



HAL
open science

Étude d'un système de stéréo-vision hybride

François Rameau, Cédric Demonceaux, Désiré D. Sidibé, David Fofi

► **To cite this version:**

François Rameau, Cédric Demonceaux, Désiré D. Sidibé, David Fofi. Étude d'un système de stéréo-vision hybride. Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Jun 2013, Cluny, France. hal-00829446

HAL Id: hal-00829446

<https://hal.science/hal-00829446>

Submitted on 3 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude d'un système de stéréo-vision hybride

François Rameau

Cédric Demonceaux

Désiré Sidibé

David Fofi

Université de Bourgogne, Le2i UMR 6306 CNRS

12 rue de la fonderie, 71200 Le Creusot, France
francois.rameau@u-bourgogne.fr

Résumé

On considère dans ce travail un système de vision hybride fixe composé d'une caméra fisheye et d'une caméra PTZ dans un environnement rigide. Nous souhaitons être en mesure d'orienter la caméra mécanisée sur une cible visible depuis l'image omnidirectionnelle de manière à obtenir une image de bonne définition de l'objet d'intérêt à partir de la caméra PTZ. Nous proposons dans cet article d'utiliser la modélisation sphérique des images ainsi que les propriétés de la géométrie épipolaire afin d'initialiser la localisation de la cible dans la caméra PTZ.

Mots Clef

Caméra fisheye, PTZ, calibration, suivi de cible, système de vision hybride

Abstract

This article consider a fixed hybrid stereo-vision system, which is composed by a fisheye camera and a PTZ camera in a rigid environment. We want to steer the mechanical camera on the target visible on the omnidirectional image to obtain a high resolution image of the object of interest. We proposed in this paper to use the unified spherical model of images and the properties of the epipolar geometry in order to localise the target with the PTZ camera.

Keywords

Fisheye camera, PTZ, calibration, target tracking, hybrid vision system

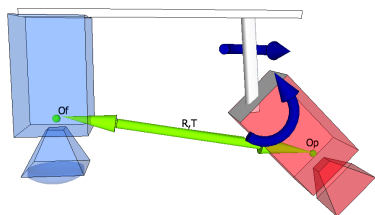


FIGURE 1 – Système de vision hybride composé d'une caméra fisheye (à gauche) et d'une caméra PTZ (à droite)

1 Introduction

Les caméras omnidirectionnelles permettent d'obtenir des images avec un grand champ de vue, cependant elles sont souvent dotées d'une résolution limitée et non-uniforme, ainsi que d'une focale fixe (pas de zoom optique). De plus l'utilisation de caméra omnidirectionnelle entraîne une forte distorsion géométrique de l'image rendant complexe la plupart des traitements d'image.

D'autre part, les caméras PTZ (Pan-Tilt-Zoom pour panoramique-inclinaison-zoom) sont dites actives car elles peuvent être mécaniquement orientées dans de multiples directions. Malgré le champ de vision restreint d'une caméra perspective classique, la possibilité d'orienter la caméra dans une direction déterminée permet de couvrir l'ensemble de la scène (jusqu'à 360°). Le zoom offre quant à lui la possibilité d'obtenir une image de haute précision sur une zone d'intérêt.

Le tandem formé par ces deux caméras permet de combiner l'avantage offert par chacune d'entre elle, à savoir la possibilité d'observer la scène dans sa globalité mais également de surveiller une zone désirée avec un niveau de détail ajustable. A l'aide d'un tel assemblage nous proposons ici une méthode permettant d'orienter la caméra PTZ dans la direction d'une zone d'intérêt visible sur l'image omnidirectionnelle. Notre approche est basée sur la représentation sphérique des images et sur la géométrie épipolaire existante entre les deux caméras. La condition requise au fonctionnement de notre méthode est d'avoir un capteur fixe dans une scène inerte mais inconnue.

Cette article s'articule autour de cinq parties principales, dans un premier temps une bibliographie concernant la stéréo-vision et la stéréo-vision hybride est proposée. Dans une seconde section la projection sphérique utilisée tout au long de ce papier est décrite. La troisième partie sera alors dédiée à la géométrie épipolaire. Nous rendons ensuite compte de la modélisation de notre système dans une quatrième partie. Dans la section 5 nous expliquons brièvement la méthode permettant la calibration du système. Dans la section 6 nous définissons la méthodologie employée afin de scanner une ligne épipolaire à l'aide de la caméra PTZ. Enfin, la section 7 présente les résultats obtenus.

1.1 Travaux antérieurs

La stéréo-vision est une des thématiques les plus étudiées dans le domaine de la vision par ordinateur. L'approche traditionnelle consiste à utiliser deux caméras de même nature. Cette approche n'est pas sans rappeler le système de vision humain [11]. Le fait d'avoir des caméras possédant le même modèle (voir les mêmes paramètres intrinsèques) facilite grandement les étapes de calibration et de reconstruction de l'environnement 3D. Dans [5], Bradley *et al.* décrivent une méthode de reconstruction par mise en correspondance de points en utilisant un système de vision binoculaire. Les possibilités offertes par les systèmes stéréoscopiques "conventionnels" sont vastes et concernent l'asservissement visuel [9], la vidéo surveillance [2], la navigation robotique [14]...

Plus récemment nous assistons à un fort développement des systèmes de stéréo-vision dit hybride. Un système de stéréo-vision hybride signifie que les deux caméras employées au sein du banc admettent différentes caractéristiques [7]. Cette association permet l'obtention d'informations supplémentaires comme par exemple, une extension du champ de vision, l'ajout d'informations 3D ou l'étude d'une gamme de longueur d'onde plus importante.

Dans ce document, nous nous intéressons à un système de vision hybride constitué d'une caméra omnidirectionnelle et d'une caméra de type PTZ (Pan-Tilt-Zoom). Il existe dans la littérature plusieurs travaux traitant déjà d'une association entre une caméra omnidirectionnelle et d'une caméra PTZ. La grande flexibilité offerte par cet agencement de caméras représente un grand intérêt dans le domaine de la vidéo surveillance [10, 1]. L'approche proposée par ces articles consiste à créer une table de correspondance représentative de la relation entre la commande de la caméra dynamique et les coordonnées image de la caméra omnidirectionnelle qui suppose donc un environnement fixe et connu. Toute forte modification de l'environnement nécessite donc une nouvelle calibration du système tandis que l'approche décrite dans cet article permet le contrôle de la caméra PTZ dans un environnement inconnu.

2 Modèle sphérique

L'utilisation d'un banc stéréo constitué de caméras régies par différents modèles de projection est problématique car interdit l'utilisation d'un grand nombre d'outils initialement destinés à un couple de caméras perspectives. Dans ce travail, afin de rendre la modélisation du système homogène, nous utiliserons la projection sphérique unifiée définie par Barreto *et al.* dans [3].

Théoriquement, ce modèle est valide uniquement pour les caméras à point de vue unique (PVU), c'est-à-dire lorsque tous les rayons s'intersectent au centre optique. Cette hypothèse n'est pas strictement respectée dans le cas d'une caméra fisheye, cependant [6] démontre que l'utilisation du modèle sphérique avec ce type de capteur reste une très bonne approximation.

De plus ce modèle est particulièrement adapté pour modé-

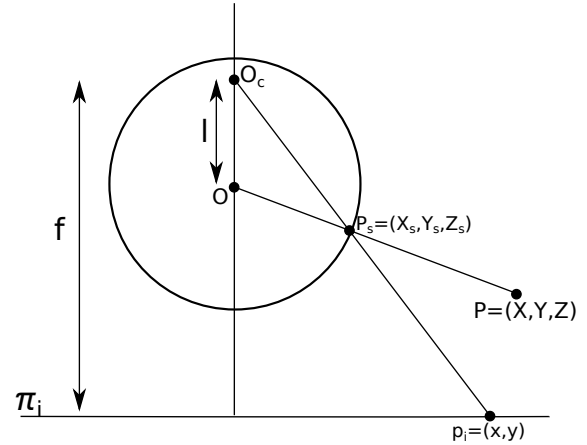


FIGURE 2 – Modèle sphérique unifié

liser une caméra PT/PTZ si la translation induite par le mécanisme de rotation est négligée comme c'est le cas dans de nombreux travaux comme [15].

Le processus de formation des images peut se traduire pour toute caméra centrale par une double projection sur une sphère gaussienne (voir fig. 2). Tout d'abord un point dans la scène P est projeté sur la sphère P_s . Cette première projection est suivie d'une seconde sur le plan image π_i formant ainsi le pixel p_i , cette projection part d'un point O_c situé au dessus du centre de la sphère. La distance l séparant ce point O_c et le centre de la sphère O modélise la distorsion inhérente à la caméra utilisée. Pour une caméra perspective sans distorsion cette distance est nulle alors que $l > 1$ dans le cas d'une lentille fisheye [17].

Dans ce travail, nous utilisons la projection inverse, permettant de re-projeter l'image plane sur sa représentation sphérique équivalente. Afin de re-projeter un pixel $p_i(x, y)$ en un point sur la sphère $P(X_s, Y_s, Z_s)$, une connaissance préalable des paramètres intrinsèques $K = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ de la caméra est nécessaire. Connaissant ces paramètres la projection peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} Z_s = \frac{-2.l.\omega + \sqrt{(2.l.\omega)^2 - 4(\omega+1).(l^2.\omega-1)}}{2(\omega+1)} \\ X_s = x_t(Z_s + l) \\ Y_s = y_t(Z_s + l) \end{cases}$$

avec $\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix} \simeq K^{-1}p_i$ et $\omega = x_t^2 + y_t^2$.

Dans ce document nous utilisons ce modèle pour nos deux caméras avec $l = 0$ pour la caméra PTZ.

3 Géométrie épipolaire

La géométrie épipolaire correspond au modèle mathématique liant deux images d'une même scène capturée sous deux points de vue différents. Cette géométrie se base sur

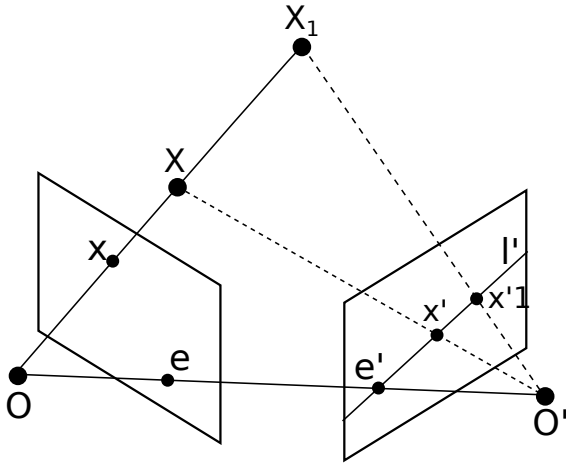


FIGURE 3 – Géométrie épipolaire

l'intersection des plans images avec le plan épipolaire π_e formé par les centres focaux des caméras (la *baseline*) et le point 3D X projeté sur les deux images aux points de correspondance x et x' . La position du point 3D X étant inconnu cela entrainera une ambiguïté sur la position du point de correspondance dans l'autre image qui sera nécessairement localisé sur la ligne épipolaire l' résultante, $x \mapsto l'$ (phénomène illustré figure 3). Tous les plans épipolaires possibles passent par les épipoles e et e' formés par l'intersection de la *baseline* et des plans images. La géométrie épipolaire peut être formalisée de manière mathématique sous forme de matrice fondamentale $F = K_2^{-T} T_{[\times]} R K_1^{-1} = K_2^{-T} E K_1^{-1}$ (avec K_1 et K_2 les paramètres intrinsèques des caméras et E la matrice essentielle) de taille 3×3 qui lie deux points de correspondance par la relation $x'^T F x = 0$. La géométrie épipolaire reste vérifiée même dans le cadre d'un système de vision omnidirectionnelle ou hybride [8]. En effet, dès lors que l'on utilise la représentation sphérique des images, la géométrie projective est valide. Dans cette configuration le centre des sphères O_o et O_p correspond au point focal des caméras, la *baseline* entre les caméras intersecte donc chacune des sphères en deux endroits formant alors 4 épipoles e_1, e_2, e'_1 et e'_2 (voir fig. 4).

Comme nous en avons fait état précédemment la géométrie épipolaire est préservée après une transformation sphérique de l'image. Dans ce cas la relation épipolaire peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P'^T E P = 0, \quad (1)$$

Où $E = [t]_{\times} R$ (avec t et R la translation et la rotation inter-caméra).

4 Modélisation du système

Afin de permettre la modélisation du système on souhaite l'exprimer en fonction d'un seul et même référentiel, la figure 4 résume l'ensemble des interactions entre les caméras. Par convenance on prendra le repère de

la caméra omnidirectionnelle $(\vec{X}_o, \vec{Y}_o, \vec{Z}_o)$ situé en O_o comme référence pour l'ensemble du système. La position et l'orientation de la caméra PTZ dans son propre référentiel $(\vec{X}_{ptz}, \vec{Y}_{ptz}, \vec{Z}_{ptz})$ devra alors s'exprimer en fonction de la référence globale. Notons qu'une translation T_{ptz}^p existe en pratique, elle correspond à la translation résiduelle inhérente à l'utilisation de mécanismes servant à pivoter la caméra sur ses axes.

Un point P_{ptz} dans la référence de la caméra PTZ pourra être exprimé dans la référence système de la manière suivante :

$$P_o = R_p^{oT} R_{ptz}^p(\varphi, \psi)^T (P_{ptz} - T_{ptz}^p) - T_p^o, \quad (2)$$

où P_o est le point dans le repère de la caméra omnidirectionnelle. Dans notre cas on considère la translation T_{ptz}^p comme négligeable on obtient donc cette relation :

$$P_o = R_p^{oT} R_{ptz}^p(\varphi, \psi)^T P_{ptz} - T_p^o. \quad (3)$$

5 Calibration du système de stéréo hybride

5.1 Calibration intrinsèque

Comme mentionné dans la section 2 nos caméras doivent dans un premier temps être calibrées individuellement afin de pouvoir utiliser le modèle sphérique. Pour la caméra PTZ (pour un niveau de zoom donné) l'utilisation de la *toolbox* développée par Bouguet [4] nous a permis l'obtention des paramètres K_p alors que la caméra fisheye a été étalonnée avec [13] fournissant K_o et l .

5.2 Calibration extrinsèque

Afin de déterminer les paramètres extrinsèques (R_p^o et T_p^o), et donc d'estimer la position relative des caméras (pour une rotation $R_{ptz}^p(0, 0) = I$), nous proposons de calculer l'homographie H induite par un plan projeté sur nos deux caméras sphériques[12] :

$$H \sim R_p^o - \frac{T_p^o n^T}{d}, \quad (4)$$

avec R_p^o la rotation entre les vues, T_p^o la translation entre les caméras et n^T/d le rapport entre la normale du plan et sa distance avec le centre optique de la caméra de référence.

Afin de déterminer cette homographie on utilise m points sur un plan dans le monde, visibles simultanément par les deux caméras (voir fig.5), P_o^i et P_p^i correspondent respectivement à l'image du $i^{\text{ème}}$ point 3D sur la caméra fisheye et sur la PTZ. L'homographie induite entre les deux sphères entraîne la relation suivante :

$$P_o^i \sim H P_p^i. \quad (5)$$

On peut alors en extraire les composantes R_p^o et T_p^o en guise d'initialisation à une méthode d'affinement non-linéaire en

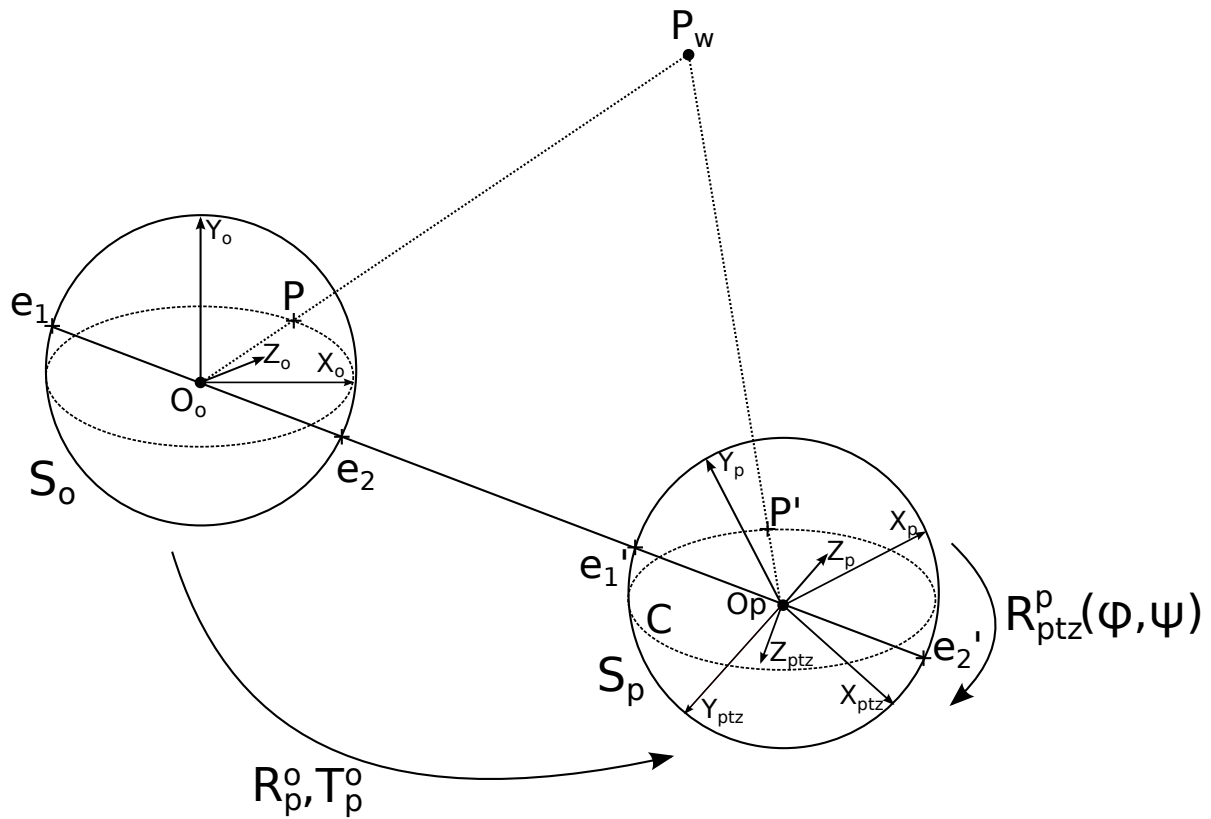


FIGURE 4 – modélisation complète du système

S_o	Modèle sphérique de la caméra omnidirectionnelle
S_p	Modèle sphérique de la caméra perspective
O_o	Centre de S_o , repère monde
O_p	Centre de S_p , $O_p = T_p^o$
P	Point cible $\in S_o$
P_w	Position 3D de la cible dans le monde
E	Matrice essentielle $E = T_{[X]}R$
π_e	Plan épipolaire défini par EP
C	Grand cercle épipolaire $\in S_p$
P'	Point recherché $\in C$
ψ	Commande angulaire permettant d'orienter la caméra en Tilt
φ	Commande angulaire permettant d'orienter la caméra en Pan
K_p	Paramètres intrinsèques de la caméra PTZ
K_o	Paramètres intrinsèques de la caméra omnidirectionnelle
T_p^o	Translation entre les caméras
R_p^o	Rotation entre les caméras pour $\psi = \varphi = 0$
$R_{ptz}^p(\varphi, \psi)$	Rotation de la caméra PTZ dans son repère, dépendant des commandes moteurs
$(\vec{X}_o, \vec{Y}_o, \vec{Z}_o)$	Repère de la caméra fisheye et du système
$(\vec{X}_{ptz}, \vec{Y}_{ptz}, \vec{Z}_{ptz})$	Repère de la caméra PTZ
$(\vec{X}_p, \vec{Y}_p, \vec{Z}_p)$	Repère intermédiaire décrivant la rotation inter-caméra pour $R_{ptz}^p = I$

TABLE 1 – Notations relatives au système

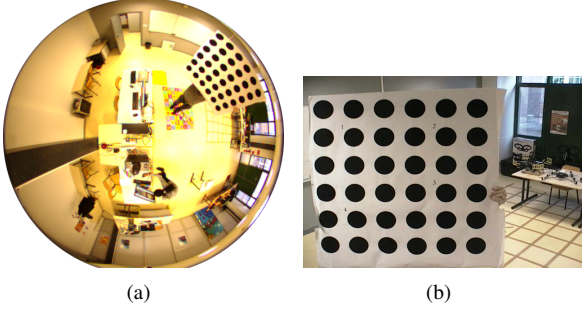


FIGURE 5 – Exemple d’images utilisées pour l’étape de calibration du système (a) Image fisheye, (b) Image perspective

résolvant le problème d’optimisation suivant :

$$\{R^*, T^*\} = \underset{R, T}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^k d^2(P_p^i, T_{p[\times]}^o R_p^o P_o^i) + d^2(P_p^{iT} T_{p[\times]}^o R_p^o, P_o^i) \quad (6)$$

tel que $R^T = R^{-1}$,

avec k le nombre de correspondances, P_p^i, P_o^i les $i^{\text{ème}}$ points de la scène en correspondances et d la distance géodésique entre le point et le cercle épipolaire le plus proche.

6 Méthodologie

On souhaite ici trouver les consignes angulaires de la caméra mécanisée (ψ, φ) permettant de visualiser une cible localisée sur la caméra fisheye ayant un centroïde P_o^c . Dans le cas d’un capteur fixe et si aucune information concernant la scène n’est connue, il est impossible de commander directement la caméra PTZ dans la direction désirée (ambiguïté sur la distance entre la cible et la caméra fisheye). Cependant la géométrie épipolaire permet de réduire la zone de recherche à un ensemble de points $P_p^c \in S_p$ définissant le grand cercle C et satisfaisant donc $P_p^{cT} T_{p[\times]}^o R_p^o P_o^c = 0$. La méthode proposée ici consiste dans le parcours de C à l’aide de la caméra PTZ afin de repérer l’objet d’intérêt. Obtenir les consignes angulaires en pan et tilt est simple, elles correspondent en effet aux coordonnées sphériques des points se trouvant sur C :

$$\forall P_p^c(X, Y, Z) \in S_p, \begin{cases} \varphi = \arccos(Z/\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)}) \\ \psi = \arctan(Y/X) \end{cases}$$

Cette série de commandes peut être considérablement réduite en éliminant les angles non atteignables par la caméra PTZ.

Connaitre la matrice de rotation inter-caméras à chaque instant est également un élément essentiel pour la majorité des applications de stéréo-vision, par exemple cette information est particulièrement utile pour tout procédé de



FIGURE 6 – Banc stéréo hybride

reconstruction 3D ou de mise en correspondances. Cette matrice de rotation est directement liée aux consignes envoyées à la caméra, l’ensemble des rotations vérifiant les équations suivante permettent d’aligner le centre de la caméra PTZ sur le cercle C en fonction de :

$$N \cdot R_p^o R_{ptz}^p(\varphi, \psi) Z_{ptz} = 0, \quad (7)$$

$$N \cdot R_p^o R_{\varphi} R_{\psi - \frac{\pi}{2}} Z_{ptz} = 0, \quad (8)$$

avec $N = T_{p[\times]}^o R_p^o P_o^c$ la normale du plan épipolaire, et où R_{φ} et R_{ψ} sont respectivement les matrices de rotations en pan et tilt. Tandis que $Z_{ptz} = [0 \ 0 \ 1]^T$ correspond à l’axe de la caméra PTZ à aligner sur le grand cercle épipolaire. Notons que notre approche est totalement fonctionnelle pour tout niveau de zoom, puisqu’il est possible de pré-calibrer [16] ou d’auto-calibrer [15] la caméra à focale variable.

7 Résultats

Dans cette section nous présentons les résultats expérimentaux obtenus en utilisant une caméra fixe d’une résolution de $640 \times 480p$ dotée d’une optique fisheye permettant d’obtenir un champ de vision de 180° . La caméra PTZ employée est une AXIS 2130R permettant une rotation panoramique sur 338° et un angle compris entre 0 et 90° en tilt. Elle est également pourvue d’un zoom optique $16\times$. Cette structure est suspendue au plafond d’une salle (voir figure 6). La figure 7 correspond à la représentation sphérique du système dans sa position de référence pour laquelle il a été calibré, c’est-à-dire que nous considérerons les commandes de rotation de la caméra égales à $\psi = \varphi = 0$. On distingue également sur cette figure le grand cercle épipolaire (en rouge) sur la sphère relative à la caméra PTZ, ce cercle correspond au point indiqué par un point rouge sur la caméra fisheye. La méthode décrite dans la section précédente nous a permis de calculer un ensemble de commandes permettant d’orienter la caméra sur ce cercle.

La figure 8, présente un exemple représentatif d’un des essais réalisés à partir de notre système, dans cette séquence nous avons délibérément choisi un objet lointain et assez

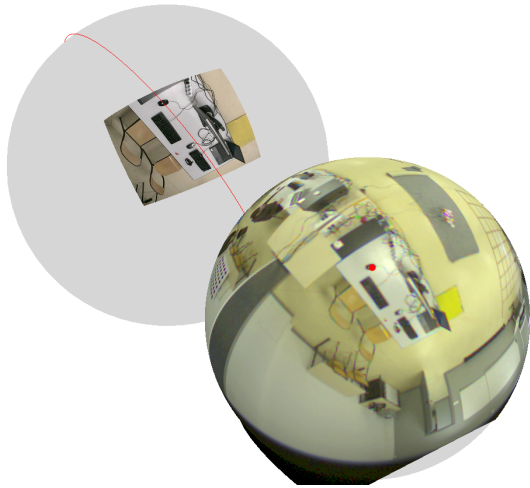


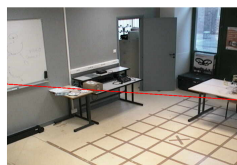
FIGURE 7 – Représentation sphérique du système après calibration



(a)



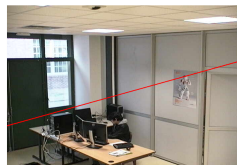
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURE 8 – (a) Image fisheye où l'extincteur rouge a été désigné comme cible (boite englobante rouge à droite de l'image), (b)(c)(d)(e) images obtenues par rotation de la caméra le long du cercle épipolaire

difficilement distinguable sur l'image fisheye. Dans la séquence d'images proposée on note bien la présence de l'objet d'intérêt dans l'image d . De plus, la ligne épipolaire (illustrée en rouge) est bien localisée sur l'objet cible. Il est ici difficile de quantifier l'erreur provenant de l'omission de T_{ptz}^p , elle semble cependant négligeable au vu des résultats obtenus qui sont visuellement très acceptables.

8 Conclusion

Dans cet article nous avons présenté un travail préliminaire permettant le suivi d'un cercle épipolaire dans un banc de stéréo-vision hybride. La méthode proposée requiert l'utilisation de différents outils tel que la représentation sphérique des images permettant d'obtenir une représentation homogène de nos caméras, ainsi que la géométrie épipolaire utilisée pour orienter notre caméra PTZ sur l'objet d'intérêt.

Les résultats présentés démontrent que notre méthode est parfaitement adaptée afin d'orienter la caméra mécanisée dans la direction d'une région d'intérêt choisie sur l'image fisheye.

De nombreuses perspectives sont envisageables notamment concernant la détection de la cible parmi les images acquises par la caméra PTZ. Il reste en effet à définir un critère permettant de stopper le suivi du cercle épipolaire une fois l'objet détecté. Cette détection de cible devra être adaptée aux spécificités des capteurs hybrides et devra en conséquence être robuste aux changements d'illumination, aux rotations ou encore à l'échelle.

Remerciements

Ce travail a été financé par la "Direction Générale de l'Armement" (DGA).

Références

- [1] J. Badri, C. Tilmant, J.M. Lavest, Q.C. Pham, and P. Sayd. Camera-to-camera mapping for hybrid pan-tilt-zoom sensors calibration. In *SCIA*, pages 132–141, 2007.
- [2] S. Bahadori and L. Iocchi. A stereo vision system for 3D reconstruction and semi-automatic surveillance of museum areas. 2003.
- [3] J. P. Barreto and H. Araujo. Issues on the geometry of central catadioptric image formation. In *CVPR*, pages 422–427, 2001.
- [4] J.Y. Bouguet. Matlab camera calibration toolbox. 2000.
- [5] D. Bradley, T. Boubekeur, T. Berlin, and W. Heidrich. Accurate multiview reconstruction using robust binocular stereo and surface meshing. In *CVPR*, 2008.
- [6] J. Courbon, Y. Mezouar, and P. Martinet. Evaluation of the unified model of the sphere for fisheye cameras in robotic applications. *Advanced Robotics*, 26(8-9):947–967, 2012.

- [7] D. Eynard, P. Vasseur, C. Demonceaux, and V. Frémont. Uav altitude estimation by mixed stereoscopic vision. In *IROS*, pages 646–651, 2010.
- [8] J Fujiki, A. Torii, and S. Akaho. Epipolar geometry via rectification of spherical images. In *Proceedings of the 3rd international conference on Computer vision/computer graphics collaboration techniques*, MIRAGE'07, pages 461–471, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [9] G. D. Hager, W.C. Chang, and A. S. Morse. Robot hand-eye coordination based on stereo vision. *IEEE Control Systems Magazine*, 15 :30–39, 1995.
- [10] H C Liao and Y C Cho. A new calibration method and its application for the cooperation of wide-angle and pan-tilt-zoom cameras. *Information Technology Journal*, 7(8) :1096–1105, 2008.
- [11] D. Marr and T. Poggio. A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 204(1156) :301–328, 1979.
- [12] C. Mei, S. Benhimane, E. Malis, and P. Rives. Efficient homography-based tracking and 3-d reconstruction for single-viewpoint sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(6) :1352–1364, Dec. 2008.
- [13] C. Mei and P. Rives. Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 2007.
- [14] D. R. Murray and J. J. Little. Using real-time stereo vision for mobile robot navigation. *Auton. Robots*, 8(2) :161–171, 2000.
- [15] F. Rameau, A. Habed, C. Demonceaux, D. Sidibé, and D. Fofi. Self-calibration of a ptz camera using new lmi constraints. In *ACCV*, 2012.
- [16] P. F. Sturm. Self-calibration of a moving zoom-lens camera by pre-calibration. *Image Vision Comput.*, 15(8) :583–589, 1997.
- [17] X. Ying and Z. Hu. Can we consider central catadioptric cameras and fisheye cameras within a unified imaging model. In *ECCV*, pages 442–455, 2004.