

Stéréovision axiale par zoom : une approche par calibrage implicite

Implicit Reconstruction by Zooming

par C. DELHERM, J.M. LAVEST, B. PEUCHOT, N. DAUCHER

Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique, et d'Automatique (LASMEA)
URA 1793 du CNRS, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand
63177 Aubière cedex, France
delherm@le-eva.univ-bpclermont.fr

Résumé

Cet article présente une nouvelle méthode permettant d'inférer des informations tridimensionnelles à l'aide d'une caméra statique munie d'un zoom. L'algorithme de modélisation ne nécessite aucun modèle explicite de calibrage et met en œuvre plusieurs images de grilles régulières et précises formant un espace métrique particulier. Une transformation locale permet d'établir une relation entre l'image distordue d'une grille détectée sur la matrice CCD et une grille réelle située devant la caméra. Cette relation prend automatiquement en compte les phénomènes de distorsion optique et permet d'obtenir des résultats de reconstruction bien meilleurs que ceux obtenus jusqu'à présent en reconstruction axiale par zoom. De plus, la méthode présentée permet de calibrer l'objectif sur une gamme importante de distances focales sans changer d'objet de calibrage. Une expérimentation complète sur des données réelles est présentée et montre qu'il est possible de reconstruire des objets 3D à partir d'une séquence d'images de zoom même si ces données sont proches de l'axe optique.

Mots clés : Stéréovision Axiale, Zoom, Calibrage Implicite.

Abstract

This paper presents a new method to infer 3D information using a static camera equipped with a zoom-lens. The modelling algorithm does not require any explicit calibration model and the computations involved are straightforward. This approach uses several images of accurate regular grids placed on a micrometric table, as calibration process. The basic idea is to compute a local transformation that allows to establish a relationship between a distorted grid detected on the CCD matrix and the real one located in front of the camera. This relationship takes automatically into account all distortion phenomena and allows to obtain reconstruction results much more accurate than previous works in the same field. A complete experiment on real data is provided and shows that it is possible to compute 3D information from a zooming image set even if data are close to the optical axis.

Key words : Axial Stereovision, Zoom-lens, Implicit Calibration.

1. Introduction

L'utilisation d'un zoom en Vision pour la robotique est une idée prometteuse. De plus en plus d'applications incluent un tel système de vision et de nombreux chercheurs s'intéressent aux propriétés du zoom en vision par ordinateur [MO90], [CAK90], [TTG92], [LL95]. Le zoom est en général utilisé pour obtenir des détails d'une scène globale, mais récemment [LRD93], [LRD95], [RA94] ont montré qu'il est également possible d'inférer des informations 3D à partir d'une caméra statique.

Dans les travaux précédents, seule une étape minutieuse de calibrage permet d'obtenir des résultats de reconstruction corrects. Ce calibrage estime les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra ainsi que les paramètres d'un modèle représentant les phénomènes de distorsion optique ou électronique. De plus, l'axe optique doit être considéré stable durant la séquence d'images et une telle supposition n'est vraie que si le zoom est de

très bonne qualité. Dans cet article nous proposons de résoudre le problème de reconstruction par zoom dans le cas d'un zoom standard, par une technique de calibrage basée sur l'utilisation de grilles précises et régulières placées sur une table micrométrique. Cette méthode de calibration appelée "Two grids calibration" a été étudiée pour la première fois par [MBK81].

Afin de bien comprendre l'approche retenue, nous présenterons les principales étapes de la méthode de calibrage, ainsi que ses avantages. Nous décrirons ensuite la technique de reconstruction par zoom utilisant deux grilles de calibrage pour chaque distance focale du zoom. Nous montrerons que chaque donnée détectée dans une image conduit à un rayon optique 3D défini dans l'espace métrique des grilles. L'algorithme de reconstruction ne présente alors plus de difficultés et se résume à la résolution d'un système linéaire.

La précision des résultats de reconstruction par zoom présentés dans cet article, et issus de données réelles, est sans commune

mesure avec les résultats obtenus jusqu'à présent. Une étude complète et détaillée d'un objet de référence montre qu'il est possible d'inférer des informations 3D même si les données sont proches de l'axe optique.

Le principal avantage du processus de reconstruction décrit dans cet article est de prendre en compte les phénomènes de distorsion (optiques et électroniques). Cette approche de reconstruction dans un espace métrique particulier est présentée dans le cadre de la stéréovision axiale mais pourrait tout aussi bien être transposée dans le cadre de la reconstruction par stéréovision classique.

2. Rappels sur les propriétés d'un zoom

Un objectif à focale variable est composé d'une succession de dioptries et il est nécessaire de prendre quelques précautions en utilisant le modèle sténopé avec un système optique aussi complexe. [LRD93] a montré qu'il est possible d'utiliser le modèle sténopé si, et seulement si, la distance entre l'objet et le plan image n'est pas considérée comme fixe. Afin de bien comprendre les phénomènes optiques qui interviennent, il est nécessaire de se référer à un modèle optique épais.

Un modèle optique épais est composé de deux plans principaux : le plan principal objet H_o et le plan principal image H_i (Figure 1). Etant donné que tout rayon optique défini entre ces deux plans est parallèle à l'axe optique, l'approximation sténopé est obtenue par fusion des plans ($H_o H_i$).

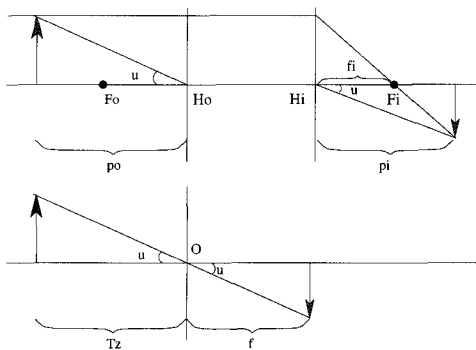


Figure 1. – Modèle optique épais.

Cependant, l'effet de zoom modifie la position relative des deux plans principaux. Une étude complète dans [LRD93] montre que le plan principal objet (H_{o1}, H_{o2}) se déplace de façon importante dans la direction opposée au plan principal image (H_{i1}, H_{i2}). Nous avons représenté (Figure 2 a-b) deux modèles épais respectivement pour les positions minimale et maximale de la focale. Les paramètres (E, S) représentent les lentilles d'entrée et de sortie du zoom, A_o, A_i sont respectivement les plans objet et image. Les approximations sténopé correspondantes

sont représentées (Figure 2 c-d) par fusion des plans ($H_{o1} H_{i1}$) et ($H_{o2} H_{i2}$).

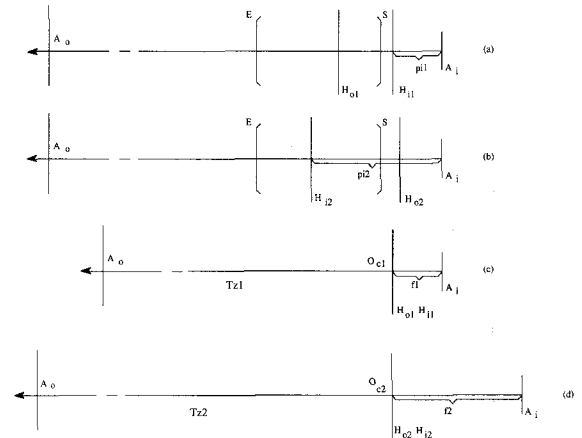


Figure 2. – L'effet de Zoom.

Les principales conséquences de l'effet de zoom sont les suivantes :

- il n'est pas possible de considérer la distance entre l'objet et le plan image comme un paramètre fixe (Figure 2 c-d).
- le déplacement virtuel du centre optique le long de l'axe optique (T_{z1}, T_{z2}) est suffisant pour permettre de reconstruire des primitives 3D avec un système de triangulation axiale. Dans [LRD93], cette translation virtuelle était d'environ 500 mm; les résultats présentés dans cet article font état d'un déplacement d'environ 1200 mm.

La (Figure 3) montre un exemple classique de triangulation par zoom permettant de reconstruire un segment 3D. Chaque point O_C^i représente la translation virtuelle du centre optique le long de l'axe optique, déterminée durant la phase de calibrage classique pour trois distances focales différentes.

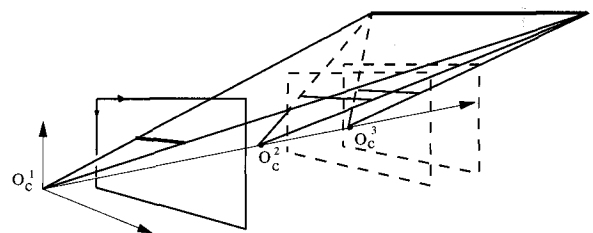


Figure 3. – Triangulation axiale.

Bien entendu, la triangulation s'effectue avec des angles faibles entre les plans; ceci implique la réalisation d'une détection des segments dans chaque image ainsi qu'une calibration très précises. Des expériences antérieures ont montré que la reconstruction n'est possible que dans le cas où la distorsion radiale est prise en compte. Dans [LRD93] [LRD95], un zoom professionnel est utilisé et la distorsion radiale est estimée à partir de tables théoriques fournies par le constructeur. Plusieurs auteurs

[BMB94], [RDDDL94] se sont récemment intéressés à l'estimation de cette distorsion. [RDDDL94] a notamment montré qu'il est possible d'estimer cette distorsion de façon très précise par des techniques mettant en jeu des B-Splines.

3. Etat de l'art

Peu d'articles traitent, dans la littérature, de la reconstruction par zoom. D'un point de vue général, des chercheurs tels que [TTG92], [Li94], [EVF95] ont étudié les problèmes de calibrage relatifs à ce genre d'objectif pour des applications en Vision Dynamique. [MO90] ont proposé une approche de reconstruction par zoom à partir de l'analyse du flou optique; notons également les travaux de [CAK90] sur l'analyse des systèmes de triangulation axiale. [WS93] a également présenté d'intéressants résultats sur le calibrage d'une caméra équipée d'un zoom.

Les travaux présentés dans [LRD93] et [LRD95] ont posé le problème de la reconstruction par zoom en des termes nouveaux, s'appuyant sur les propriétés optiques de ce type d'objectif. Ils ont montré par des exemples concrets et mesurables de reconstruction, qu'il était possible d'inférer des informations 3D par zoom.

A la lumière des premiers résultats, l'utilisation d'un zoom en Vision par Ordinateur pour la reconstruction de scènes 3D, nécessite l'amélioration de la précision de modélisation. De plus, il serait intéressant de généraliser la méthode de reconstruction à un zoom de qualité standard (moins onéreux que celui utilisé dans [LRD95]). [RA94] s'est intéressé à l'étude d'un tel système. Par une méthode de "rectification", il applique des corrections à chaque couple de distances focales afin de rendre le système axial. Si la méthode paraît séduisante, elle s'avère complexe à mettre en oeuvre dès lors que l'on souhaite traiter une séquence d'images prises à de multiples distances focales. Notons qu'aucun résultat probant et quantifiable de reconstruction n'a, jusqu'à présent, été présenté par cette méthode.

4. Calibrage implicite dans un espace métrique de grilles

4.1. RAPPELS

Considérons une grille réelle parfaite située devant la caméra. L'image de cette grille sur la matrice CCD est distordue (Figure 4); cette distorsion peut provenir de phénomènes optiques voire électroniques. Un calibrage classique, non linéaire, essaie de prendre en considération ces phénomènes dans un modèle mathématique de projection perspective, mais des erreurs subsistent entre le modèle mathématique manipulé et le contenu de l'image. Supposons qu'il existe une transformation τ , qui à tout point de la

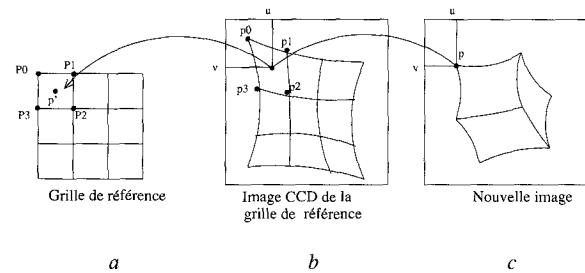


Figure 4. – Principe du calibrage par "Deux Grilles" : Approximation Locale.

grille distordue fasse correspondre le point sur la grille de calibrage. Les phénomènes de distorsion seront ainsi automatiquement pris en compte. De cette façon, toute nouvelle image distordue peut être transformée dans la grille de référence, supposée aussi parfaite que possible.

Ce processus de calibrage appelé 'Two Grids Calibration' n'est pas nouveau; [MBK81] a introduit le concept il y a quelques années et [GTK88], [WM91], [Peu94] ont proposé depuis plusieurs méthodes de résolution. Deux approches se distinguent :

- la première est basée sur une transformation globale entre les points de l'image distordue et les points de référence situés sur les grilles de calibrage.
- la seconde consiste à déterminer une approximation locale qui à tout point image fait correspondre un point dans chaque grille de calibrage.

D'un point de vue temps de calcul et stockage en mémoire, les approximations globales sont économiques, mais les erreurs sont moyennées sur tous les points. Evidemment, les interpolations locales fournissent de bien meilleurs résultats. Dans le modèle local décrit par les différents auteurs, les trois points de calibrage les plus proches de chaque point d'intérêt détecté dans l'image sont recherchés; une fonction d'interpolation est ensuite utilisée sur chaque région locale. Les différences entre les résultats présentés dans la littérature dépendent :

- des fonctions locales utilisées pour déterminer la relation entre l'image de la grille distordue et la grille de référence,
- mais également de la manière dont les points de référence sont détectés sur la matrice CCD.

Comme nous venons de le préciser, une des difficultés majeures est de déterminer précisément les positions des points de calibrage (p_0, p_1, p_2, p_3 de la Figure 4) sur l'image de la grille distordue. [Peu94] a développé un algorithme original qui cherche directement dans l'image de luminance un modèle mathématique de la réponse photonique du point. Des travaux similaires ont été réalisés par [BMB94], [DG93] et [Bey92]. Ainsi, la localisation d'un point (intersection de deux droites de la grille) est obtenue avec une précision inférieure au centième de pixel [Peu94]. Le modèle mathématique utilisé est le suivant :

$$F(x, y) = a + bx + cy + d \exp(-f^2 x^2) + e \exp(-g^2 y^2)$$

Sur la Figure 5 nous avons représenté la réponse en niveau de gris de l'image (figure du haut) et le modèle mathématique calculé (figure du bas) correspondant au même point.

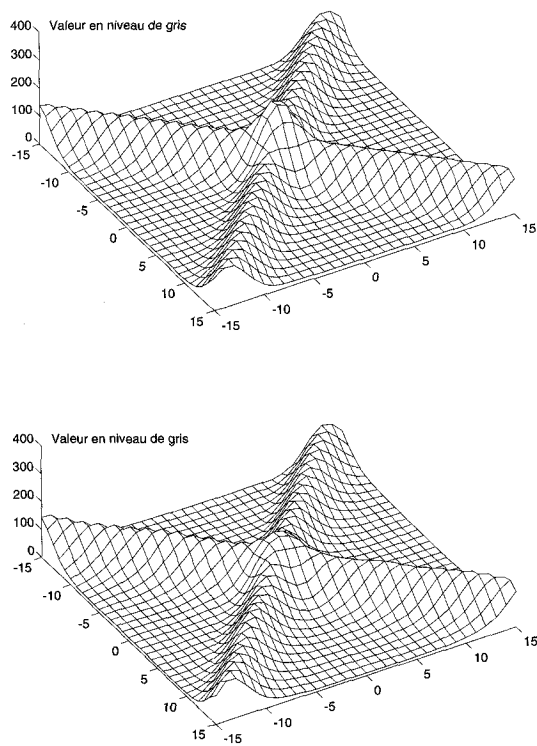


Figure 5. – Détection des points au sous-pixel.

4.2. INTERPOLATION PAR RAPPORT ANHARMONIQUE

Soit un point $p(u, v)$ (Figure 4) dans une nouvelle image distordue. Connaissant ses coordonnées (u, v) , il est possible de déterminer dans l'image distordue de la grille, ses 4 points voisins (p_0, p_1, p_2, p_3) . [Peu93] a proposé plusieurs modèles d'interpolation et a montré qu'une fonction bi-cubique conduit aux meilleurs résultats dans le cas d'images fortement distordues (images de rayons X), mais que pour des images prises avec une caméra standard, une approximation linéaire était suffisante. Nous avons testé trois méthodes d'interpolation : bi-linéaire, par bi-rapport et par une fonction bi-cubique. Dans tous les cas de figure (position de la focale et position de la grille de calibration), la méthode d'interpolation par une fonction bi-cubique est la plus précise et l'interpolation par une fonction bi-linéaire moins performante. Néanmoins les résultats ne sont pas fondamentalement différents d'une méthode à l'autre dans le cas de nos images faiblement distordues; le choix du bi-rapport nous semble donc être un bon compromis entre le temps de calcul et la précision obtenue.

Pour tester la précision de l'interpolation nous avons comparé les coordonnées du point p , calculées à partir de ses quatre voisins par une fonction d'interpolation donnée, à celles des points détectés par le modèle mathématique donné dans le paragraphe précédent. Cet essai nous permet donc d'estimer la précision de localisation d'un point image quelconque dans l'espace métrique des grilles.

Tableau 1. – Test d'interpolation

fonction d'interpolation	errX pixels	sigX pixels	errY pixels	sigY pixels
bi-linéaire	5.10E-3	3.50E-2	3.0E-3	3.40E-2
bi-rapport	3.20E-3	2.0E-2	1.60E-3	2.0E-2
bi-cubique	3.50E-4	1.10E-2	3.0E-4	1.0E-2

Dans les expérimentations suivantes, une fonction locale basée sur le rapport anharmonique [MM91] est utilisée pour interpoler les coordonnées d'un nouveau point p dans la base locale (p_0, p_1, p_2, p_3) .

Le rapport anharmonique \mathcal{R} de quatre points est donné par :

$$\mathcal{R}(a, b, c, d) = \frac{ab}{ac} \frac{db}{dc} = \frac{a'b'}{a'c'} \frac{d'b'}{d'c'} \quad (1)$$

Ce rapport est invariant par projection perspective.

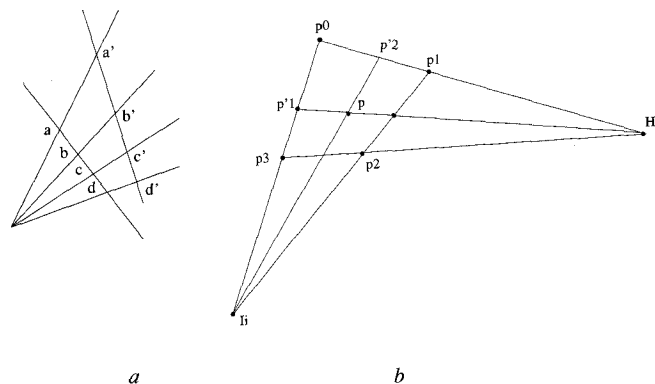


Figure 6. – Rapport anharmonique et coordonnées projectives.

Considérons quatre points (p_0, p_1, p_2, p_3) correspondant à une maille de la grille (Figure 6b). Etant donné un nouveau point p dans cette maille, il est possible de calculer deux points d'intersection (p'_1, p'_2) à l'aide des points à l'infini H_i et I_i définis à partir des points (p_0, p_1, p_2, p_3) . Les coordonnées projectives (μ, λ) associées à p sont données par :

$$\begin{aligned} \lambda &= \mathcal{R}(p_0, p'_1, p_3, I_i) \\ \mu &= \mathcal{R}(p_0, p_2, p_1, H_i) \end{aligned} \quad (2)$$

Si (P_0, P_1, P_2, P_3) correspondent dans la grille de référence à (p_0, p_1, p_2, p_3) , H et I étant les deux points à l'infini obtenus à

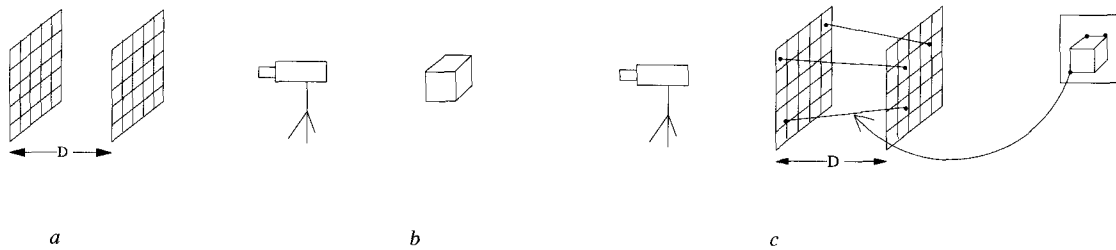


Figure 7. – Rayons optiques 3D dans l'espace métrique des grilles.

partir de (P_0, P_1, P_2, P_3) , les coordonnées de p' (correspondant à p) dans l'espace métrique des grilles sont données par :

$$\begin{cases} x = \frac{\lambda(P_0 P_3)(I P_0)}{(I P_3) - \lambda(P_0 P_3)} \\ y = \frac{\mu(P_0 P_1)(H P_0)}{(H P_1) - \mu(P_0 P_1)} \end{cases} \quad (3)$$

Les calculs sont effectués en coordonnées homogènes afin de gérer sans ambiguïté les points à l'infini. De cette façon la méthode se rapproche de celle proposée par [Har89] où aucun des points mis en jeu dans le calcul du bi-rapport n'est renvoyé à l'infini. Nous pouvons remarquer qu'une telle transformation (approximation locale) est précise mais très coûteuse en temps de calcul. Elle suppose d'avoir stocké au préalable toutes les coordonnées des points des grilles lors de l'étape de calibrage et de déterminer, pour chaque nouveau point d'intérêt, sa base locale d'interpolation.

Soient deux grilles parallèles. D'après la Figure 7, les positions dans l'espace des grilles sont parfaitement connues. Une table micrométrique est utilisée durant la phase de calibrage et un contrôle mécanique permet de positionner correctement les grilles. Les deux grilles doivent être parfaitement parallèles entre elles mais pas nécessairement parallèles au plan image. Les schémas ci-dessus nous permettent de comprendre l'idée de base du processus de calibrage.

Considérons l'image d'un objet prise par la caméra : (7b), il est possible de déterminer pour chaque point image, par une interpolation locale, ses points correspondants dans la première et la seconde grille. Nous pouvons ainsi estimer le rayon optique 3D du point image considéré, dans l'espace métrique défini par les grilles de référence, sans connaître les paramètres de la caméra. Bien entendu, il est possible d'utiliser plus de deux grilles pour estimer le rayon optique; les calculs seront plus précis mais le temps de calcul ainsi que le stockage en mémoire seront considérablement augmentés.

La méthode présentée ici permet donc de calibrer sur une large gamme de distances focales sans changer d'objet de calibrage en cours de séquence. De plus, elle ne nécessite aucun traitement préalable du système et peut tout aussi bien être utilisée avec un zoom de qualité standard.

5. Processus de reconstruction

D'après les considérations précédentes, l'algorithme de modélisation est très simple. Pour chaque distance focale utilisée durant la séquence de prise de vue avec le zoom, deux grilles de calibrage sont préalablement digitalisées et les coordonnées de la projection de chaque point d'intersection sont mémorisées. Cette étape constitue le processus de calibrage. La stabilité de l'axe optique et l'ensemble des phénomènes de distorsion sont automatiquement pris en compte dès lors que le problème est transposé dans l'espace métrique des grilles.

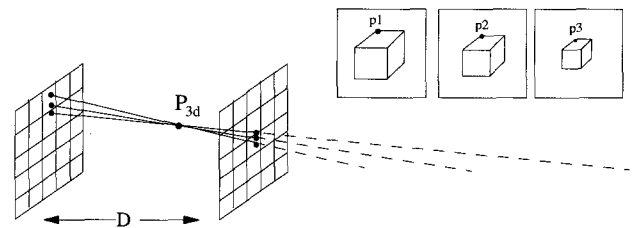


Figure 8. – Processus de modélisation.

Soient p^i , les projections dans une séquence d'images d'un point 3D P_{3d} (Figure 8), (i représente l'indice de la focale utilisée pendant les prises de vue), il est possible d'estimer les rayons 3D relatifs à chaque image et exprimés dans l'espace métrique des grilles.

Soient (P_1^i, P_2^i) les points interpolés de p^i relativement à la i ème image et respectivement définis dans la première et la seconde grille.

Soit \vec{V}_i le vecteur reliant les points (P_1^i, P_2^i) :

$$\vec{V}_i = \begin{pmatrix} P_2^i.x - P_1^i.x \\ P_2^i.y - P_1^i.y \\ P_2^i.z - P_1^i.z \end{pmatrix}$$

Soient \mathcal{P}_H le plan quasi horizontal et \mathcal{P}_V le plan quasi vertical qui contiennent \vec{V}_i (voir figure 9).

Les expressions des deux plans sont calculées de la façon suivante :

$$\begin{cases} A_1^i x + B_1^i y + C_1^i z + D_1^i = 0 \\ A_2^i x + B_2^i y + C_2^i z + D_2^i = 0 \end{cases}$$

où

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} A_1^i \\ B_1^i \\ C_1^i \end{pmatrix} = \vec{V}_i \wedge \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{N}_1^i \\ \begin{pmatrix} A_2^i \\ B_2^i \\ C_2^i \end{pmatrix} = \vec{V}_i \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{N}_2^i \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} D_1^i = -\frac{\vec{N}_1^i \cdot \vec{P}_1^i}{\|\vec{N}_1^i\|} \\ D_2^i = -\frac{\vec{N}_2^i \cdot \vec{P}_1^i}{\|\vec{N}_2^i\|} \end{cases}$$

Les coordonnées 3D du point observé $P(x, y, z)$ correspondent à l'intersection des rayons optiques 3D (Figure 8) et sont calculées ainsi :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 A_j^i x + B_j^i y + C_j^i z = -D_j^i \quad i = 1..n, \quad j = 1..2$$

Ce qui est équivalent au système linéaire : $MX = W$
résolu au sens des moindres carrés par : $M^t MX = M^t W$

Notons que cet algorithme peut tout aussi bien être utilisé en stéréovision classique.

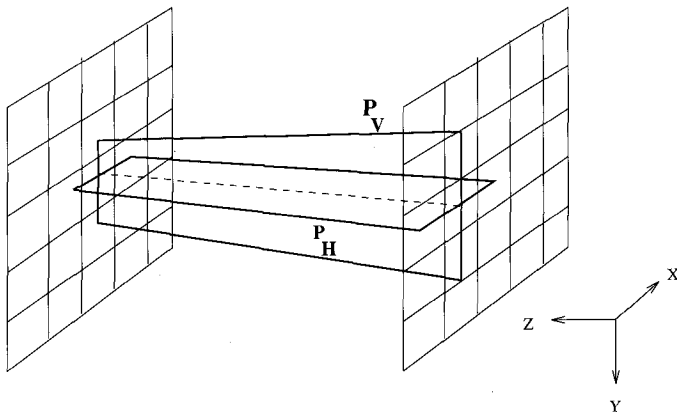


Figure 9. – Plans de contraintes.

6. Expérimentations

Dans cette partie, nous présentons des expériences réalisées à partir d'images réelles. Afin de comparer les résultats de reconstruction, nous avons dans un premier temps, choisi de reconstruire une grille avec quatorze images prises à des focales différentes. Des résultats préliminaires, également obtenus à partir d'une séquence d'images de grille, sont présentés dans [LPDD94]. Cette expérience a été précédemment tentée avec l'algorithme proposé par [LRD93]. Mais les résultats ne furent pas probants. Les droites reconstruites n'appartenaient pas à un même plan; de

plus les erreurs augmentaient considérablement lorsque les points se rapprochaient de l'axe optique.

Pour ces expérimentations l'appariement des points est géré manuellement en utilisant une détection au sous-pixel des croix de la grille. Le problème principal sur lequel nous travaillons actuellement, est la mise en correspondance automatique entre les différentes images, d'une même primitive. Notre approche s'oriente vers l'utilisation d'une méthode de corrélation surfacique dans les images de luminance. La méthode d'appariement à partir de la corrélation surfacique doit prochainement faire l'objet d'une publication. Toutefois, nous sommes en mesure de dire que les résultats sont très encourageants. De façon schématique, l'algorithme se déroule en deux étapes. Tout d'abord une corrélation multi-échelle estime, pour chaque point d'intérêt, les localisations, au pixel près des points d'appariement sur l'ensemble de la séquence. Ensuite, un algorithme itératif de corrélation surfacique permet de localiser les points au sous-pixel. Les phénomènes de grossissement du zoom sont explicitement pris en compte dans les paramètres de la corrélation, pour une comparaison précise des informations de luminance au voisinage de deux points appariés.

Etant donné que l'objet à reconstruire est parfaitement connu, il sera possible d'effectuer une étude statistique sur les erreurs de reconstruction selon les coordonnées X, Y et Z . Le but de cette expérience est de démontrer la validité des résultats sur toute la surface de l'image. Pour cela, l'image est partagée en couronnes et les erreurs de reconstruction sont présentées en fonction de ces couronnes.

Dans une seconde partie, nous présentons une nouvelle série de mesure sur une grille différente de la précédente; la gamme de focale ainsi que les positions des grilles de calibrage diffèrent également de l'expérience décrite ci-dessus. Cette nouvelle expérimentation nous permet de prouver la répétabilité de la méthode mais aussi de présenter des résultats de reconstruction en fonction du nombre de grilles utilisées, de leur position respective et du nombre d'images de la séquence.

6.1. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

La Figure 10 montre quelques images de la grille à reconstruire lors de la première expérience présentée. La dimension d'un maillon est de 4.5×4.5 mm. Pour la seconde expérience, la grille possède un maillage plus gros (6.2 mm).

Ces images constituent une séquence de données indépendantes de celles du calibrage, la grille à reconstruire étant située à un emplacement différent. Un système mécanique sur l'objectif permet de retrouver précisément les positions des différentes distances focales utilisées pour les étapes de calibrage puis de reconstruction.

Quatorze images constituent la séquence de données de la première série et seize images pour la seconde.

Le zoom utilisé est de type Angénieux $T14 \times 9$; la gamme de focales s'étend de 9 à 124 mm.

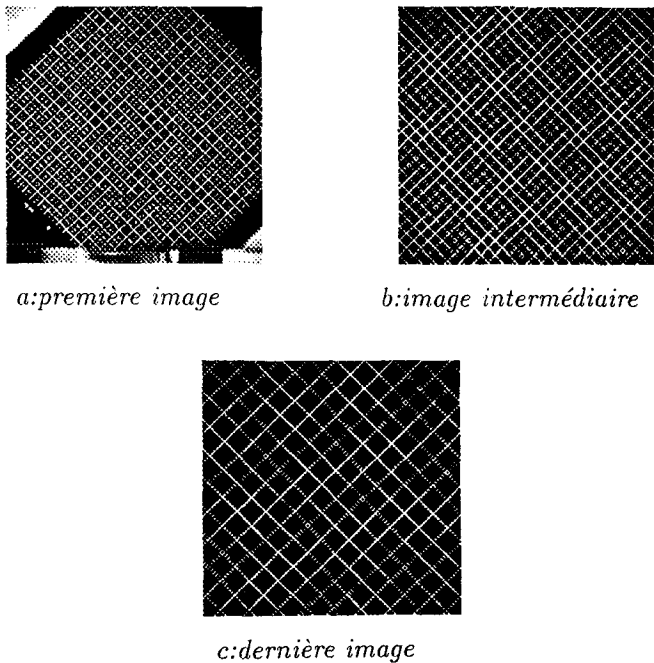


Figure 10. – Quelques images de la séquence.

- *Calibrage*. En ce qui concerne la première expérience, pour chaque distance focale, deux grilles ont été préalablement digitalisées pour réaliser l'espace métrique. Les grilles sont distantes de 0,12 mètres; elles sont prétraitées et chaque point d'intersection est stocké en mémoire. Pour la seconde expérience, six grilles régulièrement espacées (tous les trois centimètres) sont prétraitées.
- *Reconstruction*. Pour la première série, la grille à reconstruire est située approximativement à un mètre devant la caméra et entre les deux grilles de référence. Chacune des grilles de la seconde série pourra faire office soit de grille de calibrage, soit de grille à reconstruire.

6.2. RÉSULTATS DE LA PREMIÈRE SÉRIE DE MESURES

6.2.1. Résultats de reconstruction

Le processus de reconstruction est appliqué sur chaque croix (intersection de deux droites) détectées dans l'image de grille. Les appariements entre les différentes images sont réalisés *manuellement*. Le but de l'expérience décrite est de tester la *précision* de la triangulation, contrainte dans l'espace métrique des grilles.

Il est évident que, plus nous disposerons de points pour la triangulation, plus les résultats de modélisation seront précis. Dans l'expérience présentée ici, un point P sera reconstruit si, et seulement si, il apparaît dans cinq images au moins; ceci

signifie que les coordonnées du point 3D correspondent à la meilleure intersection, au sens des moindres carrés, d'au moins cinq rayons optiques 3D définis dans l'espace métrique des grilles de référence. C'est la raison pour laquelle les points situés en bordure de l'image, qui disparaissent très rapidement par effet de zoom, ne seront pas pris en compte pour la reconstruction.

Chaque point reconstruit P_i est représenté par une croix (11a); la grille reconstruite est présentée dans trois positions spatiales différentes (11a,b,c). Comme nous pouvons le constater, les points reconstruits appartiennent à un même plan; de plus, même les points proches de l'axe optique conduisent à des résultats précis.

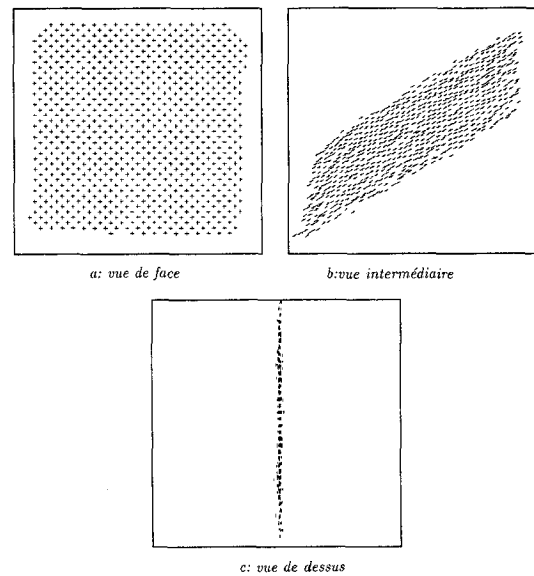


Figure 11. – Reconstruction à partir des données réelles.

A notre connaissance, c'est la première fois qu'une telle précision de reconstruction par zoom est obtenue. Ces résultats laissent espérer que dans un proche avenir, il sera possible d'effectuer des reconstructions denses d'objets en utilisant un zoom. Nous donnerons de plus amples informations à ce sujet dans la dernière partie de cet article.

6.2.2. Localisation de l'axe optique dans l'espace métrique des grilles

Même si la connaissance de l'axe optique et des différentes positions des centres optiques au cours de la séquence de zoom n'est pas nécessaire pour la mise en œuvre de la méthode de reconstruction, il peut être intéressant de déterminer ces informations dans l'espace des grilles. Elles nous permettront de présenter les erreurs de reconstruction en fonction de la distance entre les points reconstruits et l'axe optique.

Chaque point d'une image (Figure 12) peut définir un rayon optique 3D entre les deux grilles de référence. Comme tous les

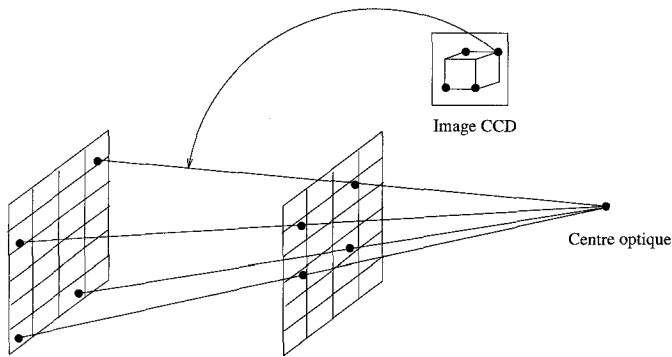


Figure 12. – Localisation du centre optique.

rayons provenant de la même image convergent vers le centre optique correspondant, il est possible de déterminer la position de ces centres optiques dans l'espace des grilles pour toutes les distances focales considérées.

Le tableau suivant présente les différentes positions des centres optiques (définis dans l'espace des grilles) pour les quatorze focales considérées dans nos expériences.

Tableau 2. – Localisation du centre optique

position de la focale	coordonnée X μm	coordonnée Y μm	coordonnée Z mm	R_x μm	R_y μm
1	426.82	-1713.46	-952.86	-14.02	-48.69
2	300.26	-1735.28	-974.76	26.12	-41.28
3	204.40	-1788.36	-998.47	28.42	-3.80
4	110.07	-1823.87	-1027.63	7.69	12.52
5	17.15	-1843.97	-1060.98	-30.98	10.67
6	-148.52	-1842.78	-1097.03	-7.57	-14.24
7	-343.80	-1917.37	-1144.66	-0.23	29.00
8	-546.28	-1963.03	-1199.49	-14.11	38.58
9	-834.82	-2020.46	-1271.05	-7.94	48.92
10	-1494.54	-2118.10	-1415.00	83.77	51.82
11	-2889.11	-2358.18	-1809.60	-78.72	32.23
12	-3432.42	-2435.66	-1934.14	-26.84	27.75
13	-3974.38	-2470.27	-2068.23	-13.99	-25.88
14	-4636.28	-2530.88	-2216.64	62.29	-62.94

L'équation de l'axe optique, dans le repère des grilles, est déterminée à partir des coordonnées (X, Y, Z) et exprimée sous forme d'équations paramétriques par :

$$\begin{cases} X = 3.9459 * Z + 4172.71 \\ Y = 0.6581 * Z - 1135.09 \end{cases} \quad (4)$$

Les valeurs R_x, R_y donnent la distance en (μm) entre les centres optiques et la droite 3D. Nous pouvons noter que tous les centres optiques sont bien localisés sur une droite définissant l'axe optique.

On peut également souligner que le déplacement virtuel des différents centres optiques le long de l'axe optique est d'environ 1265mm. En effet, cette technique de calibrage par zoom offre la

possibilité de calibrer de grandes plages de distances focales, sans avoir besoin de changer de mire. Il est donc possible d'obtenir des déplacements virtuels du centre optique consécutifs.

6.2.3. Erreurs de reconstruction

Afin d'estimer la précision de la modélisation, nous avons effectué une étude statistique sur les erreurs entre les points de la grille P_{mes} et les points reconstruits P_{rct} .

Soient (E_x, E_y, E_z) les erreurs 3D définies de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} E_x = X_{mes} - X_{rct} \\ E_y = Y_{mes} - Y_{rct} \\ E_z = Z_{mes} - Z_{rct} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Pour obtenir une description précise des erreurs de reconstruction, nous avons divisé la grille reconstruite en plusieurs couronnes ($i = 0..8$); la distance entre les couronnes est égale à 10 mm (voir figure 13). Le premier anneau ($i = 0$) est centré sur l'intersection de l'axe optique et de l'objet modélisé. Cette division permet de donner les résultats en fonction de la distance des points à l'axe optique; il paraît logique de procéder ainsi étant donné qu'en stéréovision axiale, la précision de reconstruction dépend de cette distance à l'axe optique.

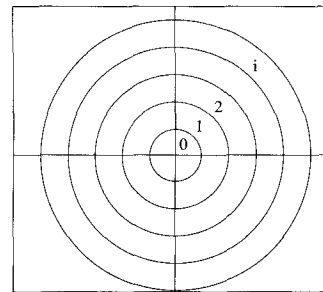


Figure 13. – Etude statistique sur les différentes couronnes.

Les tableaux ci-dessous donnent les erreurs en fonction des coordonnées x, y et z . Les résultats sont exprimés en millimètres.

Tableau 3. – Erreurs ($X_{mes} - X_{rct}$) en millimètres

i	nb point	$\overline{E_x}$	σ_x	Max_x
0	5	-1.147E-3	2.181E-3	5.286E-3
1	32	-5.589E-4	3.047E-3	9.886E-3
2	72	-1.595E-3	3.468E-3	1.309E-2
3	112	-3.057E-3	7.121E-3	3.398E-2
4	136	-6.725E-4	1.129E-2	4.082E-2
5	188	-5.678E-3	2.046E-2	1.047E-1
6	150	-4.256E-3	3.008E-2	9.548E-2
7	62	-1.366E-4	3.401E-2	1.443E-1
8	13	1.862E-5	4.772E-2	1.092E-1

Tableau 4. – E_y erreurs ($Y_{mes} - Y_{rct}$) en millimètres

i	nb point	\overline{E}_y	σ_y	Max_y
0	5	-1.134E-3	2.655E-3	4.124E-3
1	32	-2.305E-3	1.932E-3	6.259E-3
2	72	-1.260E-3	4.056E-3	1.378E-2
3	112	-1.125E-3	6.321E-3	2.064E-2
4	136	-1.653E-3	1.009E-2	3.740E-2
5	188	1.882E-4	2.124E-2	1.117E-1
6	150	-2.120E-3	2.475E-2	6.696E-2
7	62	-1.899E-3	3.509E-2	1.291E-1
8	13	1.186E-2	2.555E-2	7.348E-2

- le paramètre i indique l'indice de la couronne à laquelle appartiennent les points considérés. (la ligne correspondant à $i = 0$ donne l'étude statistique de tous les points reconstruits dont la distance à l'axe optique est inférieure à 10 mm).
- le paramètre 'nb point' donne le nombre de points reconstruits dans la i ème couronne.
- Les paramètres $\overline{E}_x, \overline{E}_y, \overline{E}_z$ représentent les erreurs moyennes par rapport aux coordonnées (x, y, z) .
- Les paramètres σ_x, σ_y et σ_z sont les écarts-types correspondants.
- Max_x, Max_y et Max_z correspondent aux erreurs maximales des 'nb point' testés.

Nous pouvons constater que les erreurs pour les coordonnées x et y sont homogènes et très faibles. Les écarts-types σ_x et σ_y correspondant, sont inférieurs à 0.04 mm. Ces deux coordonnées sont en fait les plus contraintes dans le système de triangulation.

Le dernier tableau décrit les erreurs de reconstruction selon la coordonnée z . Les erreurs sont ici bien plus importantes que les précédentes, mais si nous omettons la première ligne du tableau, les résultats font état d'une erreur de reconstruction inférieure à 1 mm pour un objet situé à un mètre de la caméra. Les plus fortes erreurs de reconstruction apparaissent pour les points les plus proches de l'axe optique mais restent toutefois proches de 1 mm.

Tableau 5. – E_z erreurs ($Z_{mes} - Z_{rct}$) en millimètres

i	nb point	\overline{E}_z	σ_z	Max_z
0	5	5.576E-1	1.079E0	2.631E0
1	32	1.151E-1	4.492E-1	1.229E0
2	72	-2.047E-2	3.349E-1	1.012E0
3	112	2.823E-2	3.894E-1	1.285E0
4	136	-2.205E-2	4.585E-1	1.280E0
5	188	-1.831E-1	6.461E-1	3.200E0
6	150	-1.407E-1	7.394E-1	3.027E0
7	62	-7.031E-2	8.045E-1	2.365E0
8	13	1.139E-1	8.071E-1	1.657E0

Une analyse plus détaillée du tableau 4 montre que les reconstructions les plus précises sont obtenues pour les points situés dans les couronnes 2 et 3 (voir tableau 5). Ces résultats ne sont pas en accord avec les analyses classiques de précision de stéréovision

axiale [CAK90], pour lesquelles on montre généralement que plus un point est éloigné de l'axe optique, meilleure est la reconstruction.

6.2.4. Analyse des angles de triangulation

Afin de bien comprendre le phénomène, nous avons analysé les angles de triangulation pour chaque point reconstruit. Comme un point 3D est défini par l'intersection d'un ensemble de rayons optiques 3D (dans l'espace métrique des grilles), il est possible de déterminer les angles minimum et maximum entre ces rayons.

Le tableau ci-dessous (6) donne les résultats de l'étude statistique effectuée sur les angles de triangulation relatifs à tous les points reconstruits. Les résultats sont exprimés en degrés.

- \overline{T}_a représente l'angle de triangulation moyen de tous les 'nb point' appartenant à la i ème couronne,
- σT_a est l'écart-type correspondant à \overline{T}_a ,
- Max_{T_a}, Min_{T_a} sont respectivement les angles minimum et maximum intervenant pour les points considérés.

Tableau 6. – Angles de Triangulation (en degrés)

i	nb point	\overline{T}_a	σT_a	Max_{T_a}	Min_{T_a}
0	5	1.624E-1	6.292E-2	2.473E-1	7.750E-2
1	32	3.229E-1	1.206E-1	5.276E-1	4.891E-2
2	72	4.913E-1	8.200E-2	7.052E-1	2.913E-1
3	112	5.098E-1	8.719E-2	7.217E-1	3.566E-1
4	136	4.840E-1	7.301E-2	7.593E-1	3.700E-1
5	188	4.450E-1	9.224E-2	7.095E-1	2.730E-1
6	150	4.041E-1	8.653E-2	6.002E-1	2.822E-1
7	62	4.153E-1	6.120E-2	5.673E-1	3.203E-1
8	13	4.168E-1	3.905E-2	5.032E-1	3.788E-1

Comme nous l'avons noté, les meilleurs résultats sont obtenus pour les points appartenant aux couronnes 2 et 3; l'angle moyen de triangulation est d'environ 0.5 degrés. Nous avons représenté sur la Figure (14) les angles de triangulation en fonction de i (donc en fonction de la distance des points à l'axe optique). Ceci montre une relative homogénéité des angles sur toute la surface de l'image.

En fait, l'effet de zoom est équivalent à un système de stéréovision axiale particulier, dès lors que l'on s'intéresse à l'analyse d'une séquence d'images couvrant une large gamme de distances

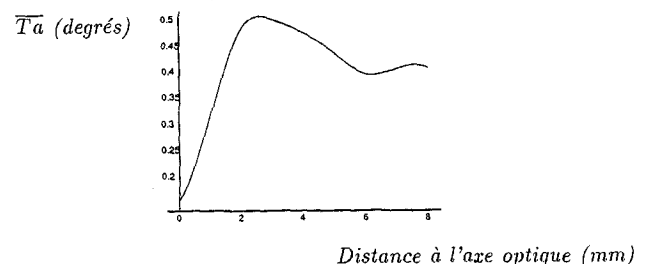


Figure 14. – Angles de Triangulation.

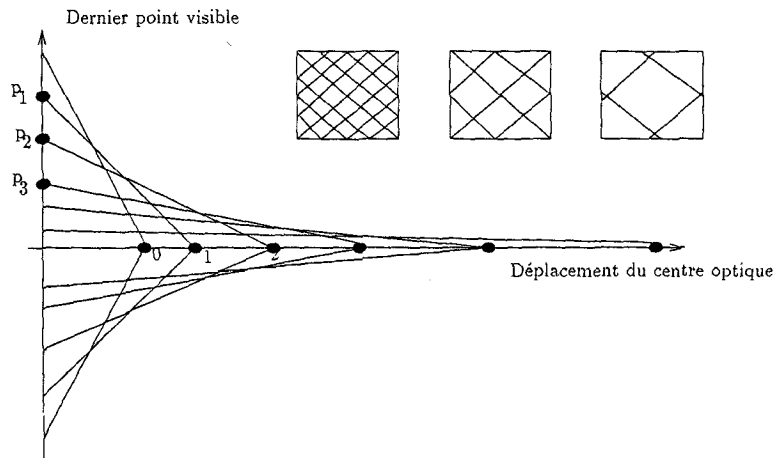


Figure 15. – Combinaison : occultation des points/déplacement du centre optique.

focales. Considérons le schéma de la Figure (15); nous pouvons noter que l'action de "zoomer" provoque :

- un déplacement virtuel du centre optique le long de l'axe optique. Dans [LRD93], les auteurs ont montré que ce déplacement n'est pas linéaire et augmente lorsque la focale augmente; le phénomène est également visible sur la coordonnée en z du tableau 1
- l'occultation des points due à l'effet de zoom (p_1 est visible dans la première et la seconde images et disparaît lorsque le centre optique est translaté vers sa position numéro 2).

Ainsi, ces deux considérations permettent de noter que l'angle de triangulation d'un point p_1 , seulement visible dans les deux premières images (Figure 16a), sera plus faible que l'angle correspondant à un point p_2 , proche du "centre de l'image", mais visible pendant la majeure partie de la séquence (16b).

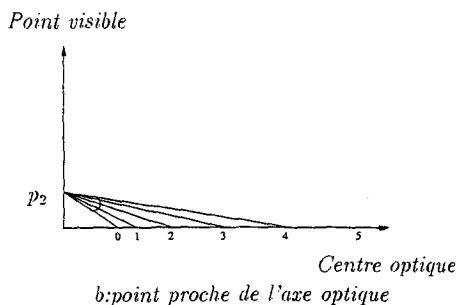
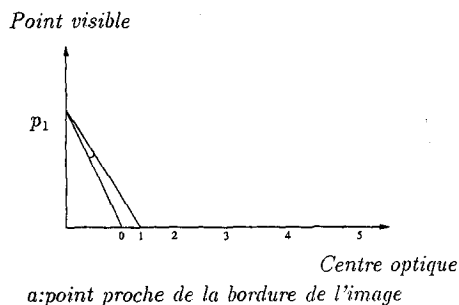


Figure 16. – Deux configurations des angles de triangulation.

Ces expériences montrent que l'effet de zoom induit deux phénomènes : l'occultation des points au cours de la séquence et le déplacement du centre optique. La précision de reconstruction qui en découle est différente de celle obtenue par des méthodes classiques de stéréovision axiale et les angles de triangulation, bien que faibles, sont ici relativement homogènes sur toute la surface de l'image.

6.3. RÉSULTATS DE LA SECONDE SÉRIE DE MESURES

Nous disposons de seize images acquises à des distances focales différentes (de 25 à 32 mm en notation objectif) pour chacune des six positions de la grille. Le but de cette expérience est de compléter les résultats précédents; nous nous intéressons plus particulièrement au nombre de grilles de calibration utilisées, à leur distance, aux plages de variation de focales permettant une reconstruction précise...

Dans les trois tableaux suivants, les grilles de calibration seront notées de g60 à g210 selon leur position. Par exemple g60 est la grille située à 60 mm de l'origine du repère de notre banc de mesure (ce qui correspond à une distance d'environ 90 cm de la caméra). La grille à reconstruire sera notée de la même façon.

- $nb_{focales}$ est le nombre de focales utilisées.

Tableau 7. – Reconstruction d'une grille avec différentes grilles de calibration

grilles de calibration	nb focales	grille reconstr.	nbApp mini	errz1 mm	errz2 mm	sigz2 mm	nbPts
g60-g210	16	g120	2	6.17E-1	2.03E-1	1.23E0	807
			5	6.05E-1	1.89E-1	7.03E-1	691
			16	1.33E0	2.70E-1	7.58E-1	85
g90-g150	16	g120	2	1.26E0	3.73E-1	1.36E0	863
			5	1.17E0	1.98E-1	6.39E-1	692
			16	2.74E0	2.05E-1	5.28E-1	84
g60-g90 g150-g180 g210	16	g120	2	6.87E-1	3.14E-1	1.48E0	963
			5	5.81E-1	1.70E-1	6.60E-1	772
			16	1.29E0	2.37E-1	5.96E-1	108

Tableau 8. – Reconstruction d'une grille avec deux grilles de calibrage pour différentes focales

grilles de calibrage	nb focales	grille reconstruite	nbApp	errz1 mm	errz2 mm	sigz2 mm	nbPts
g60-g210	"16" 25 à 40	g120	2	6.17E-1	2.03E-1	1.23E0	807
			5	6.05E-1	1.89E-1	7.03E-1	691
			16	1.33E0	2.70E-1	7.58E-1	85
g60-g210	"10" 27 à 36	g120	2	4.53E-1	2.41E-1	1.68E0	737
			5	4.47E-1	1.92E-1	1.29E0	551
			10	5.26E-1	1.74E-1	1.33E0	240
g60-g210	"8" 25 à 32	g120	2	1.55E0	3.49E-1	2.19E0	807
			5	1.54E0	3.37E-1	1.66E0	691
			8	1.77E0	3.53E-1	1.74E0	491
g60-g210	"8" 33 à 40	g120	2	7.03E-1	2.95E-1	1.22E0	359
			5	8.97E-1	3.85E-1	8.81E-1	192
			8	1.19E0	4.98E-1	6.59E-1	85
g60-g210	"8" 1 sur 2	g120	2	6.22E-1	4.84E-1	1.23E0	735
			5	3.49E-1	1.09E-1	8.32E-1	359
			8	5.39E-1	1.06E-1	7.81E-1	85
g60-g210	25 et 40	g120	2	3.02E0	4.40E-1	7.25E-1	85
g60-g210	30 et 35	g120	2	2.78E-1	2.02E-1	2.56E0	291

Tableau 9. – Reconstruction d'une grille située en dehors de l'espace des grilles de calibrage

grilles de calibrage	nb focales	grille reconstruite	nbApp	errz1 mm	errz2 mm	sigz2 mm	nbPts mm
g60-g90	"16"	g120	2	3.26E0	5.00E-1	2.36E0	947
			5	3.33E0	3.45E-1	1.20E0	749
			16	8.34E0	6.43E-1	1.41E0	106
g60-g90	"16"	g150	2	5.85E0	1.27E0	4.02E0	969
			5	5.69E0	1.10E0	1.83E0	775
			10	1.43E1	1.53E0	2.43E0	107
g60-g90	"16"	g180	2	8.34E0	2.99E0	4.56E0	990
			5	7.25E0	1.40E0	2.49E0	801
			8	1.86E1	2.46E0	2.89E0	107
g60-g90	"16"	g210	2	1.29E1	6.09E0	6.46E0	1004
			5	9.59E0	1.99E0	3.10E0	837
			8	2.43E1	3.32E0	3.29E0	107
g60-g150	"16"	g180	2	3.30E0	8.93E-1	2.11E0	993
			5	2.96E-1	3.45E-1	1.08E0	811
			8	7.80E0	5.11E-1	6.90E-1	107
g60-g150	"16"	g210	2	5.70E0	1.11E0	2.77E0	1004
			5	5.29E0	3.13E-1	1.51E0	834
			8	1.45E1	6.35E-1	1.65E0	107
g60-g90 g120-g150	"16"	g180	2	4.09E0	8.13E-1	1.67E0	1005
			5	3.89E0	3.41E-1	1.05E0	840
			8	8.77E0	5.33E-1	5.90E-1	128

- *nbApp* est le nombre minimal d'images dans lesquels apparaissent les points reconstruits.
- *errz1* exprimé en mm est la moyenne des erreurs selon la coordonnée en *z* de tous les points de l'image.
- *errz2* représente la moyenne des erreurs en *z* en ne considérant pas le point le plus proche du centre de l'image. Cette valeur est plus "parlante" que la précédente car l'erreur sur le point le plus proche du centre de l'image peut devenir très importante et fausser les résultats (n'oublions pas que le centre de l'image est un point impossible à reconstruire).
- *sigz2* représente la moyenne des écarts-types sur l'erreur en *z* sans considérer le point le plus proche du centre de l'image.

– *nbPts* est le nombre total de points reconstruits.

Pour le tableau 7 les erreurs en *z* sont très proches pour les trois expériences. Pour les points reconstruits appartenant à cinq images au moins, en omettant le point le plus proche du centre de l'image, l'erreur est inférieure à 0.2 mm. Le fait d'utiliser plusieurs grilles de calibrage n'apporte pas une nette amélioration; de plus le temps de calcul est plus long avec toutes les grilles de calibrage.

L'étude du tableau 8 montre que les résultats sont meilleurs si la gamme des focales est suffisamment étendue. Nous pouvons également noter que si l'on considère une focale sur deux en couvrant toute la gamme, les calculs sont moins longs et les

résultats tout à fait corrects. Par contre sur une gamme restreinte (8 focales consécutives par exemple) les résultats se dégradent. Le fait de ne considérer que deux focales diminue la précision des résultats; toutefois ces derniers restent acceptables mais bien entendu, le nombre de points reconstruits est moins élevé.

Les résultats du tableau 9 montrent qu'il est tout à fait possible de reconstruire des objets situés en dehors de l'intervalle défini par les grilles de calibrage. Bien entendu, plus l'on s'éloigne des grilles de calibrage, plus les résultats se détériorent. Si l'on considère les grilles de calibrage très proches l'une de l'autre, la précision est moins bonne que pour des grilles de calibrage plus espacées. La précision de reconstruction reste acceptable pour toutes les distances considérées (de 180 à 210 mm) pour des grilles de calibrage distantes de 9 cm. Ce n'est pas le cas si les grilles de calibrage sont seulement distantes de 3 cm.

7. Conclusion et Discussion

Cet article présente une méthode de modélisation simple, qui ne suppose aucune détermination des paramètres intrinsèques de la caméra. Nous résolvons le problème de modélisation dans un espace métrique défini par deux grilles de calibrage de très grande qualité. Une approximation locale, basée sur le rapport anharmonique de quatre points, permet d'établir une transformation entre l'image de la grille distordue et la grille réelle parfaite, située devant la caméra; les phénomènes de distorsion sont ainsi automatiquement pris en compte.

Des expériences sur des images réelles ainsi qu'une analyse statistique de ces résultats sont présentés. Nous montrons que cette nouvelle approche, pour le calibrage d'un zoom, conduit à de bien meilleurs résultats de reconstruction que ceux obtenus précédemment. La précision obtenue est de l'ordre de 1mm pour la coordonnée en z d'une grille plane située à un mètre de la caméra. Même les points proches de l'axe optique sont correctement reconstruits.

Dès lors que l'on analyse une séquence d'images, prise en zoomant, les angles de triangulation s'avèrent relativement homogènes sur la surface de l'image et résultent d'une combinaison entre le déplacement virtuel du centre optique et le phénomène d'occultation de points.

A notre connaissance, il s'agit ici des premiers résultats de stéréovision axiale par zoom montrant qu'il est possible de reconstruire une surface couvrant la majeure partie de l'image, avec une précision satisfaisante.

BIBLIOGRAPHIE

[Bey92] H.A. Beyer, Accurate calibration of CCD cameras, in *Proc. of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Urbana Champaign, USA*, pages 96-101, 1992.

[BMB94] P. Brand and R. Mohr and P. Bobet, Distorsions optiques : correction dans un modèle projectif, 9th congrès AFCET RFIA, pages 87-98, Paris, January 1994,

[CAK90] C. Carmona and A. Ayache and C. Krey, A Study of an Axial stereovision System, in *Proc. of International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision (ICARCV'90)*, pages 1101-1106, 1990.

[DG93] R. Deriche and G. Giraudon, A Computational approach for corner and vertex detection, *International Journal of Computer Vision*, 10(2), pages 101-124, 1993.

[EVF95] R. Enciso and T. Vieville and O. Faugeras, Approximation du changement de focale et mise au point par une fonction affine à trois paramètres, *Traitement du Signal*, 11(5), pages 361-372, 1994.

[GTK88] K.D. Gremban and C.H. Thorpe and T. Kanade, Geometric Camera Calibration using Systems of Linear Equations, *Proc. of IEEE Robotics and Automation*, pages 562-567, 1988.

[Har89] R.M. Haralick, Monocular Vision Using the Cross-Ratio, *Scandinavian Conference on Image Analysis, Oulu, Finland*, 1989.

[LRD93] J.M. Lavest and G. Rives and M. Dhome, 3D Reconstruction by Zooming, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(2), pages 196-208, April 1993.

[LRD95] J.M. Lavest and G. Rives and M. Dhome, Modelling an Object of Revolution by Zooming, To appear in *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 11(2), pages 267-271, April 1995.

[LPDD94] J.M. Lavest and B. Peuchot and C. Delherm and M. Dhome, Reconstruction by Zooming from Implicit Calibration, *Proc of 1st IEEE International Conference on Image Processing*, pages 1012-1016, Austin, November 1994.

[Li94] M. Li, Camera Calibration of a Head-Eye System for Active Vision, *Proc of 3rd European Conference on Computer Vision, ECCV*, 1, pages 543-554, Stockholm, May 1994.

[LL95] M. Li and J.M. Lavest, Some Aspect of Zoom Lens Camera Calibration, *Technical Report CVAP 172, Computational Vision and Active Perception Laboratory, RIT Sweden*, February 95.

[MO90] J. Ma and S.I. Olsen, Depth from Zooming, *Journal of Optical Society of America*, 7(10), pages 1883-1890, 1990.

[MBK81] H.A. Martins and J.R. Birk and R.B. Kelley, Camera Models Based on Data from Two calibration Planes., *Computer Graphics and Image Processing*, 17, pages 173-180, 1981.

[MM91] R. Mohr and L. Morin, Relative Positioning from Geometric Invariants, in *Proc of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 139-144, 1991.

[Peu93] B. Peuchot, Camera Virtual Equivalent Model, 0.01 Pixel Detector, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 17(4-5), pages 289-294, 1993.

[Peu94] B. Peuchot, Utilisation de détecteurs sub-pixels dans la modélisation d'une caméra, 9th congrès AFCET RFIA, pages 691-695, Paris, January 1994.

[RDDL94] S. Remy and M. Dhome and N. Daucher and J.T. Lapresté, Estimating the radial distortion of an optical system : Effect on a localization process, *Proc of 1st IEEE International Conference on Image Processing*, 7, pages 997-1001, Austin, November 1994.

[RA94] V. Rodin and A. Ayache, Stéréovision axiale : Modélisation et Calibrage d'un système de prise de vue, reconstruction 3D d'objets naturels, *Traitement du Signal*, 11(5), pages 373-392, 1994.

[TTG92] K. Tarabanis and R.Y. Tsai and D.S. Goodman, Modeling of computer-controlled zoom lens, in *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation, Nice*, pages 1545-1551, 1992.

[WM91] G.Q. Wei and S.D. Ma, Two Plane Camera Calibration : a Unified Model, in *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 133-138, June 1991.

[WS93] R.G. Willson and S.A. Shafer, What is the center of the image? , in *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, New-York*, pages 670-671, June 1993.

Manuscrit reçu le 16 janvier 1995.

LES AUTEURS

Catherine DELHERM



Catherine Delherm est étudiante en thèse au Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Électronique, et d'Automatique (LASMEA), URA 1793 du CNRS, à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Elle a obtenu le DEA Electronique et Systèmes, option Vision pour la Robotique en juillet 1992. Son sujet de thèse est la Reconstruction Dense par Stéréovision Axiale.

Nadine DAUCHER



Nadine Daucher est Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, spécialité Automatique. Ces activités de recherche concernent la vision monoculaire pour la robotique au sein du groupe GRAVIR du LASMEA.

Jean-Marc LAVEST



Jean-Marc Lavest est actuellement Maître de Conférences à l'Institut des Sciences pour l'Ingénieur CUST de Clermont-Ferrand. Ces activités de recherche regroupent la localisation et la modélisation d'objets tridimensionnels en Vision Artificielle, au sein du LASMEA.

Bernard PEUCHOT



Bernard Peuchot est Maître de Conférences en Informatique au CUST (Centre Universitaire des Sciences et Techniques) de Clermont-Ferrand et effectue ses travaux de recherche au LASMEA, notamment dans le domaine des algorithmes de détection, localisation et reconstruction sub-pixel. Son centre d'intérêt principal se situe dans les applications d'assistance chirurgicale avec utilisation de Réalité Virtuelle et Augmentée.