

Un capteur de vision multi spectrale omnidirectionnelle : conception, calibrations et exploitation

A multispectral omnidirectional stereoscopic sensor

**Olivier Romain¹, Thomas Ea², Claude Gastaud¹,
Patrick Garda¹**

¹Laboratoire des Instruments et des Systèmes d'Ile-de-France, LISIF, Université Pierre et Marie Curie 4 place Jussieu, BC252, 75252 Paris cedex 05, France
Olivier.Romain@lis.jussieu.fr

²Institut Supérieur d'Electronique de Paris, ISEP, 28 rue Notre Dame des Champs, 75006 Paris
Thomas.Ea@isep.fr

Manuscrit reçu le 24 janvier 2005

Résumé et mots clés

La reconstruction d'un environnement avec une grande précision et des textures fidèles représente un besoin important pour des applications liées aux mondes de l'événementiel, de la cinématographie et du multimédias. Nous présentons dans cet article, le développement complet, de la conception électronique à la restitution algorithmique de l'environnement, d'un système de vision stéréoscopique omnidirectionnel multi spectral permettant de répondre à ce besoin. L'architecture du système présentée ici, possède la particularité d'avoir deux caméras (munies de quatre canaux d'acquisition) couplées à un projecteur de lumière structurée infrarouge. Ce procédé original d'acquisition traite le processus d'obtention des textures couleurs indépendamment de celui de la reconstruction 3D. Les images panoramiques couleurs sont corrigées à partir des profils ICC (International Color Consortium) des deux caméras. La reconstruction 3D de l'environnement utilise les informations disponibles sur les canaux infrarouges des deux caméras. Une étape préliminaire de calibrage actif est aussi présentée. Des résultats expérimentaux démontrent la faisabilité de cette nouvelle classe de capteur de vision multi spectrale omnidirectionnelle.

Capteur de vision panoramique, capteur de vision omnidirectionnelle, acquisition, multi spectrale, caméras CCD linéaires, calibrage actif et reconstruction 3D.

Abstract and key words

The 3D reconstruction of an environment with a high degree of accuracy and faithful textures represents an important challenge for applications related to the multimedia and cinematography. We present in this article, the complete development, of the electronic design to the algorithmic restitution of the environment, of a multispectral omnidirectional stereoscopic sensor that tackles this problem. Although panoramic sensors exist, the vision system presented here has four channels of acquisition coupled to a projector of structured light emitting in the infra-red. This original process separates the acquisition of colors textures independently of the 3D reconstruction. The panoramic images colors are corrected starting from ICC (International Color Consortium) profiles of the two cameras. The reconstruction of the

environment uses only the invariable available on the infra-red channels. An active calibration technique is also presented. Experimental results demonstrate the feasibility of this new class of multispectral omnidirectional vision sensor.

panoramic vision sensor, omnidirectional vision sensor, multi spectral acquisition, scan-lines CCD camera, active calibration and 3D reconstruction.

1. Introduction

Depuis plus d'une quinzaine d'année, la conception de systèmes de vision panoramique donne lieu à un nombre important et croissant de recherches. Initialement développées pour la robotique mobile [YAGI] [PEGARD] [JARVIS] [ISHIGURO] et la télésurveillance [PERI] [OMNICAM], elles orientent maintenant vers des domaines d'applications en rapport avec le multimédias. La montée en puissance de la vision panoramique dans ce domaine correspond au développement de logiciels d'immersion comme Quick-Time VR. L'immersion produite se limitait alors à une vision sans relief. Actuellement, les applications liées aux domaines de l'événementiel, de la cinématographie et du multimédias font de plus en plus appels à la réalisation d'objets, de décors et de scènes en trois dimensions. La plupart du temps, ces scènes sont purement virtuelles. Or, la reconstruction précise d'un environnement réel représente de nos jours un enjeu économique et esthétique important pour ces domaines.

La reconstruction tridimensionnelle précise d'une scène pose plusieurs problèmes tant sur l'architecture du capteur qui permettra de réaliser une acquisition omnidirectionnelle que sur la nature de la scène observée (géométrie compliquée, présence de textures uniformes, etc.). Plusieurs approches scientifiques ont été développées pour résoudre le problème de la numérisation d'un décor sous la forme d'un nuage de point 3D accompagné d'une texture couleur. Les différentes solutions portent essentiellement sur l'utilisation de la vision active [BATLLE], de télémètres laser couplés à des caméras [MENSI] [ELHAKIM], de la stéréoscopie avec des configurations à plusieurs caméras [OMNICAM] ou encore de la vision stéréoscopique panoramique [PELEG] [SHUM]. Nous qualifierons la vision panoramique dans cet article, comme l'ensemble des techniques mécaniques, optiques et algorithmiques qui permettent d'augmenter une des deux composantes du champ de vue d'une caméra à 360° (respectivement 360×360 degrés pour la vision omnidirectionnelle).

L'approche que nous proposons ici se différencie des autres par l'utilisation d'un capteur de vision panoramique stéréoscopique

modifié en termes d'augmentation du champ observé et de précision de reconstruction par, l'utilisation de plusieurs canaux d'acquisition. Dans cet article, nous commencerons par introduire le principe du capteur de vision panoramique multi spectrale (capteur 1 axe) que nous avons conçu et nous verrons comment nous avons dérivé son architecture pour l'adapter à la vision omnidirectionnelle (capteur 2 axes). Nous présenterons ensuite une méthode de calibrage actif ainsi que l'algorithme d'appariement permettant de réaliser une reconstruction tridimensionnelle. Nous finirons par présenter des résultats expérimentaux de reconstructions panoramiques et omnidirectionnelles. Des perspectives de recherche seront présentées avant de conclure.

2. Capteur panoramique : 1 axe

2.1. Principe

Le principe de ce capteur de vision stéréoscopique repose sur l'idée émise par J. Devars en 1993 [MANIERE]. Elle est basée sur la mise en rotation autour d'un même axe de deux caméras linéaires CCD [figure 1] [figure 2]. L'axe de rotation passe par les centres optiques des deux caméras de manière à obtenir des images panoramiques de géométries cylindriques. En effet, comme les deux barrettes CCD sont placées dans les plans focaux des deux objectifs photographiques, celles-ci décrivent chacune un cylindre pendant une rotation continue sur 360 degrés. Ce procédé d'acquisition rend l'obtention d'images panoramiques de très grandes résolutions, conditionnées par le nombre de pixels de la barrette et le pas de rotation du moteur, contrairement aux caméras couplées à des miroirs catadioptriques ou des lentilles grands champs. La résolution de ces derniers est limitée à la taille du capteur d'image matricielle. Projecteur de lumière structurée IR Caméras Linéaires CCD
Axe de rotation

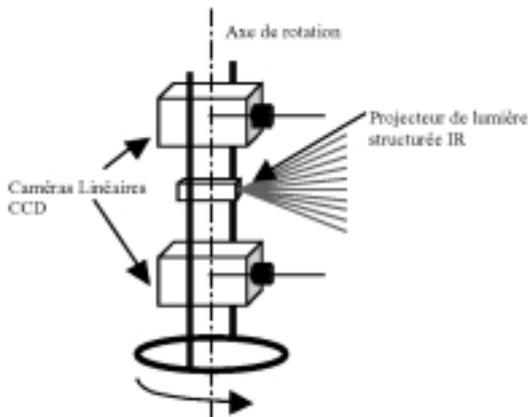


Figure 1. Principe du capteur panoramique.



Figure 2. Photographie du capteur panoramique.

2.2. Architecture du capteur

Les caméras ont été développées autour de deux barrettes CCD de 1024 pixels (Thomson 7802A) monochromes. La surface de chaque pixel est de $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$. Les différents signaux de contrôles sont générés par un circuit LM9800 (National Semiconductor). Ce dernier convertit le signal vidéo en un signal numérique de 8 bits. Les données numériques sont alors sauvegardées dans une mémoire tampon de type FIFO avant d'être transmises au PC par l'intermédiaire de deux fibres optiques plastiques. Tous les autres signaux de contrôles (codage des données, émission, réception, etc.) ont été implémentés en VHDL dans un FPGA (Altera Flex 10k10) pour minimiser le temps de prototypage. Une interface logicielle et une carte d'acquisition au format ISA, pour PC, ont été développées pour la programmation des paramètres du capteur (temps intégrations, angle de rotation, etc.) et la récupération des images.

Chaque caméra est pourvue d'un objectif photographique de focale 12,5 mm. Les centres optiques des deux caméras sont alignés par construction mécanique sur l'axe de rotation du moteur pas à pas. Celui-ci possède une résolution de 0.0001 degrés. Une conception mécanique précise permet d'aligner les caméras entre elles et de régler la netteté des caméras en translatant

les barrettes CCD dans leur plan focal. Ces réglages sont réalisés via trois tables micrométriques (x , y et azimuth) de résolution $10\mu\text{m}$. La base stéréoscopique est fixée à 20 cm par construction. Une attention toute particulière a été faite au niveau de la mécanique du capteur pour son réglage et sa stabilité.

Un projecteur de lumière structurée [LASER] est adjoint au système. Il est composé d'un laser infrarouge émettant à 890 nm et d'un réseau de diffraction. Cette lumière projette un motif composé de 15 lignes parallèles. L'angle inter faisceaux du projecteur est de 2.3 degrés. Ce projecteur est placé sur le même axe de rotation que les deux caméras et sa position a été fixée par construction à une distance proche du milieu des deux centres optiques des deux caméras, environ 10 cm.

3. Acquisition multi spectrale

3.1. Principe

Une des originalités de ce capteur stéréoscopique repose sur l'utilisation des propriétés intrinsèques des capteurs CCD utilisés, plus précisément sur la sensibilité spectrale du Silicium, pour produire une acquisition multi spectrale sur quatre canaux indépendants.

Comme le CCD possède une courbe de sensibilité spectrale dont la bande varie de 300 nm à 1100 nm, l'utilisation d'un jeu de quatre filtres [COHERENT] permet d'obtenir quatre canaux d'acquisition par caméra. Les réponses spectrales des filtres dichroïques utilisés [figure 3] ont été caractérisées par spectrométrie (UV-VI-IR). Les trois premiers canaux composés par les filtres primaires Rouge, Vert et Bleu sont utilisés pour l'acquisition d'un couple d'images stéréoscopiques panoramiques couleurs, tandis que le quatrième canal composé d'un filtre « Cold » coupant le domaine du visible [figure 4], sert à récupérer les images de la projection de la lumière structurée infrarouge projetée dans la scène.

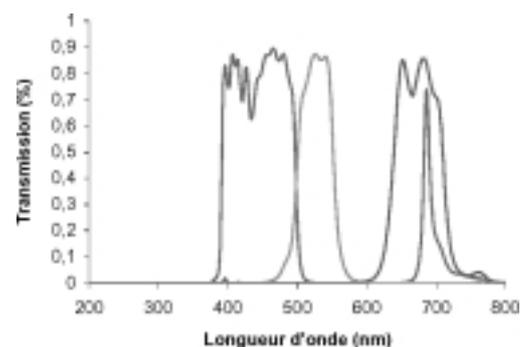


Figure 3. Réponse spectrale des filtres RVB.

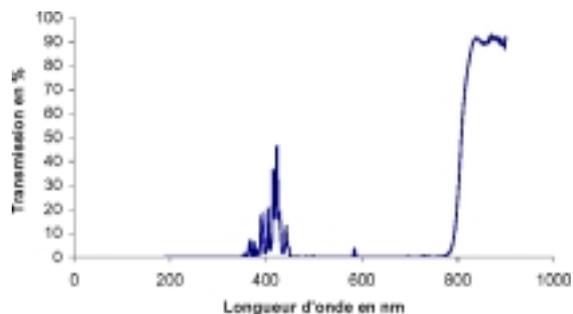


Figure 4. Réponse spectrale du filtre cold.

Ce principe d'acquisition multi spectrale possède l'avantage de séparer le processus d'acquisition des textures couleurs de celui concernant les informations géométriques de la scène. De manière à réduire les défauts dans le processus d'acquisition couleur, les filtres sont placés derrière l'objectif photographique de chaque caméra. Cette position permet de réduire les aberrations chromatiques dues aux objectifs photographiques et d'assurer qu'un point de l'espace est acquis sur l'ensemble des canaux suivant la même ligne de vue.



3.2. Calibrage colorimétrique par profil ICC

Les réponses spectrales des trois filtres couleurs étant différentes à la fois en largeurs de bande et en taux de transmission, une procédure de calibration colorimétrique est nécessaire. Celle-ci s'inspire des méthodes employées pour le calibrage des scanners. Elle caractérise l'espace colorimétrique d'un appareil d'acquisition en déterminant son profil ICC (International Color Consortium). Pour cela, une lumière dont la réponse spectrale est proche de celle du jour (à 5400K) ainsi qu'une charte IT8.7/2 dont les valeurs colorimétriques sont connues dans l'espace $L^*a^*b^*$, sont placées dans la scène. À partir de l'image acquise de la charte, il est alors possible à partir d'un logiciel tel que Colortune, de chez Agfa, de récupérer les profils ICC (International Color Consortium) des deux caméras. Par application du profil ICC de chaque caméra sur les images panoramiques acquises, une correction colorimétrique est réalisée. Cette opération garantit que les images couleurs possèdent de vraies composantes RVB [figure 5] [figure 6].



Figure 5. Image panoramique couleur corrigée, caméra haute.



Figure 6. Image panoramique couleur corrigée, caméra basse.

4. Capteur de vision omnidirectionnelle : 2 axes

4.1. Introduction

Les différents capteurs de vision panoramique permettent par définition d'étendre le champ de vue d'une caméra jusqu'à 360 degrés. Suivant le procédé d'acquisition il subsiste néanmoins des zones non acquises. Dans le cas des systèmes panoramiques catadioptriques, le champ couvert dépend de la forme du miroir utilisé (conique, parabolique ou hyperbolique de révolution). L'acquisition couvre alors moins d'un hémisphère et se voit d'autant plus réduite dans le cas d'une configuration stéréoscopique. Il en va de même pour les dispositifs utilisant des lentilles fish-eyes. Le capteur panoramique que nous avons conçu possède un champ de vision transversale, limité par la taille de la barrette CCD et de la focale des objectifs, de 90×360 degrés. La reconstruction tridimensionnelle produite par ces capteurs panoramiques ne permet alors pas d'obtenir une représentation complète de la scène observée. Pour pallier à ce problème, le procédé d'acquisition doit être étendu au cas omnidirectionnel.

4.2. Principe

L'idée directrice de la vision omnidirectionnelle repose sur l'utilisation de caméras couvrant une sphère d'observation [ROMAIN]. À cette fin, la nouvelle architecture mécanique qui a été développée pour répondre à ce problème, repose sur l'utilisation d'un second axe de rotation [figure 7] [figure 8]. Le capteur panoramique 1 axe décrit ci-dessus, est positionné horizontalement. Il est entraîné par un second moteur pas à pas. L'axe de rotation de ce dernier est centré par construction mécanique sur le projecteur de lumière structurée.

Le moteur pas à pas 2 assure la mise en rotation de l'ensemble de la plate forme constituée des deux caméras et du projecteur de lumière structurée. À chaque position de site du capteur, un couple d'images panoramiques (axe de révolution horizontal) multi spectrales est acquis. La résolution maximale du moteur

pas à pas 2 est de 0.01 degrés. Le déplacement en site du système dépend étroitement des dimensions de la scène. Typiquement pour une scène de 4 × 4 mètres, un pas de déplacement en site de l'ordre de 30 degrés suffi. En dessous, les informations contenues dans les couples d'images panoramiques présentent trop de redondance. Les figures [figure 9] [figure 10] présentent un exemple de couple d'images acquises.

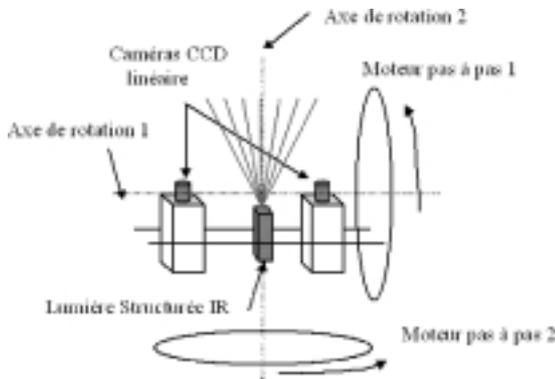


Figure 7. Principe du capteur de vision omnidirectionnelle.



Figure 8. Photographie du capteur de vision omnidirectionnelle.

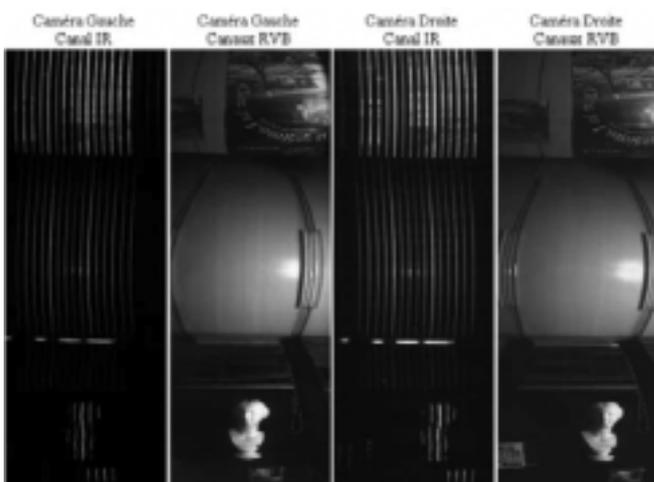


Figure 9. Couple d'images panoramiques multi spectrale, 0 degrés de site.

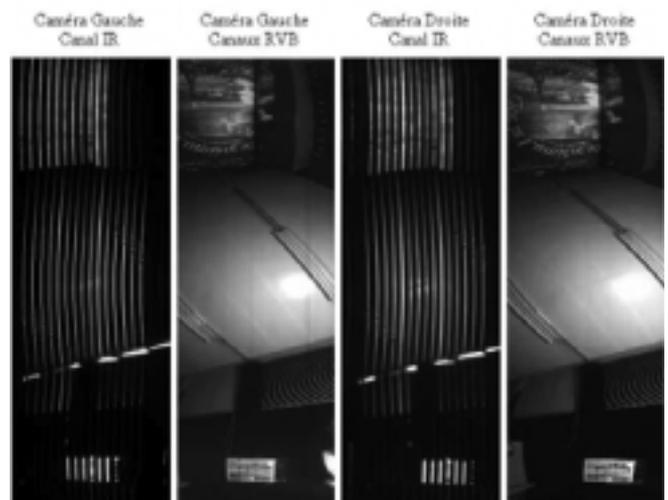


Figure 10. Couple d'images panoramiques multi spectrale, 30 degrés de site.

5. Calibrage actif

5.1. Introduction

La première étape dans un processus de reconstruction tridimensionnelle représente la détermination des paramètres physiques de chaque caméra du système stéréoscopique. Ces dernières années nombreuses méthodes s'appuyant sur des techniques de calibrages passifs [MARTINS] [LENTZ], actifs [BASU] [DU] [SEO] et d'auto calibrages [FAUGERAS] [HARTLEY] [SKORDAS] ont été développées pour des caméras matricielles fixes ou mobiles [STEIN], mais peu pour des caméras linéaires [BENOSMAN] [HORAUD]. Le calibrage d'une caméra linéaire en rotation nécessite un calibrage spécifique. En effet, d'une rotation à la suivante, il n'existe pas de corrélation possibles entre les images.

Le coeur de cette méthode repose sur les déformations géométriques des informations contenues dans la scène présentes dans les images panoramiques. Ces déformations proviennent directement du principe d'acquisition, projection cylindrique. En effet, une droite de l'espace correspondra à un arc de cosinus dans une image panoramique dont la courbure est inversement proportionnelle à la distance entre le capteur et la droite. Cette caractéristique a déjà été employée en robotique [ISHIGURO] [SARACHIK] et récemment en calibration [SMADJA]. Nous nous sommes inspiré de cette particularité pour développer cette méthode de calibrage actif.

5.2. Principe

La présence de lignes dans une scène dépend entièrement de la géométrie de celle-ci et des textures qu'elle renferme. Il existe

des cas où ces informations sont peu nombreuses voire inexistantes. L'idée de cette méthode de calibrage actif repose sur l'utilisation des informations contenues dans les images panoramiques du canal infrarouge en faisant l'hypothèse qu'une surface plane (un mur) est présente dans la scène. Comme les caméras utilisées sont des caméras linéaires, celles-ci ne perçoivent (sur le canal IR) seulement des points lasers qui correspondent à l'intersection des plans de vues des caméras, des plans de projections laser (lumière structurée) et de la surface sur laquelle est projetée cette dernière. Dans le cas où la surface est plane et perpendiculaire aux axes optiques des caméras, les points laser décrivent dans les images panoramiques des arcs de cosinus de courbure constante. Leurs équations dépendent essentiellement des paramètres intrinsèques. La modélisation mathématique suivante permet de mettre évidence cette caractéristique.

5.3. Modélisation mathématique

Afin de décrire mathématiquement la méthode de calibration, nous introduisons trois repères : le repère de la caméra (O_c, x_c, y_c, z_c) avec O_c le centre de projection et x_c correspondant à l'axe optique; le repère de la lumière structurée (O_l, x_l, y_l, z_l) et le repère monde (O_w, x_w, y_w, z_w) avec O_w pris au milieu des deux centres optiques des caméras. Les figures [figure 11] et [figure 12] montrent les systèmes de coordonnées utilisés.

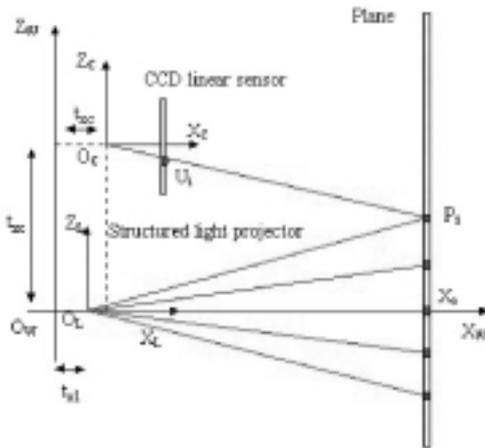


Figure 11. Définition des repères.

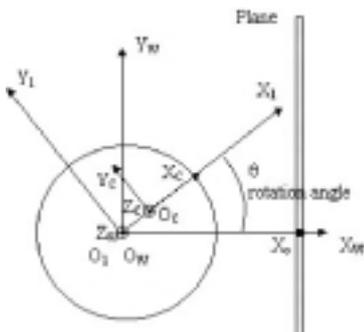


Figure 12. Repères vues de dessus.

Un modèle de perception projective est utilisé pour chaque caméra. La relation entre les coordonnées images et les coordonnées d'un $i^{\text{ème}}$ point laser dans le repère monde est donnée ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} s \cdot u_i \\ s \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot P \cdot R_B(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_w^i \\ y_w^i \\ z_w^i \\ 1 \end{bmatrix}_{i \in [-7,7]} \quad (1)$$

Avec K la matrice des paramètres intrinsèques, P la matrice de projection perspective et $R_B(\theta)$ la matrice de changement de repère monde/caméra. Il est à noter que le paramètre t_{xc} représente la distance entre le centre optique de la caméra et l'axe de rotation.

$$K = \begin{bmatrix} U_0 & K_u & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_B(\theta) = \begin{bmatrix} R^{3 \times 3} & t^{1 \times 3} \\ 000 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & t_{zc} \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_{xc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Comme la caméra ne percevra que des points lasers (intersection du plan de vue avec les plans laser) nous pouvons considérer la source structurée comme un générateur de points. Sa modélisation peut être alors considérée comme un modèle inverse de caméra. La relation entre les coordonnées d'un $i^{\text{ème}}$ point laser et ses coordonnées dans le repère monde sont données ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} p \cdot \tan(i \cdot \varphi) \\ p \\ 1 \end{bmatrix} = K_L \cdot P \cdot R_L(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_w^i \\ y_w^i \\ z_w^i \\ 1 \end{bmatrix}_{i \in [-7,7]} \quad (2)$$

Où φ représente l'angle entre deux droites laser consécutives. Cet angle de 2.3 degrés est donnée par le constructeur. K_L la matrice des paramètres intrinsèques, P la matrice de projection perspective et $R_L(\theta)$ la matrice de changement de repère monde/laser.

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_L(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & t_{xl} \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La relation entre les coordonnées d'un $i^{\text{ème}}$ point laser dans le repère caméra et laser peut être déterminée en faisant l'unique hypothèse dans la scène de la présence d'un plan d'équation :

$$x_w^i = X_0 = cst \quad (3)$$

En considérant les équations 1, 2 et 3, nous pouvons en déduire l'équation de la projection d'un $i^{\text{ème}}$ point laser dans une image panoramique (4) :

$$\begin{aligned}
 U(\theta, i) = & h_1 + h_2 \cdot \cos(\theta) \\
 & + h_3 \cdot \tan(i \cdot \varphi) + h_4 \cdot \cos(\theta) \cdot \tan(i \cdot \varphi) \\
 & + h_5 \cdot U(\theta, i) \cdot \cos(\theta)
 \end{aligned} \quad (4)$$

Avec :

$$h_1 = u_0, \quad h_2 = \frac{u_0 \cdot t_{xb}}{X_0} + \frac{\alpha_u \cdot t_{zb}}{X_0}, \quad h_3 = \alpha_u,$$

$$h_4 = \frac{\alpha_u \cdot t_{xl}}{X_0} \quad \text{et} \quad h_5 = \frac{-t_{xb}}{X_0}$$

En considérant les équations 2 et 3, l'équation de la trajectoire d'un $i^{\text{ème}}$ point laser sur le plan de projection peut être déterminée (équation). Celle-ci montre que lors d'une rotation du capteur, le $i^{\text{ème}}$ point laser décrit sur la surface plane une conique de type hyperbole.

$$\left(\frac{z_w + (t_{zl} - \tan(i\varphi) \cdot t_{xl})}{X_0 \cdot \tan(i\varphi)} \right)^2 - \left(\frac{y_w}{X_0} \right)^2 = 1 \quad (5)$$

L'équation 4 montre premièrement que les paramètres intrinsèques sont directement accessibles tandis que les paramètres extrinsèques dépendent de la distance qui sépare le capteur du plan (X_0). Deuxièmement, que les équations de la projection des points lasers dans les images panoramiques correspondent à des arcs de cosinus de courbures constantes comme le montre les images ci-dessous [figure 13] [figure 14].

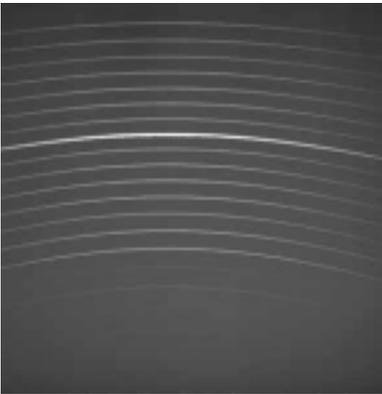


Figure 13. Images des points lasers dans la caméra basse.

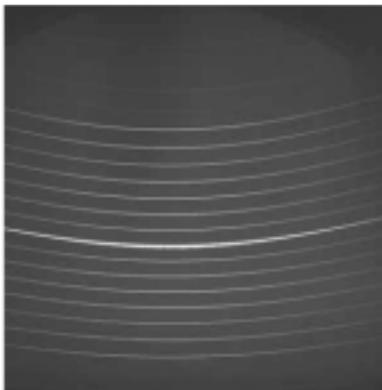


Figure 14. Images des points lasers dans la caméra haute.

À partir de l'extraction des ces primitives dans les images panoramiques, la détermination des paramètres intrinsèques est faite au sens des moindres carrés en prenant un nombre suffisant de points. Les paramètres m_i de l'équation 4 sont déterminés par l'équation ci-dessous :

$$m = (M^T \cdot M^{-1})^{-1} \cdot M^T \cdot U$$

Avec U le vecteur des coordonnées images des 15 points laser et M

$$\begin{pmatrix}
 1 & \cos \theta_1 & \tan(i\varphi) & \cos(\theta_1) \cdot \tan(i \cdot \varphi) & U(i, \theta_1) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 1 & \cos \theta_n & \tan(i\varphi) & \cos(\theta_n) \cdot \tan(i \cdot \varphi) & U(i, \theta_n) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 1 & \cos \theta_n & \tan(j\varphi) & \cos(\theta_n) \cdot \tan(j \cdot \varphi) & U(j, \theta_n)
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U(i, \theta_1) \\ \vdots \\ U(i, \theta_n) \\ \vdots \\ U(j, \theta_n) \end{pmatrix}$$

Le fondement mathématique de cette méthode étant basé sur le principe de triangulation, la détermination de l'ensemble des paramètres extrinsèques ne peut être faite sans la connaissance *a priori* d'une distance.

5.4. Résultats expérimentaux

Pratiquement, nous avons pourvue notre capteur d'un télémètre laser qui nous a fourni la distance du capteur au plan de projection, c'est-à-dire le paramètre X_0 dans notre modélisation. Les images [figure 13] [figure 14] ont été prises avec une distance X_0 de 0.5774 mètres, sur 130 degrés avec un pas de 0.1 degrés. Les résultats du calibrage actif sont donnés ci-dessous [Tableau 1].

Tableau 1. Résultat du calibrage actif.

Paramètre	Camera droite	Camera gauche
U_0 (pixel)	508.386	479.219
K_u (pixel)	1003.413	1006.301
T_{xc} (meters)	0.0147	0.0161
T_{zc} (meters)	0.0978	0.1001
Nombre de points images utilisés	3885	3411
Position du plan	Télémètre	Reconstruit
X_0 (meters)	0.5774	0.5894
Lumière structurée	Estimé	
T_{xl} (meters)	0.00161	

À partir des paramètres de chaque caméra, une reconstruction du plan de projection a été faite [figure 15]. La position du plan reconstruit est à une distance de 0.5894 mètres, soit une erreur moyenne de reconstruction de 2%. La reconstruction montre conformément à la théorie un réseau d'hyperbole correspondant aux parcours décrit par les points laser sur le plan.

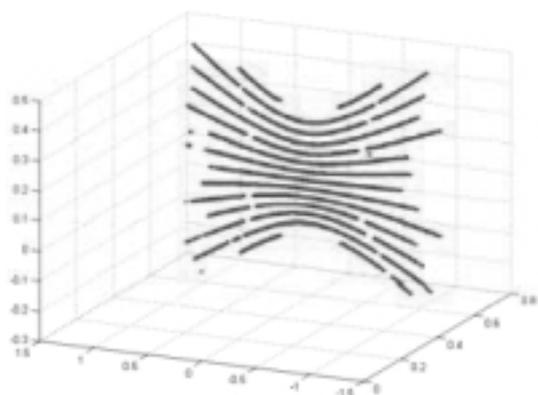


Figure 15. Reconstruction de la mire laser.

Afin de vérifier les performances de ce calibrage actif, deux méthodes passives ont été utilisées. Elles utilisent respectivement, une mire orthogonale [BENOSMAN] et une mire plane [MONGA]. Les tableaux [Tableau 2] [Tableau 3] donnent les résultats obtenus par les différentes méthodes pour les deux caméras et permettent de valider cette nouvelle méthode de calibrage actif.

Tableau 2. Résultats de la comparaison des méthodes de calibrage, caméra basse.

Caméra basse (paramètres intrinsèques)			
	Calibrage actif	Mire orthogonale	Mire verticale
U_0	508.386	515.884	505.136
K_u	1003.413	1004.87	1003.241
N_{pts}	3885	22	96

Tableau 3. Résultats de la comparaison des méthodes de calibrage, caméra haute.

Caméra basse (paramètres intrinsèques)			
	Calibrage actif	Mire orthogonale	Mire verticale
U_0	479.219	467.47	472.355
K_u	1006.301	997.76	999.457
N_{pts}	3885	22	96

5.5. Conclusion

Cette méthode possède l'avantage de retrouver rapidement les paramètres intrinsèques d'une caméra linéaire en rotation et d'estimer la position des centres optiques des caméras par rap-

port à l'axe de rotation. Néanmoins, l'ensemble des paramètres ne peut être déterminé qu'à partir de la connaissance d'une part du modèle de diffraction du projecteur laser (angle entre les droites) et d'autre part d'une information de distance supplémentaire, capteur/plan de projection, centre optique caméra/centre de projection du laser, etc. Ces deux jeux d'informations sont des limitations à cette nouvelle méthode.

6. Reconstruction tridimensionnelle

6.1. Algorithme d'appariement

L'algorithme de mise en correspondance utilisé ici est directement lié au principe d'acquisition multi spectral du capteur. Il utilise les primitives contenues dans les images des deux canaux infrarouges représentant les informations géométriques de la scène. Les primitives utilisées sont les indices pixels des points lasers projetés (intersection du plan de vue, des plans laser contenant les lignes et de la scène). Plus précisément, les maxima des profils gaussiens des points lasers acquis. L'extraction de ces primitives est obtenue à partir d'une détection sub-pixel du passe par zéro du Laplacien des images infrarouges. Cette opération à lieu colonne par colonne pour les deux caméras. Pour les caméras linéaires, les algorithmes de mise en correspondance les plus utilisés sont généralement des programmes de type corrélation [CHRISTY] ou programmation dynamique [BENOSMAN2]. Or, ces programmes sont assez coûteux en temps de calcul et en mémoire et inadaptés à ce capteur. En effet, au maximum 15 primitives sont extraites colonne par colonne sur chaque canal. La mise en correspondance de ces primitives peut être faites directement en utilisant certaines règles telles que, l'unicité et l'ordre d'apparition [figure 16]. Néanmoins, comme tout algorithme d'appariement il existe des configurations où de faux appariements sont produits.

6.2. Performances du capteur

Précision de reconstruction

Avant de reconstruire entièrement un environnement, il est intéressant de déterminer les performances. À cette fin, une mire plane est positionnée devant le capteur. À chaque position de celle-ci (mesurée par télémétrie laser), une série de 100 reconstructions sont effectuées en utilisant les paramètres de calibrage donné ci-dessus. Une estimation des performances de reconstruction de ce capteur est donnée [figure 17].

Ces résultats montrent que les erreurs de reconstruction sont quadratiques avec la distance. Comme tout système stéréoscopique, la précision obtenue est directement liée à la distance

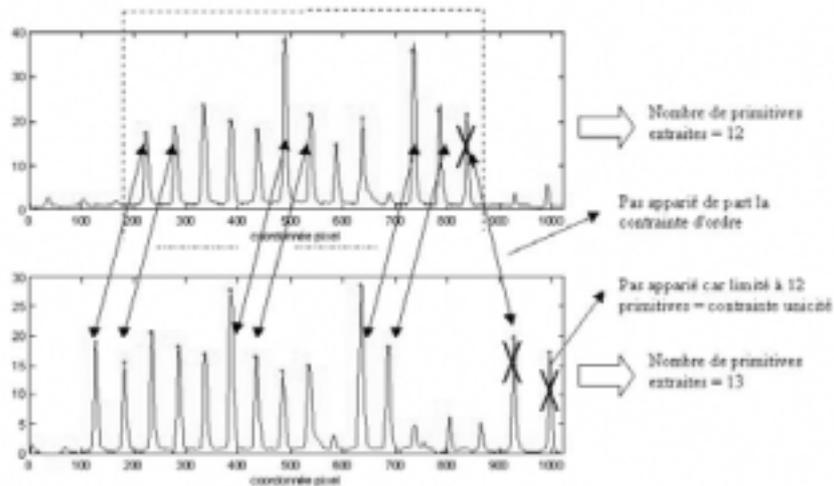


Figure 16. Illustration des contraintes d'appariements.

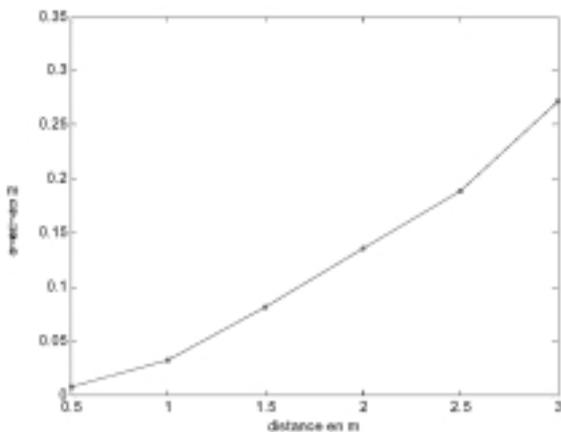


Figure 17. Performance du capteur

qui sépare les deux caméras, c'est-à-dire la base stéréoscopique du système. Dans cette configuration, ce capteur est adapté plus particulièrement à la reconstruction de petites salles (2 par 2 mètres) tolérant une erreur de l'ordre de 6 % (12 cm).

Performances temporelles

Le temps d'acquisition d'un couple d'images panoramiques multi spectrales découle entièrement du temps d'intégration (programmable) des caméras. Ce dernier dépend des conditions

lumineuses et du taux de transmission de chaque filtre. Le tableau [Tableau 4] ci-dessous résume les différentes performances temporelles du capteur (obtenues dans des conditions d'éclairage standard).

Le tableau ci-dessous montre que ce système d'acquisition ne permet pas de répondre à des contraintes temps réel. Cette caractéristique provient essentiellement du principe utilisé (rotation de caméras par des moteurs pas à pas). Par conséquent, l'utilisation de ce capteur autre que pour des applications de numérisation de scène, comme celles qui sont liées à la robotique mobile ou la vidéo surveillance sont alors proscrites.

6.3. Reconstruction panoramique

La reconstruction tridimensionnelle sur 360 degrés a été obtenue à partir du traitement des images panoramiques acquises à partir de la configuration 1 axe du capteur avec un pas de 0.1 degrés. La scène de tests mesure 4.4 mètres de longueur par 2.8 mètres de largeur. La reconstruction a été faite [figure 18] à partir des paramètres obtenus par le calibrage actif et l'algorithme de mise en correspondance présentée ci-dessous. 1

La figure [figure 18] montre que les proportions de la pièce sont bien respectées avec des erreurs compatibles avec les performances mesurées. On peut remarquer une légère courbure des murs dus aux distorsions optiques produits par les objectifs pho-

Tableau 4. Performances temporelles.

Temps	Performances
Acquisition sur un canal d'une image panoramique (3 600 × 1 024 pixels)	3 minutes
Acquisition d'un couple d'images panoramiques multi spectrales (3 600 × 1 024 pixels)	12 minutes
Acquisition de plusieurs couples d'images panoramiques multi spectrales couvrant une scène entière	> 1 heure

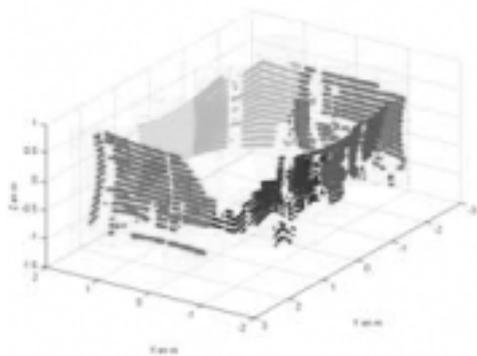


Figure 18. Reconstruction panoramique.

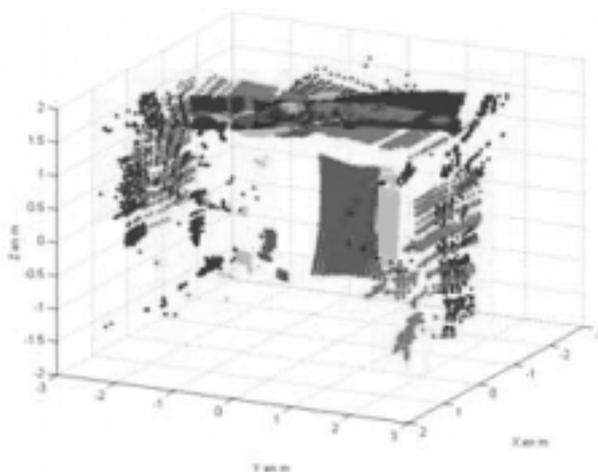


Figure 20. Reconstruction omnidirectionnelle.



Figure 19. Reconstruction panoramique texturée, VRML.



Figure 21. Image sphérique.

tographiques et non corrigés par calibrage. À partir de ce nuage de point tridimensionnelle, une représentation texturée est réalisée en utilisant le langage VRML. Un maillage préalable à partir d'un algorithme de Delaunay2D est nécessaire avant d'appliquer la texture couleur corrigée issues de la caméra basse. L'utilisation d'un moteur VRML tel que Cosmos Player sous un navigateur comme Internet Explorer permet de visualiser la reconstruction texturée [figure 19].

6.4. Reconstruction omnidirectionnelle

Les résultats expérimentaux de reconstruction omnidirectionnelle ont été obtenus sur la même salle de test. Cinq couples d'images panoramiques multi spectrales ont été acquis à des positions de site de 0, 30, 60, 90 et 120 degrés. Une représentation du nuage de points reconstruit est donnée ci-dessous [Figure 20].

Ce résultat montre que les dimensions de la scène sont respectées et correspondent à celles obtenues pour la reconstruction panoramique. Néanmoins, de par le procédé d'acquisition, il subsiste un nombre important de points reconstruits redondant (plafond), nécessitant une opération supplémentaire de fusion avant qu'une texture couleur ne soit appliquée. Ces traitements algorithmiques constituent des perspectives de recherche à ces travaux. Le même problème subsiste pour la texture : Comment obtenir une texture unique à partir des images panoramiques

acquises ? Une réponse à ce problème serait la constitution d'une image sphérique. Le premier résultat en la matière [figure 21] a été obtenu en utilisant une transformation cylindrique/sphérique [ROMAIN2].

7. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article, le développement complet d'un capteur de vision stéréoscopique mutli spectrale et omnidirectionnelle, depuis sa conception électronique jusqu'aux algorithmes permettant une reconstructions tridimensionnelles d'un environnement. Son architecture multi spectrale permet de séparer l'acquisition des textures couleurs de celle concernant les informations géométriques de la scène. Grâce aux informations disponibles sur le canal infrarouge, nous avons montré dans un premier temps qu'une calibration des paramètres physique de la caméra était possible. Une étude comparative des méthodes de calibrage classique a été menée et a permis de valider la méthode proposée. Nous avons montré dans un second temps, que le canal infrarouge permet de simplifier les problèmes de mise en correspondances des points homologues en réduisant les problèmes classique 2D en 1D.

Des résultats expérimentaux de reconstruction 3D panoramique et omnidirectionnelle sur une pièce test ont été présentés. Les dimensions de la scène sont respectées à la précision près du capteur (9% à 3 mètres). Néanmoins, certaines zones ne sont pas reconstruites par manque d'informations liées à la puissance insuffisante du laser. Nous avons aussi montré d'une part qu'une fusion des points 3D reconstruits était nécessaire afin d'éliminer la redondance des informations présentes et d'autre part, que l'application de la texture passe par l'établissement d'une image sphérique à partir des images panoramiques. Ces derniers traitements représentent des perspectives de recherches.

Références

- [BASU] A. BASU, « Active calibration: Alternative strategy and analysis ». In *Proc of ICCV'93*, pages 495-500, New-York, USA, 1993.
- [BATLLE] J. BATLLE, E. MOUADDIB, J. SALVI, « Recent Progress in Coded Structured light as a technique to solve the correspondance problem: a survey », *Pattern Recognition Letter*, vol 31, n°7, pp. 963-982, 1998
- [BENOSMAN] R. BENOSMAN, T. MANIERE and J. DEVARS, « Panoramic Sensor Calibration using computational projective geometry ». In *Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, April 1997.
- [BENOSMAN2] R. BENOSMAN, « Reconstruction d'environnements perçus par un capteur panoramique de stéréovision et détermination des méthodes de CAO », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 1997.
- [CHRISTY] S. CHRISTY, « Localisation et modélisation tridimensionnelles par approximations successives du modèle perspectif de caméra », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 17 septembre 1998.
- [COHERENT] Cohérent. Filtre dichroïque couleur.
<http://www.catalog.cohr.com/>
- [DU] F. DU and M. BRADY. « Self-Calibration of the Intrinsic Parameters of Cameras for Active Vision Systems ». In *Proc. Of IEEE Conf. On Computer Vision and Pattern Recognition*. New York, NY, pp. 477-482, June 1993.
- [ELHAKIM] S. F. EL-HAKIM, P. BOULANGER, F. BLAIS, J. A. BERALDIN, « A system for indoor virtual environment models », in *Proc. Virtual Systems ans Multimedia, VSMM'97*, Sept 10, 1997.
- [FAUGERAS] O. FAUGERAS, T. LUONG and S. MAYBANK, « Camera Self-Calibration : theory and experiments », In *Proc. of the 2nd ECCV*.
- [HARTLEY] R. Hartley, « Self-calibration from multiple views with a rotating camera ». In *Proc. of the 3rd ECCV'94*, vol 800-801 of lectures notes in computer science, pages 471-478, Stockholm, Sweden, May 1994.
- [HORAUD] R. HORAUD, R. MOHR and B. LORCKI, « On single-scanline camera calibration ». In *Proc. of the IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 9(1):71-75, February, 1993.
- [ISHIGURO] H. Ishiguro, T. Maeda, T. Miyashita and S. Tsuji, « A strategy for acquiring an environmental model with panoramic sensing by a mobile robot ». In *Proc. of the ICRA'94*, pages 724-729, 1994.
- [JARVIS] R. A. JARVIS et J. C. BYRNE, « An automated guided vehicle with map building and path finding capabilities ». In *Proc. of the 4th ISPP*, pages 497-504, 1988.
- [LASER] Laser 2000, module laser infrarouge. <http://www.laser2000.com>
- [LENZ] R. K. LENZ and R. Y. TSAI, « Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3d machine vision metrology ». In *Proc. of the IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(5):713-720, 1988.
- [MANIERE] T. MANIERE, R. BENOSMAN, J. DEVARS and C. GASTAUD, « Vision System dedicated to Panoramic Scene Reconstruction ». *Journal of Electronic imaging* 7(3), 672-676 (July 1998).
- [MARTINS] H. A. MARTINS, J. R. BIRK and R. B. KELLEY, « Camera models based on data from two calibration planes », *Artificial Intelligence*, 17:173-180, 1981.
- [MENSI] News de MENSI, « L'intérêt des studios d'effets spéciaux dans la technologie 3D de Mensi devient une réalité », Juillet/Août 1999, <http://www.mensi.com/french/news.html>.
- [MONGA] R. HORAUD et O. MONGA, « Vision par ordinateur », 2nd édition, édition Hermès.
- [OMNICAM] Projet Omnicam,
<http://www.cs.columbia.edu/CAVE/omnicam/prototypes.htm>
- [PEGARD] C. PEGARD et E. MOUADDIB « A mobile robot using a panoramic view ». In *Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pages 89-94, 1996.
- [PELEG] S. PELEG, M. BEN-EZRA and Y. PRITCH « Omnistereo: Panoramic stereo imaging ». In *Proc. of the IEEE Trans. PAMI* 23, pp. 279-290 2001.
- [PERI] V. N. PERI et S. K. NAYAR, « Generation of Perspective and Panoramic Video from Omnidirectional Video ». In *Proc. of DARPA Image Understanding Workshop*, New Orleans, May 1997.
- [ROMAIN] O. ROMAIN *et al.*, « A multispectral sensor dedicated to 3D spherical reconstruction ». In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Processing, ICIP'01*, Thessaloniki, Greece, October 2001.
- [ROMAIN2] O. ROMAIN, « Un capteur d'images omnidirectionnelles multi-spectrales : conception, auto-calibrage et exploitation », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2001.
- [SMADJA] L. SMADJA, R. BENOSMAN et J. DEVARS, « Cylindrical sensor calibration using lines ». In *Proc. of the IEEE ICIP*, October 24-27, Singapor.
- [SARACHIK] K.B SARACHIK, « Characterizing an indoor environment with mobile robot and uncalibrated stereo ». In *Proc of IEEE ICRA*, 2 :984 989, 1989.
- [SEO] Y. SEO and K. S. HONG, « Auto-Calibration of a Rotating and Zooming Camera ». In *Proc. of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, MVA'98*, Nov 17-19, Makuhari, Chiba, Japan, 1998.
- [SHUM] H. SHUM and R. SZELISKI, « Stereo reconstruction from multi-perspective panoramas ». In *Proc. of Seventh International Conference on Computer Vision [2]*, pages 14-21.
- [SKORDAS] T. SKORDAS, « Derniers progrès en autocalibrage de caméras ccd », *Traitement du signal*, 12(1):31-52, 1995.
- [STEIN] G. P. STEIN, « Accurate Internal Camera Calibration Using Rotation, with Analysis of Sources of Error ». In *Proc. of the 5th ICCV*, Cambridge, MA, USA, pp. 230-236, 1995.
- [YAGI] Y. YAGI, S. KAWATO et S. TSUJI, « Real-Time omnidirectional image sensor (copis) for vision-guided navigation ». In *Proc. of the IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.10(1), Avril 1990.



Olivier **Romain**

Olivier Romain, est un ancien élève de l'École Normale de Cachan (agrégé en électronique en 1998) et de l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg (ingénieur en 1997). En 2001 il obtient son doctorat en électronique de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC). Depuis 2002, il est Maître de Conférences au Laboratoire es Instruments et Systèmes d'Ile-de-France (LISIF – UPMC) ou il effectue ses recherches dans les domaines des systèmes électronique embarqués, la vision, du biomédical, des objets communicants et des SoC.



Thomas **Ea**

Thomas Ea est titulaire d'un doctorat en électronique de l'Université Pierre et Marie Curie. Depuis 2001, il est enseignant-chercheur à l'Institut Supérieur d'Electronique de Paris (ISEP). Ses thèmes de recherche concernent la conception des SoC et SoPC pour les systèmes embarqués, les techniques de minimisations de la consommation, les capteurs intégrés en technologies CMOS ainsi que les techniques d'identification biométrique.



Patrick **Garda**

Patrick Garda est un ancien élève de l'École Normale Supérieure de Cachan (agrégé en Mathématique en 1978). Il obtient son doctorat en électronique en 1984 de l'université Paris 11. En 1985, il rejoint l'Institut Fondamental d'Électronique comme chercheur ou il mène des recherches sur les rétines artificiels, l'implémentation analogique de réseaux de neurones et les architectures parallèles. En 1996, il devient Professeur à Paris 6. Actuellement, il est le responsable du groupe de recherche SYEL (Systèmes Électroniques) du LISIF. Ses recherches actuelles portent sur les SoC et les systèmes Multimédias.



Claude **Gastaud**

Claude Gastaud, est un ancien élève de l'Université Pierre et Marie Curie. À l'issue d'une thèse d'état de l'Université Pierre et Marie Curie il devient Professeur en électronique. Actuellement à la retraite, il a mené ses recherches, au sein du groupe SYEL du LISIF, dans les domaines de la conception électronique de systèmes de vision panoramique et la sécurité passive intelligente en collaboration avec l'équipementier FAURECIA.