

## NUMERISATION AUTOMATIQUE DE SURFACES A PARTIR DE VUES STEREOSCOPIQUES FORTEMENT DEFORMEES

P. HAIGRON, R. COLLOREC

*LABORATOIRE TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'IMAGE - INSERM U335  
UNIVERSITE DE RENNES 1 - 35042 RENNES CEDEX*

### RÉSUMÉ

Certaines applications, en vision stéréoscopique, nécessitent l'utilisation de caméras de type grand angle permettant l'obtention de vues rapprochées de l'objet à reconstruire. Les problèmes nouveaux à résoudre sont essentiellement la calibration et la modélisation des distorsions géométriques. Deux méthodes sont proposées. Les tests réalisés, en particulier sur une sphère, permettent d'évaluer la précision de la reconstruction 3D. L'ensemble de la chaîne de traitement, de l'acquisition à la modélisation de surface, est mis en oeuvre dans le cas d'une structure anatomique osseuse.

### INTRODUCTION

La reconstruction tridimensionnelle d'images à partir de vues stéréoscopiques est maintenant bien connue et trouve de nombreuses applications dans les domaines de la vision par ordinateur. En particulier dans le domaine biomédical, la numérisation 3D précise de surfaces osseuses peut être un outil précieux en chirurgie réparatrice.

Les caméras utilisées possèdent généralement des optiques de qualité suffisante pour que les distorsions géométriques soient négligeables. Ceci n'est plus le cas pour des dispositifs optiques à grand angle de vue nécessaires lorsque la distance entre caméra et objet est faible par rapport aux dimensions de l'objet. Il est alors indispensable de mettre en oeuvre des méthodes performantes pour la modélisation et/ou la correction des distorsions géométriques si l'on veut une précision de reconstruction 3D satisfaisante.

Deux types de modèles de caméra sont présentés. Le premier que l'on peut qualifier de modèle "physique" est de type "pin-hole". On peut soit utiliser un modèle "pin-hole avec distorsion" comme c'est souvent le cas dans la littérature, soit comme proposé dans ce papier, effectuer une correction des distorsions puis une calibration "pin-hole simple".

Le deuxième type de modèle, dit mathématique, ne cherche plus à se rapprocher des interprétations physiques : c'est le modèle multi-plans. L'intérêt d'une telle approche est de rendre les résultats de la reconstruction 3D indépendants de la complexité du modèle physique réel.

### ACQUISITION DES IMAGES ET PRETRAITEMENT

Afin de pouvoir extraire, à partir des différentes vues, les informations 3D sur l'objet observé, il est nécessaire de modéliser les

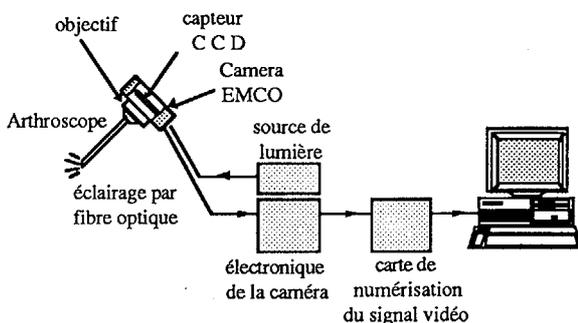


Figure 1 - Système d'acquisition

### ABSTRACT

Some applications in stereo vision need wide viewing angle cameras to obtain close views of the object to be reconstructed. The new problems to deal with are essentially the calibration and the geometrical distortions modelling. Two solutions are presented. The validation performed on a sphere allows to estimate the 3D reconstruction accuracy. The overall process, from data acquisition to surface modelling is implemented for a bone structure.

systèmes optiques. Une démarche classique consiste à effectuer, dans un premier temps, une acquisition d'images 2D d'une mire, sous des angles voisins, à partir de deux caméras pour réaliser ensuite leur calibration.

Le système d'acquisition est composé principalement d'une caméra CCD et d'un arthroscopie (Figure 1). Une prise de vues stéréoscopiques est simulée en changeant la position de l'arthroscopie par rapport à un banc de calibration. L'arthroscopie a un angle d'ouverture de 100 degrés environ et est placé à moins de 10 mm de l'objet. Ce dernier apparaît sous une forme régulière ne présentant pas d'aspérité. La projection de l'ombre d'une grille sur la surface est une solution pour créer artificiellement des caractéristiques identifiables. Les images de la mire et de l'objet ont été prises sur le banc de calibration.

La phase de prétraitement consiste à extraire des images les points caractéristiques, c'est-à-dire les points de la mire de calibration ou de la grille projetée. L'image est tout d'abord binarisée par un seuillage adaptatif, puis le passage d'un masque en croix permet d'isoler des groupes de pixels aux intersections. Le calcul du barycentre de chaque ensemble de pixels fournit une estimation des intersections (points caractéristiques) avec une précision sous-pixel.

### METHODE 1 CORRECTION DES DISTORSIONS GEOMETRIQUES CALIBRATION PIN-HOLE

La calibration géométrique a pour but d'établir les équations de transformation entre l'espace tridimensionnel rapporté à un référentiel objet et l'espace bidimensionnel du plan image rapporté à un référentiel calculateur. Une fois cette relation établie, l'information 3D peut être déduite à partir de l'information 2D et vice-versa.

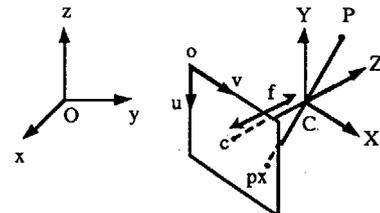


Figure 2 - Modèle pin-hole

Le modèle pin-hole est représenté par la Figure 2. Il définit le système optique par son axe optique perpendiculaire au plan de l'image et par son centre optique, localisé sur l'axe optique à la



distance focale  $f$  du plan de l'image [3] [4]. L'équation (1) détermine la relation entre les coordonnées 2D image  $(u,v)$  et les coordonnées 3D objet  $(x,y,z)$  où  $t$  est un facteur d'échelle dépendant de la matrice de transformation perspective  $M$  et de  $(x,y,z)$ .

$$t.(u,v,1)^T = M.(x,y,z,1)^T \quad (1)$$

Ce modèle est facile à résoudre (problème linéaire) mais en contrepartie les distorsions géométriques apportées par l'optique sont ignorées. Pour prendre en compte les distorsions, des modèles globaux basés sur une modélisation pin-hole incluant les distorsions expriment les coordonnées image réelles (avec distorsion) en fonction des coordonnées 3D objet [1][6]. La résolution consiste à réaliser une optimisation avec des conditions initiales bien choisies. Malheureusement, il est difficile d'évaluer la qualité de la modélisation des distorsions. D'autre part, si l'on a pour objectif une reconstruction 3D, le problème d'inversion du modèle peut s'avérer délicat du fait de la non-linéarité du développement.

La démarche présentée ici consiste à réaliser dans un premier temps une correction des distorsions géométriques dans le repère image pour résoudre ensuite un problème de projection centrale, c'est à dire une calibration pin-hole simple avec matrice de transformation perspective.

### Correction des distorsions géométriques

#### *Mire de référence*

Le problème est d'estimer les paramètres d'un modèle de correction connaissant les coordonnées image avec distorsion  $(u_d, v_d)$  et les coordonnées image de référence associées  $(u_{ref}, v_{ref})$  d'un ensemble de  $N$  points. En présentant une mire devant l'arthroscope, l'image avec distorsion est connue, mais l'image de référence ne l'est pas. Pour pouvoir déterminer la mire de référence, il est nécessaire de positionner son plan support orthogonalement à l'axe optique. Les paramètres de la mire (centre, inclinaison dans le repère image, taille) sont calculés par un algorithme classique d'optimisation à partir des points proches du centre de l'image.

#### *Modèle de correction*

Le modèle est composé à partir de développements qui expriment les coordonnées corrigées  $(u_c, v_c)$  en fonction des coordonnées avec distorsion  $(u_d, v_d)$  dans le repère image  $(O, u, v)$  :

$$u_c = u_d + \Delta_u \quad v_c = v_d + \Delta_v$$

Plutôt que d'utiliser des paramètres identiques pour les termes correctifs  $\Delta_u$  et  $\Delta_v$ , par exemple un centre de distorsion, des paramètres de distorsion radiale et tangentielle [1] [2], nous utilisons ici des paramètres différents pour chaque direction :

#### Correction suivant $O_u$

- $C_{ui}, C_{uj}$  coordonnées du centre  $C_u$  dans  $(O, u, v)$ .
- $k_{1u}, k_{2u}, k_{3u}, p_{1u}, p_{2u}, A_u$

#### Correction suivant $O_v$

- $C_{vi}, C_{vj}$  coordonnées du centre  $C_v$  dans  $(O, u, v)$ .
- $k_{1v}, k_{2v}, k_{3v}, p_{1v}, p_{2v}, A_v$

Les termes correctifs  $\Delta_u, \Delta_v$  s'expriment sous la forme suivante :

$$\Delta_u = d_{ru} + d_{pu} + d_{au}$$

$$\Delta_v = d_{rv} + d_{pv} + d_{av}$$

$$\begin{aligned} \text{avec } d_{ru} &= x_u \cdot (k_{1u} \cdot r_u^2 + k_{2u} \cdot r_u^4 + k_{3u} \cdot r_u^6) \\ d_{rv} &= y_v \cdot (k_{1v} \cdot r_v^2 + k_{2v} \cdot r_v^4 + k_{3v} \cdot r_v^6) \\ d_{pu} &= p_{1u} \cdot (r_u^2 + 2 \cdot x_u^2) + 2 \cdot p_{2u} \cdot x_u \cdot y_u \\ d_{pv} &= p_{1v} \cdot (r_v^2 + 2 \cdot y_v^2) + 2 \cdot p_{2v} \cdot x_v \cdot y_v \\ d_{au} &= A_u \cdot x_u \\ d_{av} &= A_v \cdot y_v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{et } x_u &= u_d - C_{ui} & x_v &= u_d - C_{vi} \\ y_u &= v_d - C_{uj} & y_v &= v_d - C_{vj} \\ r_u^2 &= x_u^2 + y_u^2 & r_v^2 &= x_v^2 + y_v^2 \end{aligned}$$

La solution est obtenue en minimisant l'erreur  $E$  donnée par

$$E = \sum_{i=1}^N [(u_{cl} - u_{ref})^2 + (v_{cl} - v_{ref})^2]$$

### Calibration pin-hole

Nous nous plaçons dans le cas de vues corrigées, ce qui se traduit par un problème linéaire à résoudre. L'équation (1) peut se réécrire sous la forme :

$$\begin{aligned} (m_{11} - m_{31} \cdot u) \cdot x + (m_{12} - m_{32} \cdot u) \cdot y + (m_{13} - m_{33} \cdot u) \cdot z + m_{14} &= m_{34} \cdot u \\ (m_{21} - m_{31} \cdot v) \cdot x + (m_{22} - m_{32} \cdot v) \cdot y + (m_{23} - m_{33} \cdot v) \cdot z + m_{24} &= m_{34} \cdot v \end{aligned} \quad (2)$$

où les  $m_{ij}$  ( $i=1$  à  $3$  et  $j=1$  à  $4$ ) sont les composantes de  $M$

Le système d'équations (2) définit une droite dans l'espace 3D passant par  $px(u,v)$  et  $P(x,y,z)$ . Si les projections 2D de  $n$  points 3D sont mesurées, les  $n$  paires d'équations peuvent être représentées sous la forme matricielle suivante :

$$A \cdot R = m_{34} \cdot B \quad (3)$$

où  $R$  est un vecteur de 11 éléments défini par :

$$R^T = (m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33})$$

$A$  est une matrice  $2n \times 11$  et  $B$  un vecteur de  $2n$  éléments.

$m_{34}$  est un scalaire que l'on prend égal à 1.

L'équation (3) ayant 11 inconnues (les 11 composantes de  $R$ ) peut être résolue par inversion généralisée de matrice si on connaît au moins 6 points :

$$R = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B$$

### Reconstruction 3D

La calibration est réalisée pour chaque position de l'arthroscope avec le même système de coordonnées objet. Chacun des deux systèmes (2) résultant de la calibration définit une droite de projection passant par le point image de la vue considérée et le point objet. Ce point 3D  $P(x,y,z)$  est retrouvé en calculant l'intersection des deux droites. En fait il est plus réaliste de dire que le point  $P$  est le milieu du plus court segment liant les deux droites de projection, car celles-ci ne se coupent généralement pas (imprécisions dues à la détermination de la position des points dans les images).

## METHODE 2 CALIBRATION MULTI-PLANS

D'un point de vue mathématique, une image est la projection d'un espace à trois dimensions sur un espace à deux dimensions. En fait le problème traité ici est la rétro-projection : passage des coordonnées 2D image aux coordonnées 3D objet. Une approche basée sur l'utilisation de deux plans de calibration dans l'espace objet a été développée par Martins [7]. Cette technique de calibration ne fait appel à aucun modèle explicite de caméra. La différence principale avec un modèle "pin-hole" réside dans le fait que les lignes de projection ne passent pas obligatoirement par un même point : on n'impose pas un centre (unique) pour l'optique.

Le principe de la méthode des deux plans consiste à associer à chaque pixel  $px(u,v)$  de l'image, deux points  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  et  $P_2(x_2, y_2, z_2)$  appartenant respectivement aux plans de calibration 1 et 2. Pour cela, les deux plans supportent chacun une mire composée d'un certain nombre de points dont on connaît les coordonnées 3D dans le repère objet et leurs projections 2D dans le repère image (pixels). Les coordonnées 3D associées aux autres pixels sont calculées par interpolation. Le problème est donc de définir une fonction d'interpolation qui, à tout pixel, associe deux points  $P_1$  et  $P_2$  caractérisant la droite de projection dans l'espace objet.

Principe de la calibration multi-plans développée

Il est bien évident que la précision de l'estimation de la droite de projection est d'autant meilleure que le nombre de plans et par conséquent le nombre de points utilisés est important. Il paraît donc intéressant de mettre en oeuvre une calibration basée sur plus de deux plans.

Un modèle multi-plans est caractérisé principalement par le type d'interpolation sur lequel il est fondé. Cette interpolation peut être globale (linéaire, quadratique) ou locale (splines linéaires). Dans le cas d'une distorsion géométrique importante et difficilement modélisable il semble nécessaire et réaliste de retenir l'approximation locale. Comme le suggère Lavallée [5] et toujours dans le but de gagner en précision, plutôt que les splines linéaires, il est préférable de choisir les splines bi-cubiques.

La démarche la plus simple conceptuellement consiste à stocker pour chaque pixel  $px$  de l'image les paramètres de la droite de projection 3D associée, ceux-ci étant obtenus à partir des points 3D interpolés ( $P_1, P_2, P_N$ ) sur chaque plan de calibration (Figure 3). Etant donné un pixel dans l'image, une simple indexation conduit à la droite de projection correspondante. Cette solution est toutefois écartée en raison de son coût prohibitif en taille mémoire. Une autre approche consiste à stocker uniquement les points de contrôle, nécessaires pour réaliser une interpolation par B-splines, et à calculer à chaque fois (pour un pixel donné) les points 3D associés, puis la droite de projection.

Enfin rappelons que l'on travaille dans le cadre de la vision stéréoscopique : le point 3D objet  $P_o$  se projette en  $px_1$  sur le plan image 1 et en  $px_2$  sur le plan image 2. La résolution du problème de rétro-projection consiste à calculer les coordonnées du point d'intersection des droites de projection  $D_1$  et  $D_2$  respectivement associées aux points image  $px_1$  et  $px_2$  (Figure 3).

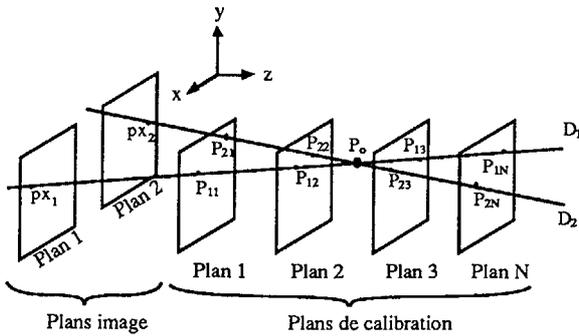


Figure 3 - Calibration multi-plans développée

Calibration-Interpolation

Le problème est d'associer à un pixel  $px(u,v)$  de l'image un point  $P(x,y,z)$  sur un plan de calibration dans l'espace 3D. Pour cela on dispose déjà d'un certain nombre de points qui sont les images des points caractéristiques de la mire de calibration. Pour tout autre pixel les associations point image-point 3D sont réalisées à l'aide d'interpolations par splines bi-cubiques. En résumé nous cherchons à établir les relations suivantes :

$$x = F_x(u,v); \quad y = F_y(u,v); \quad z = cste \text{ pour un plan donné}$$

Disposant d'un maillage rectangulaire de points, une interpolation par B-splines revient à chercher la surface qui passe par tous ces points. Dans notre application nous avons des maillages rectangulaires (4) qui représentent les coordonnées images  $u,v$  et les coordonnées 3D  $x,y$  (pour  $z$  fixé) indexées par les paramètres entiers  $i,j$  :

$$\left. \begin{matrix} u(i,j), v(i,j) \\ x(i,j), y(i,j) \end{matrix} \right\} \begin{matrix} i = 1 \dots M \\ j = 1 \dots N \end{matrix} \quad (4)$$

Plus généralement on désigne par  $S_{ij}$ , pour un maillage rectangulaire  $s(i,j)$  ( $i=1$  à  $M$  et  $j=1$  à  $N$ ), la surface sur le patch  $i,j$ , c'est à dire entre les quatres points  $(i,j)$ ,  $(i,j+1)$ ,  $(i+1,j)$ ,  $(i+1,j+1)$ . Soit  $C_{ij}$  la matrice des points de contrôle associée au patch  $i,j$  :

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} c_{i-1,j-1} & c_{i-1,j} & c_{i-1,j+1} & c_{i-1,j+2} \\ c_{i,j-1} & c_{i,j} & c_{i,j+1} & c_{i,j+2} \\ c_{i+1,j-1} & c_{i+1,j} & c_{i+1,j+1} & c_{i+1,j+2} \\ c_{i+2,j-1} & c_{i+2,j} & c_{i+2,j+1} & c_{i+2,j+2} \end{bmatrix}$$

La valeur interpolée en  $k, l$  sur le patch  $i,j$  est alors donnée par :

$$S_{ij}(k,l) = K.M.C_{ij}.M^T.L^T \quad 0 \leq k \leq 1 \quad 0 \leq l \leq 1 \quad (5)$$

$$\text{où } K = (k^3 \ k^2 \ k \ 1) \quad L = (l^3 \ l^2 \ l \ 1)$$

$$\text{et } M = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

La recherche des points de contrôle  $c_{ij}$  à partir des noeuds (valeurs à interpoler, par exemple  $x(i,j)$  pour l'interpolation de  $x$ ) se fait par résolution d'un système d'équations par la méthode itérative de Gauss-Seidel. De plus, des conditions de continuité au second ordre sont introduites pour les bords.

Le calcul des points de contrôle est réalisé pour chacun des maillages rectangulaires cités en (4) pour chaque vue et chaque plan.

Calcul des points 3D appartenant aux plans de calibration

A partir de  $px_1(u_1,v_1)$  dans le plan image 1 et  $px_2(u_2,v_2)$  correspondant dans le plan image 2 on veut retrouver les coordonnées 3D  $(x,y,z)$  des points appartenant aux plans de calibration. La valeur de  $z$  est connue puisqu'elle dépend du plan de calibration sur lequel on travaille.

Pour un plan de calibration donné, à partir des relations (6), on peut calculer les valeurs interpolées  $x=x_{ij}(k,l)$  et  $y=y_{ij}(k,l)$  si on connaît  $i, j$  et  $k, l$ . En ce qui concerne  $i$  et  $j$ , il suffit de déterminer à quel patch appartient le pixel  $px(u,v)$  dans le plan image.

$$x_{ij}(k,l) = K.M.C_{xij}.M^T.L^T \quad y_{ij}(k,l) = K.M.C_{yij}.M^T.L^T \quad (6)$$

Connaissant  $i, j, u$  et  $v$  on cherche à résoudre les équations suivantes qui ont pour inconnues  $k$  et  $l$  :

$$\begin{matrix} u = K.M.C_{u ij}.M^T.L^T & v = K.M.C_{v ij}.M^T.L^T \\ K = (k^3 \ k^2 \ k \ 1) & L = (l^3 \ l^2 \ l \ 1) \end{matrix}$$

C'est un problème d'optimisation à deux variables. Le critère d'erreur à minimiser au sens des moindres carrés est donné par :

$$E = (u - K.M.C_{u ij}.M^T.L^T)^2 + (v - K.M.C_{v ij}.M^T.L^T)^2$$

Toutefois il faut préciser que cette démarche n'est valable que si la solution est unique (un seul couple  $k,l$  pour  $u,v$  fixés).  $x_{ij}(k,l)$  et  $y_{ij}(k,l)$  sont alors obtenus à partir de  $i, j, k, l$ .

Algorithme de la méthode multi-plans développée :

$m=1,2$  désigne le numéro de la vue

$n=1$  à  $3$  désigne le numéro du plan

$P_{mn}$  est un point 3D dans le repère objet appartenant à l'un des  $n$  plans de calibration relatif à la vue  $m$ .

$px_m$  est un point 2D (pixel) dans le repère image appartenant à l'une des  $m$  vues.

Etape 1 : Calibration-Interpolation

Entrée : ensemble de  $N$  points 2D  $px_m(u,v)$  et  $N$  points 3D  $P_{mn}(x,y,z)$  associés.

Cette étape permet d'établir pour chaque pixel de l'image les relations :  $P_{mn} = F_{mn}(px_m)$

Sortie : points de contrôle associés à  $F_{mn}$



### Etape 2 : Reconstruction 3D

Entrée : paire  $px_m(u_m, v_m)$ ; points de contrôle associés à  $F_{mn}$

- 1) Recherche des patches pour chaque  $px_m : i_m, j_m$
  - 2) A partir de  $u_m, v_m, i_m, j_m$  calcul par optimisation de  $k$  et  $l$  qui représentent la position du pixel dans le patch ( $0 \leq k \leq 1, 0 \leq l \leq 1$ )
  - 3) Pour chaque vue et chaque plan calcul des points 3D  
 $P_{mn} = F_{mn}(px_m)$
  - 4) A partir des  $P_{mn}$  précédents, calcul des droites de projection  $D_m$  pour chaque vue.
  - 5) Intersection des droites  $D_m$
- Sortie : point 3D objet reconstruit  $P_o(x, y, z)$

Les B-splines permettent une interpolation locale précise. En sortie de l'étape 1, pour chaque vue et chaque plan, on dispose d'un nombre de points de contrôle du même ordre de grandeur que le nombre de points de calibration. D'autre part les résultats de la reconstruction 3D ne dépendent plus de la complexité du modèle physique réel mais des mesures effectuées lors de la calibration.

### RESULTATS

Les 16 paramètres du modèle de correction sont calculés à partir de 74 points. L'erreur quadratique moyenne est égale à  $0,77$  (pixel)<sup>2</sup>. Le résultat de la correction des distorsions géométriques est représenté Figure 4.

Les erreurs de reconstruction 3D obtenues avec les méthodes 1 et 2 sont données :

- a) dans le tableau 1 pour un ensemble de 18 points quelconques appartenant à la mire (pour différentes positions du plan support). Les limites du domaine sont données ci-dessous.

$$\begin{aligned} x_{\min} &= -10,24 \text{ mm} & x_{\max} &= 6,90 \text{ mm} \\ y_{\min} &= -4,46 \text{ mm} & y_{\max} &= 10,26 \text{ mm} \\ z_{\min} &= 0,00 \text{ mm} & z_{\max} &= 9,28 \text{ mm} \end{aligned}$$

- b) dans le tableau 2 pour 96 points d'une sphère de rayon 40 mm. Les limites du domaine sont données ci-dessous.

$$\begin{aligned} x_{\min} &= -11,16 \text{ mm} & x_{\max} &= 6,67 \text{ mm} \\ y_{\min} &= -4,97 \text{ mm} & y_{\max} &= 9,81 \text{ mm} \\ z_{\min} &= 0,32 \text{ mm} & z_{\max} &= 7,10 \text{ mm} \end{aligned}$$

Les points reconstruits sont répartis régulièrement dans les domaines reportés précédemment, mais des petites fluctuations sur les erreurs peuvent apparaître suivant le choix de ces points.

A partir d'un ensemble de points 3D reconstruits, une modélisation par polygones ombrés et une vue perspective de la surface du fémur au niveau de l'articulation du genou sont réalisées. Le résultat est montré Figure 5.

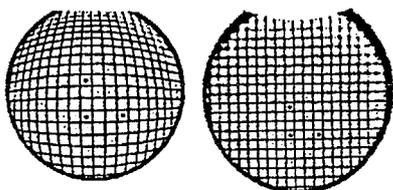


Figure 4 - Correction des distorsions

	Méthode 1	Méthode 2
Erreur moyenne	0,16 mm	0,11 mm
Erreur maximale	0,36 mm	0,23 mm

Tableau 1 - Erreurs de reconstruction 3D pour 18 points

	Méthode 1	Méthode 2
Erreur moyenne	0,12 mm	0,10 mm
Erreur maximale	0,48 mm	0,38 mm

Tableau 2 - Erreurs de reconstruction 3D de la sphère

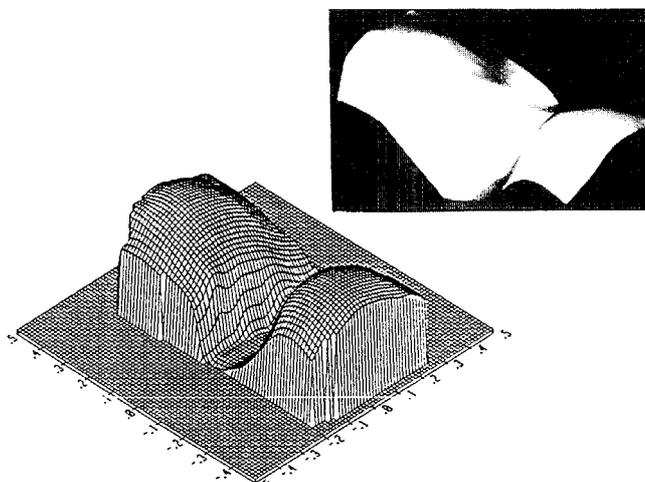


Figure 5 - Représentation de la surface du fémur numérisée

### CONCLUSION

Les performances en termes de précision des résultats sont satisfaisantes et n'offrent pas de différences notables entre les deux méthodes. La distinction entre celles-ci réside plus dans leur complexité de mise en oeuvre et leur qualité de modélisation. En effet, l'approche "pin-hole" est un peu plus contraignante sur le plan expérimental puisqu'elle nécessite l'orthogonalité entre la mire et l'axe optique pour la correction des distorsions. L'approche multi-plans, quant à elle, s'avère plus coûteuse en temps de calcul et en occupation mémoire. En contrepartie, cette dernière n'est pas basée sur un modèle physique particulier, ce qui se traduit par des résultats de reconstruction 3D indépendants du système optique utilisé et de son environnement. Enfin les résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité de la reconstruction 3D précise de la surface d'un objet à partir de vues stéréoscopiques fortement déformées.

### REFERENCES

- [1] D.C. BROWN, "Close Range Camera Calibration", Photogrammetric Engineering, vol. 37, no. 8, pp. 855-866, 1971.
- [2] W. FAIG, "Calibration of Close-range Photogrammetric Systems : Mathematical Formulation", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 41, no. 12, pp. 1479-1486, 1975.
- [3] O.D. FAUGERAS, G. TOSCANI, "The Calibration Problem for Stereo", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-86, Miami Beach, Florida, USA, pp.15-20, June 22-26, 1986.
- [4] O.D. FAUGERAS, "Quelques pas vers la vision artificielle en trois dimensions", Techniques et Sciences informatiques, vol. 7, no. 6, pp. 548-590, 1988.
- [5] S. LAVALLEE, "Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateurs : Application à la neurochirurgie stéréotaxique", Thèse Université Joseph Fourier Grenoble 1, 1989.
- [6] R.K. LENZ, R.Y. TSAI, "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 10, no. 5, 1988.
- [7] H.A. MARTINS, J.B. BIRK, R.B. KELLEY, "Camera Models Based on Data from Two Calibration Planes", Computer Graphics and Image Processing 17, pp. 173-180, 1981.

*Ce travail est financé par LOMATECH et le Conseil Régional de Bretagne.*