirectionnelles. Dans [Geyer99], les auteurs introduisent la projection des droites sur le système catadioptrique pour le calibrer. La projection de deux ensembles de lignes parallèles suffit pour calculer le paramètre qui définit la parabole du miroir et la projection de l'axe optique dans l'image. La méthode de calibrage proposée dans [Fabrizio 02] ne fait pas l'estimation du paramètre de la surface du miroir, supposé parfaitement connu, et ne calcule que les paramètres intrinsèques de la caméra : les auteurs utilisent deux cercles connus dans la caméra catadioptrique qui sont projetés sur le plan image. À part dans [Strelow 01], toutes ces approches supposent que l'alignement entre la caméra et le miroir est parfait (l'axe optique de la caméra et l'axe de révolution du miroir sont considérés comme confondus).

Nous nous intéressons à un système catadioptrique panoramique composé d'un miroir sphérique et d'un miroir parabolique, initialement introduit dans [Nayar 97] et présenté sur la figure 1. Le miroir sphérique joue le rôle de la lentille télécentrique, en ne renvoyant sur l'imageur situé en son centre que les rayons réfléchis parallèlement à l'axe du miroir parabolique (le rayon du miroir sphérique est suffisamment grand pour qu'il puisse être approximé par un miroir parabolique).

Ce système a l'avantage de fournir un modèle de formation des images analogue à celui d'un système composé d'un seul miroir parabolique et d'une lentille télécentrique, mais dans un ensemble bien plus compact et moins onéreux. Enfin, il est à centre optique unique.



Figure 1. Caméra panoramique composée d'un miroir parabolique et d'un miroir sphérique ([www.remotereality.com](http://www.remotereality.com)).

1. Dans tout l'article, nous utilisons indistinctement les deux termes « panoramique » et « omnidirectionnel » pour désigner un système qui produit une image balayant 360° d'azimut.

## 2.1. Modèle idéal de formation des images

Les repères suivants sont définis sur la figure 2 : le repère du monde  $W$ , le repère du miroir parabolique  $P$ , le repère du miroir sphérique  $S$  et le repère de la caméra conventionnelle  $C$ . Les points 3D sont représentés par une lettre majuscule grasse ( $\mathbf{L}$ ), la projection d'un point sur une surface (miroir ou plan image) est représentée par une lettre minuscule grasse ( $\mathbf{u}$ ), les points et les coordonnées exprimés dans un repère donné  $X$  sont indicés par  $x$ . Enfin, nous utilisons des coordonnées homogènes.

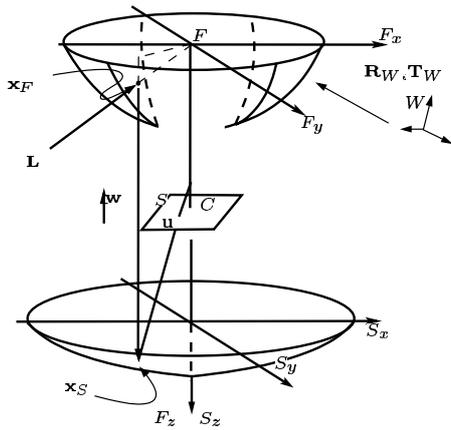


Figure 2. Repères associés au modèle de caméra considéré, dans le cas où les miroirs sont alignés. Le centre optique de la caméra est positionné sur le centre de la sphère  $C$ , et les rayons perçus par la caméra s'intersectent virtuellement  $P$  (dans la figure,  $C$  a été placé entre les deux miroirs pour des raisons de lisibilité).

Dans  $P$ , la surface du miroir parabolique s'exprime

$$z = \frac{h^2 - (x^2 + y^2)}{2h} = \frac{h^2 - (r^2)}{2h} \quad (1)$$

où  $h$  est le paramètre qui définit le paraboloïde du miroir.

Le point  $\mathbf{L}_w$ , exprimé dans  $P$ , se projette sur la surface du miroir parabolique ( $\mathbf{x}_p$ ) selon :

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \frac{h^2 - (x_p^2 + y_p^2)}{2h} \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{L} = \lambda \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

D'où, avec 1 :

$$\lambda L_z = \frac{h^2 - (\lambda^2 L_x^2 + \lambda^2 L_y^2)}{2h}$$

Parmi les deux solutions possibles de cette équation en  $\lambda$ , seule celle où  $\lambda > 0$  est valide. Donc :

$$\begin{aligned} \lambda &= h \frac{\sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2} - L_z}{L_x^2 + L_y^2} \\ &= \frac{h}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2} + L_z} = \frac{h}{|\mathbf{L}| + L_z} \end{aligned} \quad (3)$$

Les coordonnées de  $\mathbf{x}_p$  s'écrivent donc :

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{hL_x}{|\mathbf{L}| + L_z} \\ \frac{hL_y}{|\mathbf{L}| + L_z} \\ \frac{hL_z}{|\mathbf{L}| + L_z} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{hL_x}{Z'} \\ \frac{hL_y}{Z'} \\ \frac{hL_z}{Z'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

avec  $Z' = |\mathbf{L}| + L_z$ .

Les dimensions de la section du miroir sphérique utilisé étant petites par rapport aux dimensions du rayon de la sphère  $R$ , nous pouvons approcher l'équation de ce miroir avec le terme du premier ordre de la série de Taylor :

$$g(x, y) = \frac{R}{2} - \frac{x^2 + y^2}{2R} + \frac{1}{2} \frac{x^4 + y^4}{2^2 2! R^3} + \dots$$

$$g(x, y) = \frac{R}{2} - \frac{x^2 + y^2}{2R} = \frac{R^2 - x^2 - y^2}{2R}$$

L'équation de la sphère est donc localement celle d'un paraboloïde.

Nous avons vu que les rayons qui atteignent le plan image de la caméra sont les rayons parallèles à l'axe optique du miroir sphérique. Le point  $\mathbf{x}_p$  du paraboloïde est donc projeté sur la sphère suivant la direction  $w = [0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$  (cette direction change bien entendu si les miroirs parabolique et sphérique ne sont pas alignés, voir section 2.2). La projection est donnée par :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_s - \mathbf{x}_p &= \lambda \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ \frac{R^2 - (x_s^2 + y_s^2)}{2R} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \frac{h^2 - (x_p^2 + y_p^2)}{2h} \\ 1 \end{bmatrix} &= \lambda \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Le résultat de  $\lambda$  est égal à :

$$\lambda = -\frac{-hR^2 + hx_p^2 + hy_p^2 + Rh^2 - Rx_p^2 - Ry_p^2}{2Rh}$$

en substituant  $\lambda$ , nous obtenons

$$\mathbf{x}_s = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \frac{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)}{2R} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

où  $x_p$  et  $y_p$  sont définis dans l'équation 4. Finalement, nous obtenons la projection perspective de  $\mathbf{x}_s$  sur le plan image en pixels en utilisant l'équation suivante :

$$\mathbf{u} = I_c \mathbf{M}[R_{sc}, T_{sc}] \mathbf{x}_s \quad (7)$$

où  $I_c$  est la matrice intrinsèque de la caméra, et  $\mathbf{M}[R_{sc}, T_{sc}]$  est la matrice passage du repère de la sphère  $S$  au repère caméra  $C$ . Dans le cas où les miroirs sont alignés, la matrice  $\mathbf{M}[R_{sc}, T_{sc}]$  est la matrice identité, et la caméra est totalement caractérisée par :

$$\mathbf{u} = I_c \mathbf{x}_s \quad (8)$$

où  $\mathbf{x}_s$  est donnée par l'équation 6. En développant :

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \frac{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)}{2R} \\ 1 \end{bmatrix}$$

D'où :

$$\begin{aligned} u &= \frac{-\alpha_u x_p (2R)}{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)} + u_0 \\ v &= \frac{\alpha_v y_p (2R)}{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)} + v_0 \end{aligned} \quad (9)$$

où  $x_p$  et  $y_p$  sont donnés par l'équation 4.

## 2.2. Considération des erreurs d'alignement

La modélisation précédente ne prend pas en compte les possibles erreurs d'alignement qui peuvent exister entre les différents éléments qui composent le système (matrice CCD, lentille et les deux miroirs). Parmi ces erreurs, les plus importantes sont les erreurs d'alignement entre les deux miroirs, car elles éloignent le système d'un modèle de formation des images à point de vue unique.

La figure 3 illustre un système avec de telles erreurs : les rayons qui traversent la lentille de la caméra sont toujours ceux qui sont parallèles à l'axe optique du miroir sphérique. Or, ces rayons parallèles à l'axe optique de la sphère ne sont plus parallèles à l'axe optique du paraboloïde : il n'existe donc plus de centre de projection unique sur le paraboloïde.

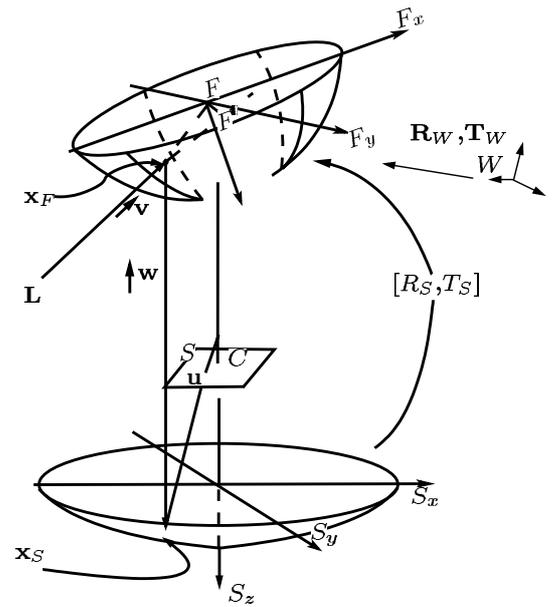


Figure 3. Introduction des erreurs d'alignements entre les deux miroirs.

La figure 4 montre les rayons réfléchis par le miroir parabolique d'un système avec une erreur d'alignement de  $5^\circ$  : les rayons ne s'intersectent plus en un point de vue unique, mais sont tangents à une surface caustique. Avec des faibles désalignements, nous pouvons approcher la surface caustique par un point  $P' = [P'_x \ P'_y \ P'_z]$ . Au cours de la procédure de calibrage, les coordonnées du point  $P'$  seront déterminées de manière à minimiser l'erreur de projection.

Soit  $\mathbf{M}[R_{sp}, T_{sp}]$  la matrice de transformation entre le repère du miroir sphérique  $S$  et le repère du miroir parabolique  $P$ . Les rayons incidents sur le paraboloïde sont projetés de façon parallèle à l'axe  $S_x$  (direction  $\mathbf{w}$  sur la figure 3), dont la direction est donnée par :

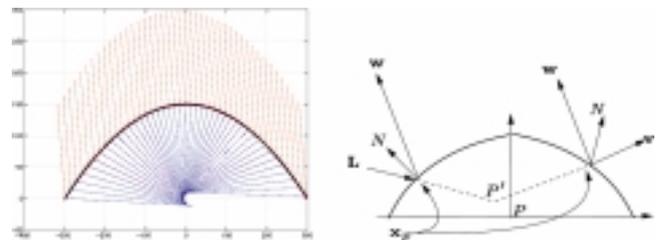


Figure 4. Réflexions et prolongement des rayons d'incidence sur un miroir parabolique mal aligné avec le miroir sphérique : les rayons incidents définissent une surface caustique, approximée par le point  $P'$  qui minimise l'erreur de projection (figure de droite).

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} R_{sp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

où

$$R_{sp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{sp}^x & -\sin \theta_{sp}^x \\ 0 & \sin \theta_{sp}^x & \cos \theta_{sp}^x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{sp}^y & 0 & \sin \theta_{sp}^y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{sp}^y & 0 & \cos \theta_{sp}^y \end{bmatrix}$$

En considérant le point  $P'$  comme le point d'intersection des rayons incidents, le point 3D  $L$  se projette sur la surface parabolique de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} P'_x \\ P'_y \\ P'_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} - \lambda \left( \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \frac{h^2 - x_p^2 - y_p^2}{2 * h} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (10)$$

Parmi les deux solutions possibles de cette équation en  $\lambda$ , seule celle avec  $\lambda > 0$  est valide. En substituant la valeur  $\lambda$ , nous obtenons aisément la projection  $\mathbf{x}_p$  sur le paraboloïde d'un point  $L$  qui traverse virtuellement le point  $P'$  (le détail des calcul n'est pas fourni ici).

Ensuite, le point  $\mathbf{x}_p$  est projeté sur la sphère en  $\mathbf{x}_s$ . Cette projection est définie par l'intersection des rayons projetés suivant la direction  $\mathbf{w}$  donnée par :

$$R_{sp} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \frac{h^2 - x_p^2 - y_p^2}{2 * h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{sp}^x \\ t_{sp}^y \\ t_{sp}^z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ \frac{R^2 - x_s^2 - y_s^2}{2 * R} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

où  $(R_{sp}) [x_p \ y_p \ (h^2 - x_p^2 - y_p^2)/(2 * h)]^T + [t_{sp}^x \ t_{sp}^y \ t_{sp}^z]^T$  est la surface du paraboloïde définie dans le repère  $C$ .

Nous pouvons écrire  $\mathbf{x}_s$  comme :

$$\mathbf{x}_s = \begin{bmatrix} \frac{p_1}{2h} \\ \frac{-p_2}{2h} \\ \frac{4R^2h^2 - p_1^2 - p_2^2}{8h^2R} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

où

$$p_1 = 2x_p h \cos \theta_{sp}^y - h^2 \sin \theta_{sp}^y + x_p^2 \sin \theta_{sp}^y + y_p^2 \sin \theta_{sp}^y + 2txh$$

$$p_2 = -2y_p h \cos \theta_{sp}^x - 2tyh - 2x_p h \sin \theta_{sp}^x \sin \theta_{sp}^y - h^2 \cos \theta_{sp}^x \sin \theta_{sp}^y + x_p^2 \cos \theta_{sp}^x \sin \theta_{sp}^y + y_p^2 \cos \theta_{sp}^x \sin \theta_{sp}^y$$

les valeurs de  $x_p, y_p$  sont définies par la résolution de l'équation 10. Enfin, la projection sur le plan image est :

$$\mathbf{u} = I_c \mathbf{x}_s \quad (12)$$

ou encore :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} -\alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{p_1}{2h} \\ \frac{-p_2}{2h} \\ \frac{4R^2h^2 - p_1^2 - p_2^2}{8h^2R} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

où  $p_1, p_2$  sont données dans l'équation 11.

En résumé, la projection d'un point  $L$  sur le plan image est donc déterminée par :

- un changement de repère entre le repère du monde  $W$  et le repère du miroir parabolique  $P$ ,
- la réflexion du miroir en direction  $S_z$  (axe lié au repère de la sphère),
- la rotation et translation entre le miroir parabolique et la sphère,
- la projection perspective de la sphère au repère caméra,
- et enfin le passage du repère caméra au plan image.

Ainsi, nous obtenons le modèle suivant

$$u = \frac{-\alpha_u p_1}{2h} \frac{8h^2 R}{4R^2h^2 - p_1^2 - p_2^2} + u_0$$

$$v = \frac{-\alpha_v p_2}{2h} \frac{8h^2 R}{4R^2h^2 - p_1^2 - p_2^2} + v_0 \quad (14)$$

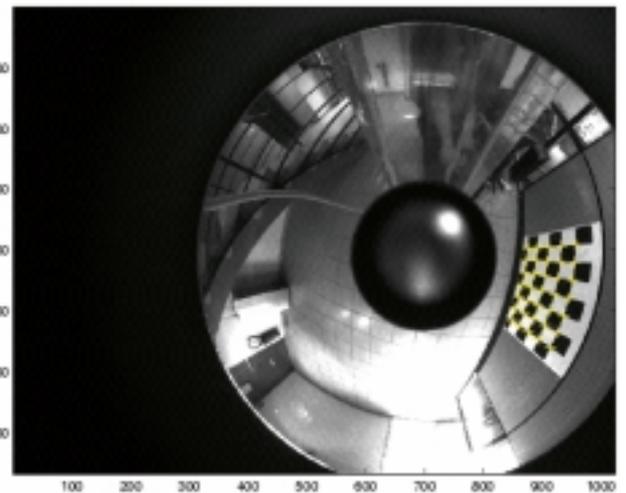


Figure 5. Image de la mire de calibration.

### 2.3. Procédure de calibrage

Les méthodes d'optimisation non linéaire requièrent une initialisation des paramètres à optimiser suffisamment proche de la solution pour converger correctement. Dans le but d'avoir une bonne initialisation, notre procédure de calibrage utilise plusieurs étapes : à chaque étape, différentes variables sont calculées près de la valeur réelle et les autres paramètres ne sont pas considérés ou sont fixés près de la solution. Finalement, une étape de raffinement est faite en utilisant l'ensemble des paramètres à estimer avec l'équation 14. Les figures 5 et 6 montrent le modèle de mire de calibrage employé : les coordonnées images de indices visuels sont extraits avec une version sous-pixelique du détecteur de Harris.

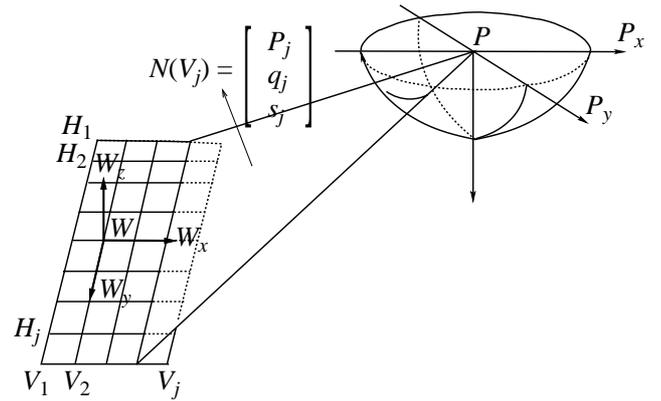


Figure 7. Estimation des paramètres extrinsèques. Modèle de calibrage défini par les droites \$V\_j\$ et \$H\_i\$ et leurs intersection \$VH\_{ji}\$. La norme du plan formé par la droite \$V\_j\$ et \$P\$ est définie comme \$N(V\_j)\$.

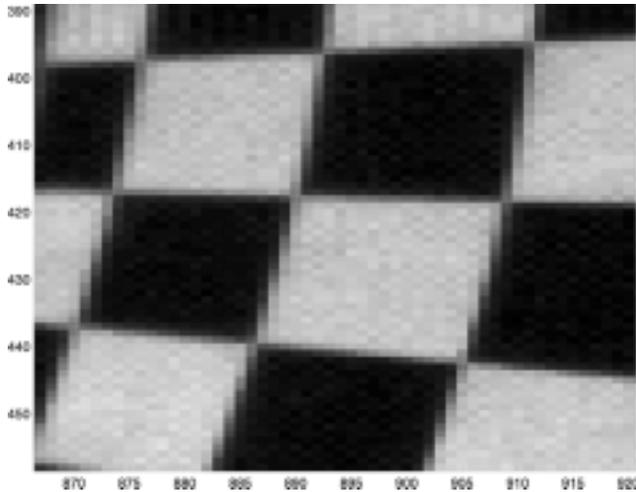


Figure 6. Détection sous-pixelique des coins de la mire de calibrage.

#### 2.3.1. Paramètres extrinsèques (\$R\_w\$)

La position \$VH\_{ij} = [VH\_{xij} \quad VH\_{yij} \quad 0]^T\$ des indices visuels utilisés est donnée dans le repère du monde \$W\$ (figure 7). Afin de calculer ces positions par rapport aux coordonnées du parabolöide, il faut déterminer la rotation et la translation entre les systèmes de coordonnées du parabolöide et de la grille (paramètres extrinsèques).

L'équation du plan défini par la droite \$V\_j\$ et le point \$P\$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} N(V_j) = 0 \quad \text{ou} \quad Xp_j + Yq_j + Zs_j = 0$$

En utilisant l'équation de la surface du miroir (équation 1), nous trouvons que

L'intersection de ce plan avec le miroir défini par l'équation 1 est :

$$\left(X - \frac{hp_j}{s_j}\right)^2 + \left(Y - \frac{hq_j}{s_j}\right)^2 = \frac{h^2}{s_j^2} (p_j^2 + q_j^2 + s_j^2)$$

Soit \$\{(X\_i, Y\_i)\}\_{i=1}^n\$ l'ensemble des points qui appartiennent à la droite \$V\_j\$ ou \$H\_j\$ ; les valeurs \$(p\_j, q\_j, s\_j)\$ (voir figure 7) sont calculées par minimisation de la somme :

$$f(p_j, q_j, s_j) = \sum_{i=1}^n \left( (X_i - \frac{hp_j}{s_j})^2 + (Y_i - \frac{hq_j}{s_j})^2 - \frac{h^2}{s_j^2} (p_j^2 + q_j^2 + s_j^2) \right)^2$$

en résolvant le système d'équations suivant :

$$\frac{\partial f}{\partial p_j} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial q_j} = 0, \quad \text{et} \quad \frac{\partial f}{\partial s_j} = 0$$

L'axe \$W\_y\$ du repère du monde est calculé par \$N(V\_j) \wedge N(V\_{j+1})\$ (\$\wedge\$ représente le produit vectoriel).

$$W_y = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{N(V_i) \wedge N(V_j)\}}{\left| \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{N(V_i) \wedge N(V_j)\} \right|}$$

De même, la direction de \$W\_x\$ est définie par :

$$W_x = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{N(H_i) \wedge N(H_j)\}}{\left| \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{N(H_i) \wedge N(H_j)\} \right|}$$

Ensuite, la direction  $W_z$  est donnée par le produit  $W_x \wedge W_y$ . Pour calculer les angles de rotation entre le repère du monde et le repère de la caméra, nous minimisons la fonction suivante :

$$0 = \begin{cases} R(\theta_{sp}^x, \theta_{sp}^y, \theta_{sp}^z)W_x - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ R(\theta_{sp}^x, \theta_{sp}^y, \theta_{sp}^z)W_y - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ R(\theta_{sp}^x, \theta_{sp}^y, \theta_{sp}^z)W_z - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

### 2.3.2. Paramètres de la caméra

Une première estimée des paramètres intrinsèques des miroirs est obtenue par des mesures dans le système catadioptrique (on sait notamment que le rayon de la sphère  $R$  est égal à deux fois la distance entre la surface sphérique et le centre optique de la caméra). Afin d'affiner cette estimée, nous considérons initialement qu'il n'y a pas d'erreurs d'alignement.

L'équation 9 nous donne la transformation d'un point  $\mathbf{L}$  dans le monde au point image  $\mathbf{u} = (u, v)^T$ . L'équation est fonction des paramètres extrinsèques  $(R_w, \mathbf{T}_w)$ , des paramètres des miroirs  $(h, R)$  et les paramètres intrinsèques de la caméra  $(\alpha_u, \alpha_v)$ . Tous ces paramètres sont estimés par minimisation de l'équation suivante :

$$f(R_w, \mathbf{T}_w, \alpha_u, \alpha_v, h, R) = \begin{cases} \frac{-\alpha_u x_p(2R)}{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)} + u_0 - u_i \\ \frac{\alpha_v y_p(2R)}{R^2 - (x_p^2 + y_p^2)} + v_0 - v_i \end{cases} \quad (15)$$

où  $(x_p, y_p)$  est donné par l'équation 4 et  $(u_i, v_i)$  sont des positions des coins extraits des images de calibrage (en coordonnées sous-pixeliques). Nous fixons dans ce cas les paramètres  $(u_0, v_0)$  au centre de l'image : ceci est important pour assurer la convergence de l'optimisation, car si nous minimisons la fonction  $f(R_w, \mathbf{T}_w, \alpha_u, \alpha_v, h, R, u_0, v_0)$ , un minimum local de  $(u_0, v_0)$  est le centre du cercle interne constitué par les miroirs. Ce centre est en effet très déplacé du centre de l'image (voir figure 6), ce qui est dû aux erreurs d'alignement, qui ne sont pas encore considérées dans le modèle.

### 2.3.3. Calibrage complet

Une fois estimés les paramètres intrinsèques  $(\alpha_u, \alpha_v, h, R, u_0, v_0)$  et extrinsèques  $(R(\theta_{sp}^x, \theta_{sp}^y, \theta_{sp}^z))$ , nous effectuons une étape d'affinement de l'estimée de l'ensemble des paramètres, en effectuant la minimisation globale<sup>2</sup> des expressions suivantes :

2. Pour ce faire, nous employons la méthode d'optimisation de *Levenberg-Marquardt* de Matlab [More 77].

$$F_1 = \frac{-\alpha_u p_1}{2h} \frac{8h^2 R}{4R^2 h^2 - p_1^2 - p_2^2} + u_0 - u_i$$

$$F_2 = \frac{-\alpha_v p_2}{2h} \frac{8h^2 R}{4R^2 h^2 - p_1^2 - p_2^2} + v_0 - v_i$$

où  $(u_i, v_i)$  sont les positions en pixels des coins extraits dans les images de calibrage. La minimisation est obtenue en résolvant le système d'équations :

$$\frac{\partial F_1}{\partial \Gamma} = 0$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \Gamma} = 0$$

$$\text{où } \Gamma = \left\{ u_0, v_0, h, \alpha_u, \alpha_v, h, R, \theta_{sp}^x, \theta_{sp}^y, \right. \\ \left. t_{sp}^x, t_{sp}^y, t_{sp}^z, P'_x, P'_y, P'_z, R'_W, T'_W \right\}.$$

## 2.4. Résultats de calibrage

La figure 8 montre les deux caméras montées sur un banc stéréoscopique que nous avons calibrées, et le tableau 1 récapitule les divers paramètres intrinsèques à déterminer pour chaque caméra.

Tableau 1. Ensemble des paramètres à estimer.

$u_0, v_0, \alpha_u, \alpha_v$	paramètres intrinsèques de la caméra conventionnelle
$h, R$	paramètres de la surface parabolique et sphérique
$\theta_{sp}^x, \theta_{sp}^y$ $t_{sp}^x, t_{sp}^y, t_{sp}^z$	rotation entre la surface parabolique et sphérique translation entre la surface parabolique et sphérique
$P'_x, P'_y, P'_z$	estimation du point focal

La procédure de calibrage est réalisée de manière incrémentale : les paramètres des miroirs  $h, R$  sont mesurés pour l'initialisation (ou bien les données du constructeur du système sont utilisées). Pour chaque vue de la mire de calibrage, nous calculons les paramètres extrinsèques  $(R_w, \mathbf{T}_w)$ . On estime ensuite les paramètres d'un système sans erreur d'alignement (paramètres intrinsèques de la caméra  $(\alpha_u, \alpha_v, h, R)$ ), en initialisant les paramètres intrinsèques  $(u_0, v_0)$  au centre de l'image, ce qui nous permet de calculer correctement la rotation et la translation entre les miroirs dans l'étape finale du calibrage.

Les valeurs de paramètres obtenus sont présentés dans le tableau 2. L'erreur de caractérisation de la caméra catadioptrique est mesurée par l'écart entre les reprojections des coins de la mire dans le plan image (calculées par l'équation 9), et les coordonnées des points extraits dans l'image. L'erreur moyenne de projection est présentée dans la courbe de gauche



Figure 8. Banc stéréoscopique panoramique.

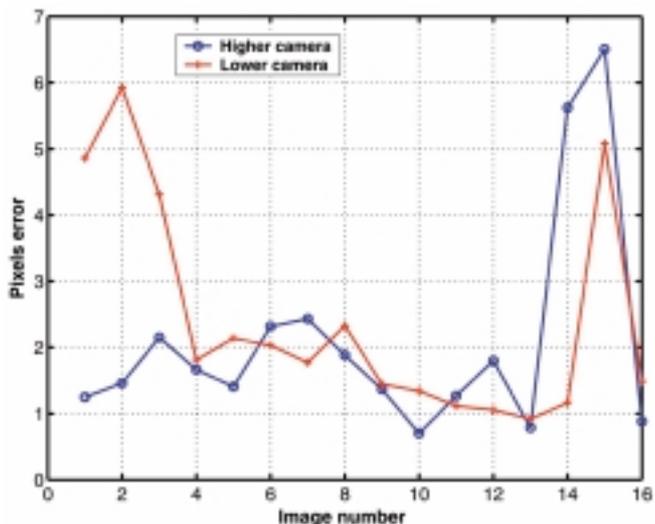


Figure 9. Erreurs moyennes de reprojection sans considérer d'erreur d'alignement. Les courbes montrent les erreurs moyennes de reprojection pour chaque image utilisée dans le calibrage.

de la figure 9 pour les 15 images de mire que nous avons utilisées. La plus faible valeur de cette erreur se situe à environ 1 pixel pour les deux caméras.

Tableau 2. Résultats : Première initialisation des paramètres intrinsèques.

Caméra haute

$h$	$R$	$\alpha_u$	$\alpha_v$	$u_0$	$v_0$
3.2 cm	11.65 cm	1.0	0.963	384.0	512.0

Caméra basse

$h$	$R$	$\alpha_u$	$\alpha_v$	$u_0$	$v_0$
3.6 cm	11.87 cm	1.0	0.997	384.0	512.0

Pour introduire les erreurs d'alignement, nous initialisons les valeurs de  $(t_x, t_y)$  aux coordonnées du centre du cercle sombre interne (voir figure 6). Les valeurs estimées des paramètres à l'issue de la minimisation globale sont présentées dans le tableau 3, et la courbe de la figure 10 montre l'erreur de reprojection moyenne pour chaque image de calibrage : les erreurs les plus faibles se situent maintenant autour de 0.2 pixel.

Ce résultat peut sembler peu satisfaisant au vu des erreurs bien plus faibles obtenues par les méthodes de calibrage classiques des caméras sténopé, mais est bien meilleur que lorsque les erreurs d'alignements ne sont pas explicitées ni estimées : dans

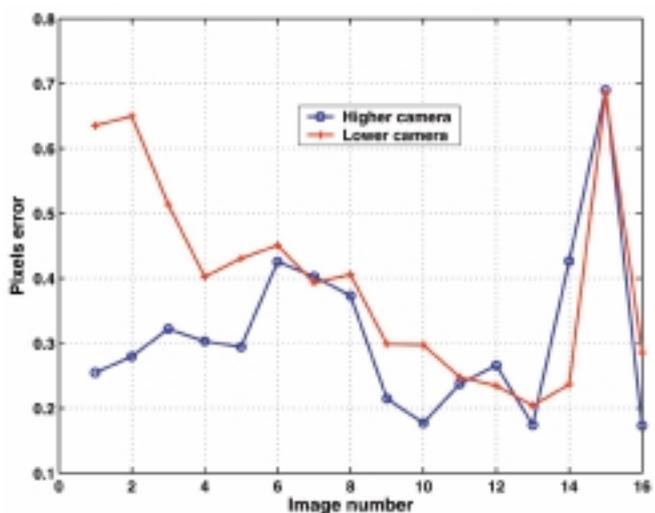


Figure 10. Erreurs moyennes de reprojection en considérant l'erreur d'alignement - notez que l'échelle des erreurs diffère de celle de la figure 9.

[Strelow 01], où les auteurs calibrent un système semblable en considérant la rotation et la translation entre le miroir et la caméra, les erreurs de reprojection sont d'environ 0,4 pixel, et elles valent approximativement 0,5 pixel dans [Bankstein02]. Notons cependant que les résultats présentés ici ont été déterminés avec les mêmes images que celles qui sont utilisées pour

Tableau 3. Valeurs estimées des paramètres de calibrage en considérant les erreurs d'alignement.

paramètres	caméra basse	caméra haute
$h$ (cm)	3.48	3.50
$R$ (cm)	10.84	11.00
$\theta_{sp}^x$ (°)	0.971	0.722
$\theta_{sp}^y$ (°)	3.123	2.671
$t_{sp}^x$ (cm)	0.012	0.010
$t_{sp}^y$ (cm)	0.112	0.131
$u_0$	382.834	382.886
$v_0$	512.100	512.291
$\alpha_u$	1.00	1.00
$\alpha_v$	0.983	0.997
$P'_x$ (cm)	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.1 \cdot 10^{-4}$
$P'_y$ (cm)	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
$P'_z$ (cm)	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$

le calibrage : en ce sens, ils sont biaisés, et les améliorations introduites par la considération des erreurs d'alignement sont vraisemblablement optimistes.

### 3. Stéréovision panoramique

On trouve de nombreuses contributions sur la stéréovision panoramique dans la littérature, ou plus généralement sur l'obtention d'informations tridimensionnelles à partir de plusieurs images panoramiques, qui correspondent à différentes configurations des systèmes d'acquisition. On peut distinguer les principales configurations suivantes :

- Celles qui exploitent plusieurs caméras panoramiques disposées aléatoirement dans l'environnement [Ng 02, Bunshoten01, Kang97, Sogo 00], ou bien des caméras panoramiques mobiles [Zhu00, Zhu00]. La difficulté de ces approches est qu'il faut aussi déterminer les positions relatives des caméras afin d'obtenir une reconstruction 3D d'échelle connue.
- Celles qui exploitent un capteur panoramique composé de caméras (le plus souvent linéaires) en rotation [Ishiguro92, Smajda01, EA01]. De tels systèmes permettent d'obtenir des images tridimensionnelles avec une excellente résolution, et présentent par exemple beaucoup d'intérêt pour des applications cinématographiques et multimédia [Romain01].
- Et enfin celles qui utilisent un banc stéréoscopique panoramique, composé de deux systèmes d'acquisition rigidement

liés. Ces systèmes présentent l'intérêt de fournir une image 3D à partir d'une seule position et pour un temps d'acquisition d'images instantané, ce qui est indispensable pour des applications de robotique mobile.

Nous nous intéressons donc à ce dernier type de système. Mentionnons d'abord les concepts originaux qui exploitent une seule caméra munie de deux miroirs convexes de courbures différentes [Fiala96, Baldwin00, Basu01]. Dans de tels systèmes les centres des deux miroirs sont supposés alignés avec l'axe optique de la caméra, mais la variation de résolution pour deux points homologues ne facilite pas leur mise en correspondance, et la base de triangulation est faible, ce qui ne permet pas d'obtenir une bonne précision sur la reconstruction 3D des éléments appariés.

Dans [Ollis99], plusieurs configurations de stéréoscopie panoramique sont analysées. Le large champ de vision produisant des distorsions significatives qui varient par rapport au point de vue, les auteurs proposent une méthode de mise en correspondance par corrélation de pixels et de triangulation qui prend en compte la forme du miroir. Le système «HOVI» [Koyasu02] consiste en un miroir hyperbolique et une caméra dont le centre optique est situé sur le foyer du miroir (point de vue unique), ce qui permet de transformer facilement l'image acquise en une image correspondant à une projection cylindrique. Avec deux HOVIs placés de façon l'un au dessus de l'autre, les axes optiques des deux caméras (et donc des deux miroirs) étant confondus, les lignes épipolaires sont horizontales dans les images cylindriques. Cependant, la méthode est très dépendante du positionnement mécanique relatif des deux caméras, et de l'alignement des miroirs de chacune des caméras. Dans [Gluckman98, Takiguchi02] les auteurs proposent un système stéréoscopique omnidirectionnel qui utilise aussi deux caméras catadioptriques placées l'une au dessus de l'autre. L'avantage principal de ces systèmes est que les courbes épipolaires sont des droites radiales dans les images panoramiques, à la condition que l'alignement entre les deux caméras soit parfait, ce que nous pensons difficile à garantir dans le cas général.

#### 3.1. Géométrie épipolaire pour des caméras sténopé

Nous rappelons ici brièvement les équations qui permettent d'exprimer la géométrie épipolaire pour des caméras perspectives, car nous allons exprimer de manière analogue la géométrie épipolaire pour deux caméras panoramiques.

Soient  $\mathbf{X}$  un point 3D de l'environnement, et  $\mathbf{x}_{C1}$  et  $\mathbf{x}_{C2}$  les points correspondants dans les plans images des caméras 1 et 2, auxquelles sont associés les repères métriques  $C_1$  et  $C_2$  (voir figure 11). La transformation entre ces deux repères est définie par la translation  $\mathbf{T}$  et la rotation  $R$ . Le plan  $\Pi$  défini par  $\mathbf{X}$  et ses points images associés  $\mathbf{x}_{C1}$  et  $\mathbf{x}_{C2}$  est défini par :

$$\mathbf{x}_{C2}^T R(\mathbf{T} \wedge \mathbf{x}_{C1}) = 0 \quad (16)$$

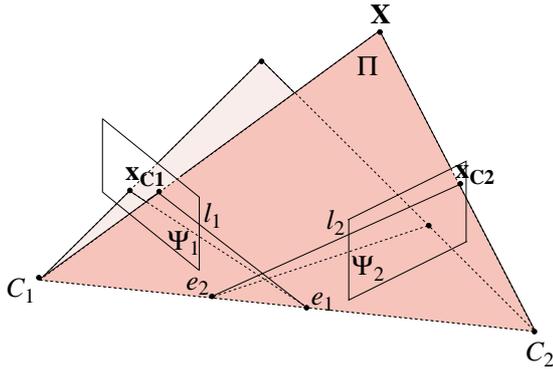


Figure 11. Géométrie épipolaire pour deux caméras sténopé.

Le produit vectoriel  $\mathbf{T} \wedge \mathbf{x}_{C1}$  peut être représenté par

$$\mathbf{T} \wedge \mathbf{x} = [T]_x \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

Nous pouvons alors écrire la contrainte de coplanarité comme :

$$\mathbf{x}_{C2}^T R [T]_x \mathbf{x}_{C1} = 0 \quad \text{ou} \quad \mathbf{x}_{C2}^T E \mathbf{x}_{C1} = 0 \quad (17)$$

où  $E = R [T]_x$  est la matrice dite essentielle. Cette équation est l'expression algébrique de la géométrie épipolaire d'un banc stéréo calibré. En introduisant les matrices intrinsèques des caméras  $K_1$  et  $K_2$ , cette équation peut être écrite en coordonnées pixeliques :

$$\mathbf{u}_2^T K_1^{-T} E K_2^{-1} \mathbf{u}_1 = 0$$

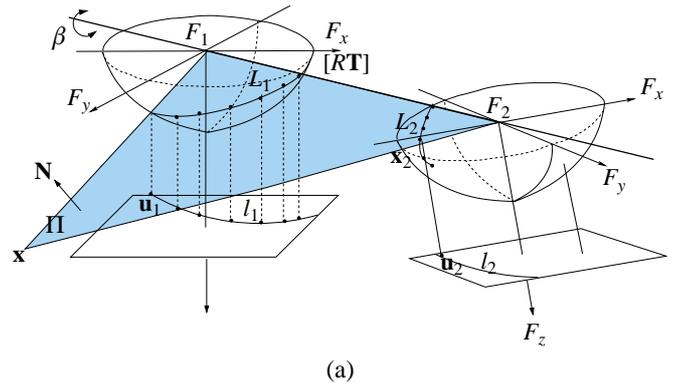
où  $F = K_1^{-T} E K_2^{-1}$  définit la matrice fondamentale.

### 3.2. Géométrie épipolaire pour des caméras panoramiques

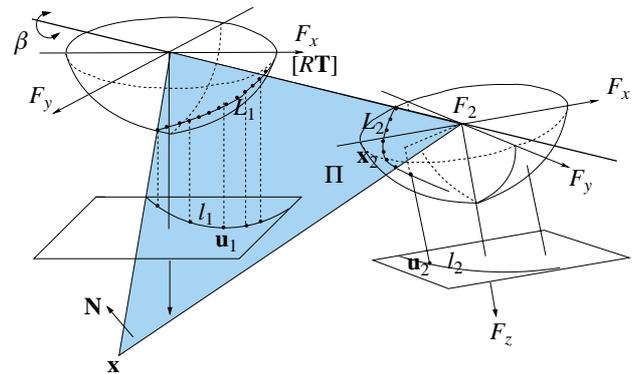
Dans cette section, nous considérons que les paramètres d'alignement entre les deux miroirs de nos caméras ont été identifiés, et nous ramenons les calculs au cas de caméras parfaitement alignées (les calculs menés ici sont analogues à ceux présentés dans [Svoboda02]).

La figure 12 montre le plan épipolaire  $\Pi$  défini par un point 3D  $\mathbf{X}$  et ses points images associés  $\mathbf{x}_1$  et  $\mathbf{x}_2$ . Grâce à la propriété de centre de projection unique, il contient les foyers  $F_1$  et  $F_2$  des deux miroirs. L'intersection de ce plan avec les surfaces des miroirs définit deux coniques  $L_1$  et  $L_2$ , dont les projections orthogonales sur le plan image forment aussi des coniques  $l_1$  et  $l_2$ . La courbe épipolaire d'un point  $\mathbf{u}_1$  est représentée par la conique :

$$\mathbf{u}_2^T A_2(E, \mathbf{u}_1) \mathbf{u}_2 = 0$$



(a)



(b)

Figure 12. Géométrie épipolaire entre deux caméras panoramiques avec miroir parabolique, pour deux points 3D différents. La différence entre les figures (a) et (b), qui présentent le plan épipolaire pour deux points  $\mathbf{X}$  différents, est une rotation de ce plan autour du vecteur de translation  $\mathbf{T}$  porté par les foyers  $F_1$  et  $F_2$ .

Dans le cas général, la matrice  $A_2(E, \mathbf{u}_1)$  est une fonction non linéaire de la matrice essentielle  $E$ , du point  $\mathbf{u}_1$ , et des paramètres de calibrage de la caméra panoramique. Les projections du point  $\mathbf{X}$  sur les deux miroirs paraboliques  $\mathbf{x}_1$  et  $\mathbf{x}_2$  (voir figure 12) satisfont les équations 16 et 17.

La normale au plan  $\Pi$  dans le repère  $F_1$  est définie par :

$$\mathbf{N}_{F1} = \mathbf{T} \wedge \mathbf{x}_1 \quad (18)$$

Dans le repère  $F_2$ , ce vecteur s'exprime :

$$\mathbf{N}_{F2} = R \mathbf{N}_{F1} = R(\mathbf{T} \wedge \mathbf{x}_1) = R [T]_x \mathbf{x}_1 = E \mathbf{x}_1 \quad (19)$$

Soit  $\mathbf{N}_{F2} = [p \quad q \quad s]^T$ . L'équation du plan  $\Pi$  dans  $F_2$  s'écrit :

$$px_2 + qy_2 + sz_2 = 0 \quad (20)$$

où  $\mathbf{x}_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2]^T$ . À partir de cette équation et de l'équation de la surface du miroir (équation 1), nous obtenons l'expression de la conique  $L_2$ :

$$\left(x_2 - \frac{hp}{s}\right)^2 + \left(y_2 - \frac{hq}{s}\right)^2 = \frac{h^2}{s^2}(p^2 + q^2 + s^2) \quad (21)$$

La projection orthographique de  $L_2$  sur le plan image définit la conique  $l_2$ , d'équation :

$$\left(u_2 - \frac{hp}{s}\right)^2 + \left(v_2 - \frac{hq}{s}\right)^2 = \frac{h^2}{s^2}(p^2 + q^2 + s^2) \quad (22)$$

Cette équation correspond à un cercle de centre  $\left(\frac{hp}{s}, \frac{hq}{s}\right)$  et de rayon  $\frac{h}{s}\sqrt{p^2 + q^2 + s^2}$ . Nous pouvons l'écrire comme :

$$[u_2 \ v_2 \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{hp}{s} \\ 0 & 1 & -\frac{hq}{s} \\ -\frac{hp}{s} & -\frac{hq}{s} & -h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

Par ailleurs, nous avons :

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{F_2} &= \begin{bmatrix} p \\ q \\ s \end{bmatrix} = E\mathbf{x}_1 = R[T]_x \mathbf{x}_1 \\ &= \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \frac{h^2 - (x_1^2 + y_1^2)}{2h} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

La courbe épipolaire dans le plan image de la seconde caméra correspondant au point  $\mathbf{x}_1$  est définie par les équations 24 et 23. Pour deux caméras catadioptriques avec translation et rotation connues, nous avons un ensemble de courbes  $l_1$  et  $l_2$ , où  $l_2$  est le cercle épipolaire de  $l_1$  et vice versa. En effet, l'ensemble des points qui appartiennent au plan passant par les foyers des miroirs paraboliques se projettent sur ces cercles (figure 12).

Nous exploitons cette propriété pour rectifier les images, de manière à ce que les courbes épipolaires dans les images rectifiées soient des droites parallèles. La procédure de rectification est illustrée par la figure 13: elle consiste à faire tourner le plan  $\Pi$  autour de l'axe  $F_1 F_2$  selon l'angle  $\beta$  (à chaque incrément de  $\beta$  correspond une ligne des images rectifiées), puis à échantillonner les cercles  $l_1$  et  $l_2$  dans les images panoramiques selon des angles  $\alpha$  définis régulièrement dans le repère des miroirs paraboliques.

Le détail de l'algorithme de rectification est donné figure 14: les indices  $k = 1, 2$  définissent l'image considérée, les exposants  $i$  sont les numéros d'itération. La notation  $\mathcal{R}(A, B, C)$  indique une rotation du point  $A$  de  $B$  radians autour de l'axe  $C$ .  $\mathcal{G}(Q_k^i)$  est la projection du point  $Q^i$  (définie dans les coordon-

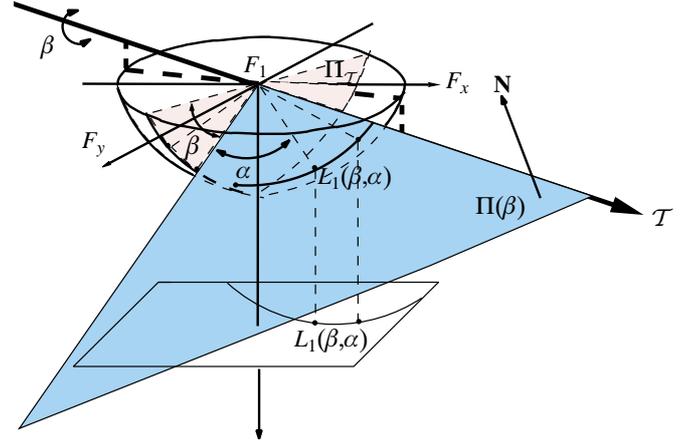


Figure 13. Rectification d'une image panoramique par échantillonnage selon deux angles  $\beta$  and  $\alpha$ .

- Étant données une translation et une rotation  $[T, R]$  entre deux caméras,
 
$$\Pi_1^T = \{\mathcal{P}_1 \in \mathfrak{R} \mid \langle \overrightarrow{\mathcal{P}_1 F_1}, \mathbf{T} \rangle = 0\}$$

$$\Pi_2^T = \{\mathcal{P}_2 \in \mathfrak{R} \mid \langle \overrightarrow{\mathcal{P}_2 F_2}, R\mathbf{T} \rangle = 0\}$$
- Nous choisissons un point  $\mathcal{P}_1^i = \{\mathcal{P}_1^i \in \Pi_1^T\}$
- Initialisation  $\beta^i \leftarrow 0$  et  $\mathcal{P}_1^i \leftarrow \mathcal{P}_1^i$
- **faire**
  - Le plan épipolaire de  $\mathcal{P}_1^i$ 

$$\Pi_1^\beta = \{\mathcal{Q}_1 \in \mathfrak{R} \mid \langle \mathcal{Q}_1, \overrightarrow{\mathcal{Q}_1 F_1} \wedge \mathbf{T} \rangle = 0, \mathcal{Q}_1^i \in \Pi_1^T\}$$

$$\Pi_2^\beta = \{\mathcal{Q}_2 \in \mathfrak{R} \mid \langle \mathcal{Q}_2, \overrightarrow{\mathcal{Q}_2 F_2} \wedge R\mathbf{T} \rangle = 0\}$$
  - Initialisation
 
$$\mathcal{Q}_1^i \leftarrow \mathcal{P}_1^i$$

$$\mathcal{Q}_2^i \leftarrow \{\mathcal{Q}_2^i \in \mathfrak{R} \mid \mathcal{Q}_2^i \in \Pi_2^T, \mathcal{Q}_2^i \in \Pi_2^\beta\}$$

$$\alpha^i \leftarrow 0$$
  - **faire**
    - ré-échantillonnage
 
$$\mathbf{x}_1^i(\beta, \alpha) = I_c \mathcal{G}(\mathcal{Q}_1^i)$$

$$\mathbf{x}_2^i(\beta, \alpha) = I_c \mathcal{G}(\mathcal{Q}_2^i)$$
    - $$\mathcal{Q}_1^{i+1} = \mathcal{R}(\mathcal{Q}_1^i, \alpha^i, \overrightarrow{\mathcal{Q}_1^i F_1} \wedge \mathbf{T})$$

$$\mathcal{Q}_2^{i+1} = \mathcal{R}(\mathcal{Q}_2^i, \alpha^i, \overrightarrow{\mathcal{Q}_2^i F_2} \wedge R\mathbf{T})$$

$$\alpha^{i+1} = \alpha^i + \Delta\alpha$$
  - tant que  $(\alpha^{i+1} \leq 2 * \pi)$ 

$$\mathcal{P}_1^{i+1} = \mathcal{R}(\mathcal{P}_1^i, \beta^i, \mathbf{T})$$

$$\beta^{i+1} = \beta^i + \Delta\beta$$
  - **tant que**  $(\beta^{i+1} \leq 2 * \pi)$

Figure 14. Algorithme de rectification.

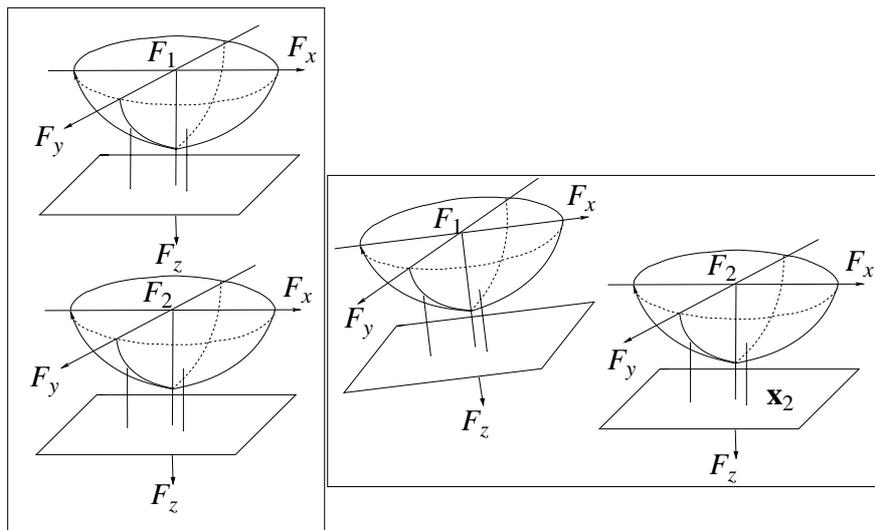


Figure 15. Les deux configurations du banc stéréo virtuel utilisées pour évaluer la procédure de rectification.

nées du paraboloides  $k$ ) sur la surface parabolique  $k$  dans la direction  $\vec{Q}_k^i F_k$ . Les images rectifiées sont définies par  $\mathbf{x}_{1,2}^i(\beta, \alpha)$ .

Nous avons testé la procédure de rectification dans un environnement simulé, dans lequel tous les paramètres de calibration sont bien entendu connus. L'environnement virtuel de test est composé de 5 plans disposés selon un cube (figure 16) : nous y plaçons notre caméra virtuelle dans une position et une orientation quelconques, et calculons l'image produite selon le modèle de formation géométrique des images en appliquant une technique de lancer de rayon. Le banc stéréoscopique virtuel est simulé en utilisant deux images acquises dans deux configurations différentes, la position relative entre les configurations étant connue (figure 15). Les figures 17 et 18 montrent les

images rectifiées dans les deux configurations du banc stéréoscopique évaluées. Bien entendu, les images rectifiées sont fortement distordues, et leur allure dépend de la configuration relative des deux caméras. De nombreux pixels sont donc interpolés dans certaines zones de l'image : ceci aura une influence sur la précision de la mise en correspondance des pixels, et donc de la reconstruction 3D.

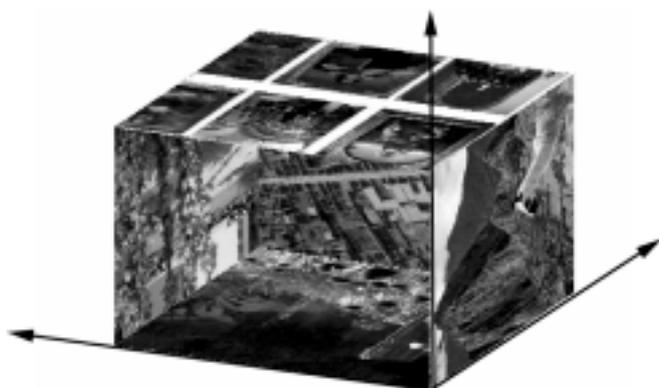


Figure 16. Environnement virtuel de test composé de 5 plans disposés sur les faces d'un cube..

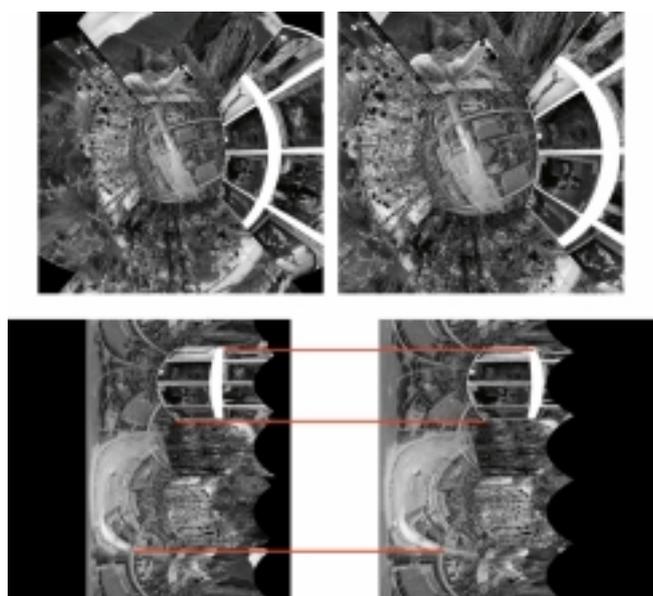


Figure 17. Résultat de l'algorithme de rectification avec une configuration du banc stéréoscopique où les caméras sont l'une au-dessus de l'autre (des lignes épipolaires horizontales sont tracées sur les images rectifiées).

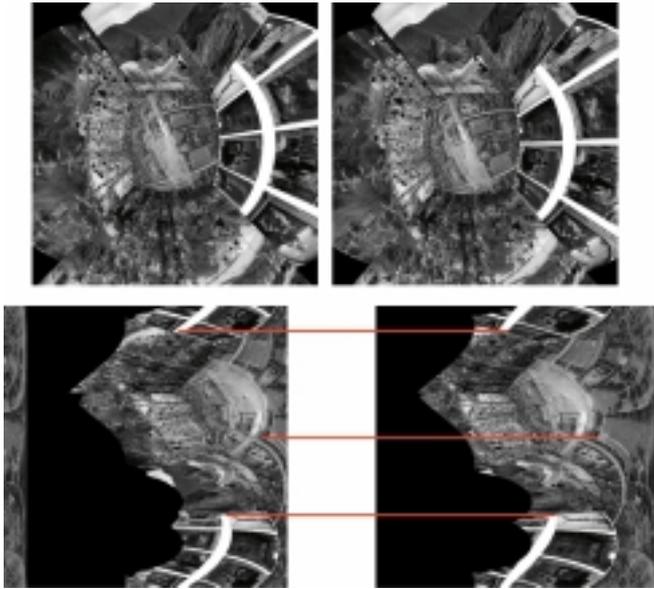


Figure 18. Résultat de l'algorithme de rectification avec une configuration du banc stéréoscopique où les caméras sont l'une à côté de l'autre (des lignes épipolaires horizontales sont tracées sur les images rectifiées).

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right) \\
 \phi_1 &= \arcsin\left(\frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}\right) \\
 \omega_1 &= \arccos\left(\frac{\mathbf{x}_1^T \mathbf{T}}{|\mathbf{x}_1| |\mathbf{T}|}\right) \\
 \omega_2 &= \arccos\left(\frac{\mathbf{x}_2^T R \mathbf{T}}{|\mathbf{x}_2| |R \mathbf{T}|}\right)
 \end{aligned} \tag{25}$$

où

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \frac{h^2 - (x_1^2 + y_1^2)}{2h} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \frac{h^2 - (x_2^2 + y_2^2)}{2h} \end{bmatrix}$$

À partir de la connaissance de la disparité  $|D|$  entre deux points  $\mathbf{x}_1$  et  $\mathbf{x}_2$ , nous pouvons déterminer les coordonnées du point  $\mathbf{X}$  correspondant :

### 3.3. Reconstruction 3D

Connaissant la rotation  $R$  et la translation  $\mathbf{T}$  entre les deux caméras, nous pouvons pré-calculer dans des tables les correspondances entre les coordonnées d'un pixel de l'image rectifiée et les angles correspondants exprimés dans le repère du miroir parabolique. Ces informations sont ensuite exploitées pour calculer les coordonnées 3D d'un point à partir de la disparité correspondante déterminée dans les images rectifiées. Étant donné deux points  $\mathbf{x}_1$  et  $\mathbf{x}_2$  homologues sur les surfaces des deux miroirs, nous avons (figure 19) :

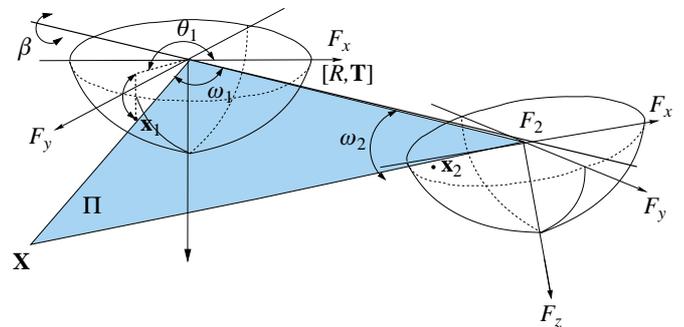


Figure 19. Définition des angles correspondants à deux points homologues.

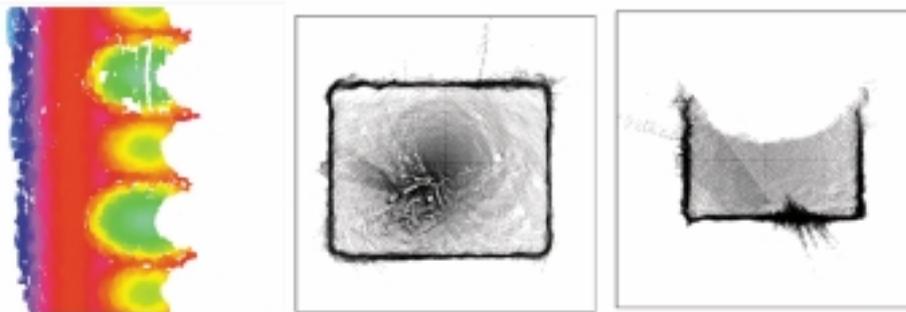


Figure 20. Disparités déterminées avec les images acquises dans l'environnement de synthèse.

$$|D| = \frac{\sin\omega_2}{|\mathbf{T}|\sin(\omega_1 + \omega_2)}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} |D|\sin\theta_1 \\ |D|\cos\theta_1 \\ |D|\sin\phi_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

La figure 20 montre les disparités déterminées par un algorithme classique de stéréovision dense à partir des images rectifiées de la figure 17, dans le cas où les caméras sont l'une au dessus de l'autre, et le résultat de la reconstruction 3D. L'algorithme d'appariement est basé sur le calcul d'un score de corrélation croisée, mais à cause de la forte distorsion imposée par la rectification en certaines zones, quelques points ont des coordonnées erronées.

### 3.4. Résultats

Nous avons appliqué les procédures de rectification et de reconstruction sur des paires d'images acquises avec le banc stéréoscopique dont les paramètres de calibrage ont été déterminés dans la section 2.4. Les caméras sont montées l'une au dessus de l'autre, afin d'obtenir une base de triangulation qui soit constante sur l'ensemble du champ de vue. Les figures 21 et 22 montrent un exemple de résultat. Les résultats de rectification sont bons : sur les images rectifiées reconstruites avec une résolution de  $800 \times 1000$  pixels, l'erreur de rectification maximale est inférieure à deux pixels. En utilisant une résolution deux fois moins grande, l'algorithme de mise en correspondance optimisé pour des épipolaires horizontales est donc applicable. La figure 22 montre l'image de disparité obtenue avec un algorithme de mise en correspondance optimisé pour des images rectifiées : comme on peut s'y attendre, les zones où les images ont été fortement distordues par la rectification ne produisent pas d'appariements.

## 4. Conclusions

Nous avons présenté la caractérisation complète d'une caméra catadioptrique composée d'un miroir parabolique et d'un miroir

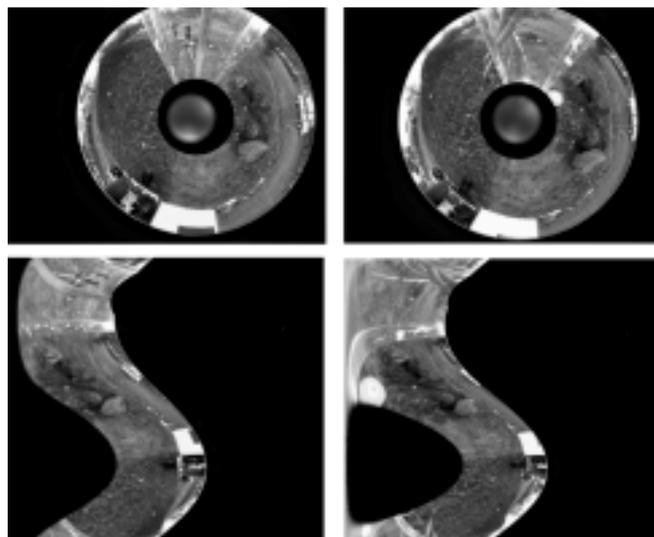


Figure 21. Images du banc stéréo et images rectifiées.

sphérique, en considérant les erreurs d'alignement entre les deux miroirs. Avec de telles erreurs, les rayons incidents ne croisent pas le foyer du paraboloïde : nous avons approché le foyer de projection du miroir parabolique de sorte que les erreurs de calibrage soit minimisées, tout en conservant un modèle de formation des images avec centre de projection unique. Une procédure de calibrage en plusieurs étapes permet d'estimer l'ensemble des paramètres du modèle, et permet d'obtenir des erreurs de reprojection de l'ordre de 0.2 pixels, notablement plus faible qu'en utilisant un modèle où les erreurs d'alignement ne sont pas considérées.

La procédure de rectification des images panoramiques que nous proposons est indépendante de la configuration du banc stéréo. Elle permet l'application d'un algorithme de stéréovision dense, ce qui présente beaucoup d'intérêt pour une application robotique. Les résultats de rectification obtenus confirment la précision du calibrage. La procédure n'est cependant pas idéale, car elle provoque de grandes distorsions sur certaines zones de l'image : ce problème peut être pallié par l'application d'une discrétisation avec un pas variable lors de la rectification,

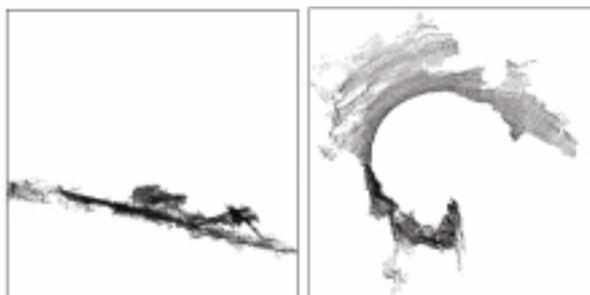


Figure 22. Image de disparité et points 3D perçus dans l'environnement.

à déterminer en fonction de la configuration géométrique du banc stéréoscopique et des besoins en précision sur la reconstruction tridimensionnelle.

## Références

- [Baldwin 00] J. BALDWIN and A. BASU, *3D Estimation Using Panoramic Stereo*, In International Conference on Pattern Recognition, Québec, Qc. (Canada), pages 91-100, August 2000.
- [Bankstein 02] H. BANKSTEIN and T. PAJDLA, *Panoramic Mosaicing with a 180° Field of View Lens*. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (Omnivis'02), Copenhagen (Denmark), June 2002.
- [Basu 01] A. BASU and J. BALDWIN, A real-time panoramic stereo imaging system and its application. Panoramic Vision, Benosman R. and Kang B., Eds, Springer, 2001.
- [Bunshoten 01] R. BUNSHOTEN and B. Kröse, *Range Estimation from a Pair of Omnidirectional Images*. In International Conference on Robotics and Automation, Seoul (Korea), pages 1174-1179, May 21-26, 2001.
- [Cauchois 99] C. CAUCHOIS, E. BRASSART, C. DROCOURT and P. VASSEUR. *Calibration of the omnidirectional vision sensor: SYCLOP*. In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Mi. (USA), pages 1287-1292, May 1999.
- [EA 01] T. EA, O. ROMAIN, C. GASTAUD et P. GARDA, *Un Capteur de Sphero-Vision Stéréoscopique Couleur*. In Congrès francophone de Vision par Ordinateur, ORASIS, Cahors (France), Juin 2001.
- [Fabrizio 02] J. FABRIZIO, J.-P. TAREL and R. BENOSMAN, *Calibration of Panoramic Catadioptric Sensors Made Easier*. In IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (Omnivis'02), Copenhagen (Denmark), June 2002.
- [Fiala 96] M. FIALA, D. SOUTHWELL, A. BASU and JREYDA, *Panoramic Stereo*. In 13<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition, Vienna (Austria), pages 378-382, 1996.
- [Geyer 99] C. GEYER and K. DANILIDIS, *Catadioptric Camera Calibration*. International Conference in Computer Vision, Corfu (Greece), pages 398-404, 1999.
- [Gluckman 98] J. GLUCKMAN, S.K. NAYAR and K. THORESZ, *Real-Time Omnidirectional and Panoramic Stereo*. In Image Understanding Workshop, Monterey, Ca (USA), pages 299-303, 1998.
- [Ishiguro 92] H. ISHIGURO, M. YAMAMOTO and S. TSUJI, *Omnidirectional Stereo*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pages 257-262, February 1992.
- [Kang 97] S.B. KANG and RSZELISKI, *3-D scene data recovery using omnidirectional multibaseline stereo*. International Journal of Computer Vision, vol. 25, no. 2, pages 167-183, November 1997.
- [Kang 00] S.B. KANG, *Catadioptric Self-Calibration*. In Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island, SC (USA), pages 210-207, 2000.
- [Koyasu 02] H. KOYASU, J. MIURA and Y. SHIRAI, *Racognizing Moving Obstacles for Robot Navigation using Real-Time Omnidirectional Stereo Vision*. Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 14, no. 2, pages 147-156, 2002.
- [More 77] J. MORE, *Levenberg-Marquardt algorithm : implementation and theory*. Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics 630, pages 388-395, 1977.
- [Nayar 97] S. NAYAR. *Omnidirectional Vision*. The Eighth International Symposium of Robotics Research, Shonan (Germany), October 1997.
- [Ng 02] Kim C. NG, M. TRIVEDI and H. ISHIGURO, *Generalize Multiple Baseline Stereo and Direct Virtual View Synthesis Using Range-Space Search, Match, and Render*. International Journal of Computer Vision, vol. 47, no. 1/2/3, pages 131-147, April-June 2002.
- [Ollis 99] M. OLLIS, H. HERMAN and S. SINGH, *Analysis and Desing of Panoramic Stereo Vision Using Equi-Angular Pixel Cameras*. Rapport technique, Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, January 1999.
- [Romain 01] O. ROMAIN, T. EA, C. GASTAUD et P. GARDA, *Un Capteur Multi-Spectral de Vision Panoramique 3D*. In Congrès francophone de Vision par Ordinateur, ORASIS, Cahors (France), Juin 2001.
- [Smajda 01] L. SMAJDA, R. BENOSMAN and J. DEVARIS, *Determining Epipolar Constraint on Cylindrical Images and Using it for 3D Reconstruction*. In Workshop on Omnidirectional Vision, International Conference on Advanced Robotics, Budapest (Hungary), 2001.
- [Sogo 00] T. SOGO and H. ISHIGURO, *Real-time target localization and tracking by n-ocular stereo*. In Proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, Hilton Head Island, SC (USA), pages 153-160, 2000.
- [Strelow 01] D. STRELOW, J. MISHLER, D. KOES and S. SINGH, *Precise Omnidirectional Camera Calibration*. In Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai Marriott, HI (USA), pages 689-694, December 2001.
- [Svoboda 02] T. SVOBODA, T. PAJDLA and V. HLAVAC, *Epipolar geometry for panoramic cameras*. In European Conference on Computer Vision, Freiburg (Germany), pages 218-232, June 1998.
- [Takiguchi 02] J. TAKIGUCHI, M. YOSHIDA, A. TAKEYA, J. EINO and T. HASHIZUME, *High Precision Range Estimation from an Omnidirectional Stereo System*. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne (Switzerland), pages 263-268, October 2002.
- [Zhu 00] Z. ZHU and D. RAJASEKAR, *3D Localization of Multiple Moving People by Omidirectional Stereo System of Cooperative Mobile Robots*. Rapport technique UM-CS-2000-014, University of Massachusetts, March 2000.
- [Zhu 00] Z. ZHU, K. RAJASEKAR, E. RISEMAN and A. HANSON, *Panoramic Virtual Stereo Vision of Cooperative Mobile Robots for Localizing 3D Moving Objects*. In Proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, Hilton Head Island, SC (USA), 2000.

**Jose-Joel Gonzalez-Barbosa**

Jose-Joel Gonzalez-Barbosa a effectué sa thèse au sein du groupe Robotique et Intelligence Artificielle au LAAS, de Septembre 2000 à Janvier 2004, sur la vision panoramique pour la navigation autonome d'un robot mobile. Depuis, il est enseignant à l'Universidad de Guanajuato (Mexique), et poursuit des recherches dans le domaine de la vision panoramique : modélisation et calibrage de capteurs, mais aussi méthodes de modélisation de l'environnement à partir d'images panoramiques.



**Simon Lacroix**

Simon Lacroix est chargé de recherches au LAAS. Diplômé de l'École Centrale de Paris en 1990, il a obtenu de titre de Docteur en Informatique au LAAS en 1995, après 4 années de travaux relatifs à la navigation autonome en environnements naturels non structurés. Après une année post-doctorale effectuée au « Center for Intelligent Machines » de l'université McGill (Montréal, Canada), il a intégré le CNRS. Ses travaux portent sur la perception et la navigation autonome en environnements extérieurs, tant pour des robots terrestres qu'aériens : modélisation d'environnement, localisation, contrôle de perception et stratégies de navigation.

