

CALIBRATION D'UN SYSTEME DE VISION PAR LUMIERE STRUCTUREE

Y. Voisin¹, F. Marzani², A. Diou¹

¹LE2I, Université de Bourgogne,
IUT du Creusot,
12 rue de la Fonderie,
71200 Le Creusot, France

²LE2I, Université de Bourgogne,
UFR Sciences et Techniques, Département
IEM,
B.P. 47870,
21078 Dijon cedex, France

y.voisin@iutlecreusot.u-bourgogne.fr
franck.marzani@u-bourgogne.fr
a.diou@iutlecreusot.u-bourgogne.fr

Résumé

Nous présentons une méthode de calibration d'un système de stéréovision active. Ce dernier est composé d'une caméra et d'un système de projection d'un réseau matriciel de rayons laser. L'intersection des rayons avec le premier objet rencontré de la scène produit une tache lumineuse sur celui-ci. Si celle-ci apparaît sur l'image, en associant ces coordonnées à l'équation de la droite supportant le rayon laser dont la tache est issue, on remonte aux coordonnées tridimensionnelles du point de la scène éclairée par le rayon considéré. Cette opération est répétée pour l'ensemble des taches apparaissant dans l'image. Les points 3D obtenus sont à la base d'une modélisation surfacique de la scène analysée.

Cette opération de reconstruction n'est envisageable que si le système est calibré. La méthodologie de calibration que nous proposons est la suivante. Après positionnement du réseau laser et de la caméra, un plan mobile est placé au niveau de la scène à analyser. Une séquence d'images est acquise lors du déplacement en translation du plan suivant l'axe du rayon laser central. La détection du centre des taches apparaissant sur les images permet de déterminer l'équation de chaque rayon laser projeté dans le repère image. De plus, en synchronisant le déplacement du plan avec l'acquisition, on peut associer la position du plan à une abscisse curviligne sur chacune des droites. Ces informations sont suffisantes pour calibrer le système.

1. Introduction

D'une manière générale, l'obtention d'information surfacique tridimensionnelle passe par l'utilisation d'une méthode de stéréovision passive ou active.

La méthode passive la plus fréquemment employée consiste à utiliser soit deux caméras, soit une seule pour laquelle on fait une acquisition dans deux positions différentes. Dans les deux cas, le but est de posséder deux images d'une même scène prise sous deux angles différents. La reconstruction d'un point de la scène passe par la recherche de ses coordonnées 2D dans les deux images. En supposant connue la relation géométrique entre les deux caméras, ou alors le déplacement subi par l'unique caméra, on peut remonter par triangulation aux coordonnées 3D du point. Bien que cette méthode soit précise et fréquemment utilisée [1][2], elle nécessite des outils de traitement d'images performants afin d'extraire des images les points à reconstruire [3]. Seuls les points caractéristiques, à fort gradient ou forte texture par exemple, peuvent être détectés. Cette contrainte limite le nombre de points reconstruits et donc diminue la densité de la surface 3D reconstruite.

Les méthodes de stéréovision active offrent une approche alternative à l'utilisation de deux caméras. Elles consistent à remplacer l'une des deux caméras par un système de projection lumineux qui projette une lumière sur la scène. Bien souvent, cette lumière est soit composée d'un seul rayon lumineux qui balaye alors la scène, soit d'un ensemble de rayons lumineux structurés. Dans le premier cas, une séquence d'images est acquise par la caméra. Dans le second cas, une seule image est nécessaire. Finalement, la connaissance des

paramètres intrinsèques de la caméra et de la géométrie entre celle-ci et l'émetteur lumineux est suffisante pour déterminer les coordonnées 3D des points de la scène illuminés et visibles sur l'image caméra. La reconstruction provient de la déformation du maillage de lumière structurée sur la surface des objets de la scène [4].

Une technique de calibration d'un tel système de vision active fait l'objet de cet article. La lumière structurée que nous utilisons est constituée d'un réseau matriciel de rayons laser. L'acquisition d'une seule image d'une scène éclairée par ce système est nécessaire et suffisante à la reconstruction des points de la scène illuminés et visibles par la caméra. Plutôt que d'utiliser une méthode de calibration classique, à savoir détermination des paramètres intrinsèques et extrinsèques, nous proposons une méthodologie originale dont la description dans cet article apparaît de la façon suivante : premièrement, la section 2 revient sur les systèmes composés de deux caméras. Nous décrivons mathématiquement les relations et contraintes géométriques existantes. Ensuite, la section 3 expose la méthodologie de calibration présentée dans cet article. La section 4 propose plusieurs résultats avec une quantification des erreurs au niveau des coordonnées des points 3D reconstruits. Une conclusion fait l'objet de la section 5.

2. Calibration d'un système de stéréovision passive

Un modèle est utilisé pour calibrer une caméra. Il décrit le processus de formation des images par le biais d'une relation géométrique [5]. Bien souvent, le modèle du sténopé (pinhole en anglais) répond au problème soulevé : il modélise la relation perspective par la projection centrale (Fig. 1).

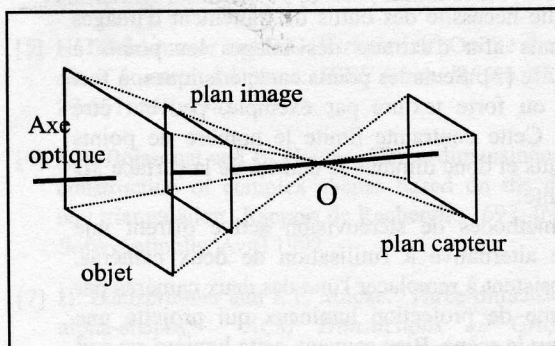


Fig. 1 modèle du sténopé

Plusieurs référentiels sont associés à l'ensemble caméra-objectif et un autre permet de décrire la scène dans son propre repère, appelé absolu (Fig. 2).

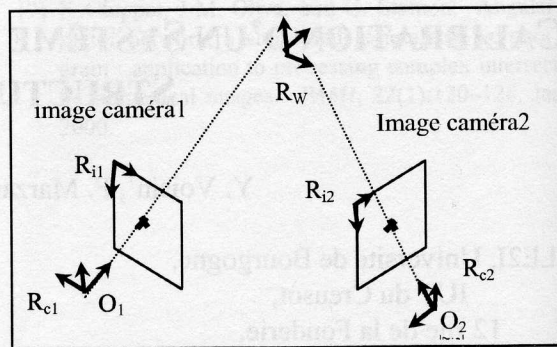


Fig. 2 référentiels d'un système stéréoscopique classique

Afin de calibrer un système mono-caméra, une première technique consiste à calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de celui-ci. Les paramètres intrinsèques sont propres au système d'acquisition alors que les paramètres extrinsèques caractérisent la transformation rigide entre le référentiel absolu et le référentiel associé à la caméra. Ces paramètres estimés, on peut calculer les coordonnées image (x_i, y_i) d'un point p_i , projection d'un point P_w connu de coordonnées (X_w, Y_w, Z_w) dans le référentiel absolu. L'opération inverse est impossible sans connaissance *a priori*. Par contre, dans le cas d'un système de stéréovision passive composé de deux caméras, cela devient possible. Chaque caméra est calibrée indépendamment de l'autre. Ensuite, si p_{i1} est un point de l'image 1 et que p_{i2} correspond à la projection du même point tridimensionnel P_w mais dans l'image 2, alors les paramètres de calibration permettent de déterminer, pour chaque caméra, la droite 3D sur laquelle se trouve le point P_w recherché. L'intersection de ces deux droites donne le point recherché.

Une deuxième technique plus récente permet également de calibrer un tel système. Elle porte le nom de calibration faible [6]. Elle consiste à ne rechercher que les paramètres de calibration nécessaires aux opérations de projection et de reconstruction sans détailler le calcul de chacun d'eux. Deux matrices sont bien souvent calculées. La première, matrice essentielle, permet le passage entre référentiels caméra. La seconde, matrice fondamentale, opère le passage entre les deux référentiels image des deux caméras. La connaissance de ces deux matrices, voire d'une seule en fonction de l'application, est bien souvent suffisante.

3. Calibration proposée

Cette section se décompose en trois parties : la première est liée à l'acquisition des images nécessaires à la calibration ; la seconde décrit le traitement à effectuer sur ces images avec les paramètres à calculer et la troisième présente la façon dont ces paramètres

sont utilisés lors de la phase ultérieure de reconstruction.

3.1. Acquisition des images

Nous disposons pour cette acquisition du matériel suivant : Une caméra CCD reliée à un PC permettant une acquisition continue d'une séquence, de l'ordre de 10 images. Une diode laser associée à un réseau de diffraction pour la génération d'un faisceau laser matriciel composé de 19×19 rayons ; l'angle inter-rayon dans les deux plans est fixe et connu. Un plan Π mobile et motorisé en translation ; l'axe de translation est perpendiculaire au plan.

La première étape consiste à placer le plan perpendiculairement au rayon central du faisceau. La diode étant fixée, on alimente le laser. Le plan est correctement positionné lorsque la tache produite par le rayon principal et apparaissant à la surface du plan est fixe quelle que soit la translation appliquée à ce dernier. Ensuite, la caméra est fixée de façon à contenir l'ensemble des taches lumineuses apparaissant sur le plan, ceci indépendamment de la position en translation du plan dans une amplitude donnée. Cette dernière correspond aux plans extrêmes (nommés Π_0 et Π_1) entre lesquels se situera la scène à analyser (Fig. 3). L'angle entre la caméra et la diode est déterminé de façon à pouvoir appliquer les équations de la géométrie stéréoscopique.

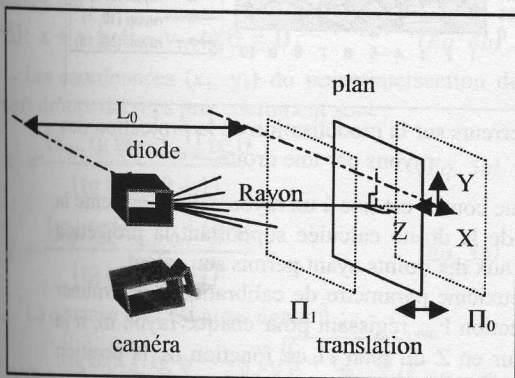


Fig. 3 - système d'acquisition par stéréovision active

L'intersection du rayon principal avec le plan Π_0 , plan le plus éloigné de la diode, donne l'origine du référentiel absolu. Les axes X et Y correspondent respectivement aux lignes et colonnes formées par les rayons lumineux. L'axe Z supporte le rayon principal et est dirigé vers la diode émettrice. L'étape d'acquisition peut débuter. Pour ce faire, le plan Π en position Π_0 est illuminé par la diode laser. Lors de la translation de ce plan vers la position Π_1 , plusieurs images sont acquises. A chaque image i de la séquence (i variant de 1 à I) est associée une profondeur du plan Z_i . Notons que Z_1 vaut

0 alors que Z_1 est égal à la distance entre Π_0 et Π_1 . Les images obtenues font apparaître un ensemble de taches lumineuses (Fig. 4). La position de ces taches est à la base de la calibration.

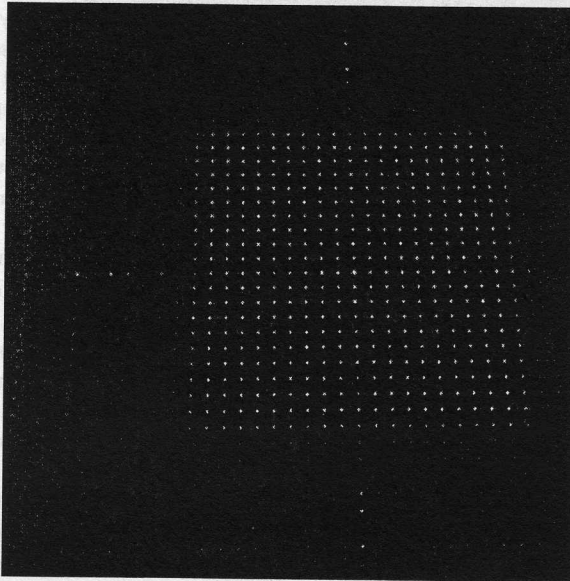


Fig. 4 - une image de la séquence servant à la calibration

3.2. Détermination des paramètres

Pour chaque image, un algorithme de segmentation par région de type 'blob coloring' [7] est utilisé afin de répertorier les taches lumineuses qui sont alors perçues comme des régions. Cette segmentation terminée, on passe à la recherche du centre de chacune des régions étiquetée 'tache lumineuse'. Dans le but d'augmenter la précision, le niveau de gris de ces régions est filtré et approximé par une surface B-spline [8]. Ensuite, un algorithme de recherche pondérée de centre de gravité est appliqué à chaque région de chaque image. Si l'on suppose que les conditions d'éclairage lors de l'acquisition sont correctes et la configuration du système d'acquisition bonne, on obtient $19 \times 19 = 361$ points $\mathbf{p}_{mni}(x_{mni}, y_{mni})$ dans chaque image i ($1 \leq m, n \leq 19$ et $1 \leq i \leq I$). La précision sur les coordonnées de ce nuage de points spatio-temporels est sub-pixel. Ajoutons que les points sont classés dans un ordre ligne-colonne bien déterminé.

Pour chaque rayon lumineux déterminé par ses indices (m, n) , on dispose d'une suite de points $\mathbf{p}_{mni}(x_{mni}, y_{mni})$ avec m, n fixés et $1 \leq i \leq I$. L'ensemble de ces points appartient à la projection du rayon considéré dans le repère image (Fig. 5). Si l'on suppose que le système d'acquisition ne souffre d'aucune distorsion, ces points sont alignés. En terme de stéréovision, ils représentent une droite épipolaire.

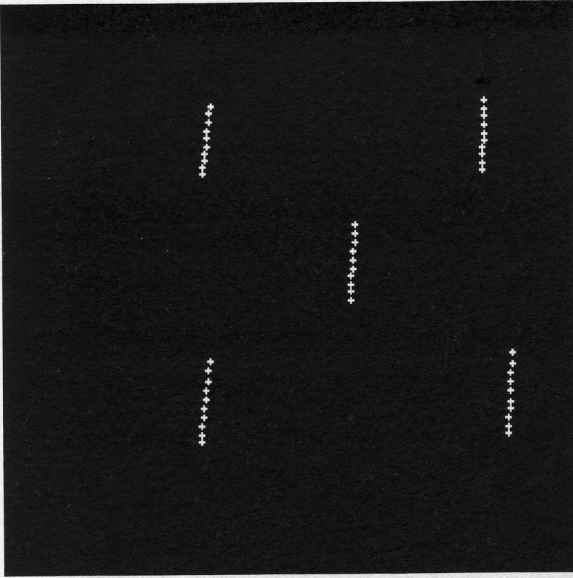


Fig.5 – points intersection de 5 rayons avec le plan mobile sur une séquence de 10 images.

L'effet non linéaire des segments de droite de la figure est dû à la précision d'affichage limitée au pixel bien que chaque point soit connu avec une précision sub-pixel.

Le premier ensemble de paramètres à calculer concerne les coefficients qui régissent l'équation de la courbe passant par les points extraits, et cela pour chacun des 361 rayons. Nous avons posé l'hypothèse que les distorsions de la caméra et de l'objectif sont suffisamment faibles pour approximer chacune de ces courbes par une droite, du moins sous certaines conditions sur lesquelles nous reviendrons. Ainsi, pour chaque rayon, nous calculons l'équation de la droite Δ_{mn} supportant sa projection dans l'image. On a

$${}_{mn} : y_{mni} = A_{mn} \cdot x_{mni} + B_{mn} \cdot (Eq. 1)$$

A_{mn} et B_{mn} sont obtenus en utilisant une minimisation aux moindres carrés. Si $d(\mathbf{p}_{mni}, \Delta_{mn})$ est la distance minimale entre le point \mathbf{p}_{mni} et la droite Δ_{mn} , alors A_{mn} et B_{mn} proviennent de l'équation suivante :

$$\min_{A_{mn}, B_{mn}} \left(\sum_i d^2(\mathbf{p}_{mni}, \Delta_{mn}) \right) \cdot (Eq. 2)$$

Voyons maintenant l'erreur due à cette approximation. Tout d'abord, parmi les différents jeux de calibration sur lesquels nous avons travaillé, nous n'avons noté aucune différence au niveau des erreurs mesurées. En conséquence, nous avons choisi de ne présenter dans cet article que les résultats propres à une séquence de calibration. La figure 6 représente la valeur absolue de la distance de cinq droites avec les cinq fois I points ayant permis leur calcul. Ces droites

représentent la projection du rayon central et des quatre rayons formant les angles du réseau laser matriciel. Ils sont représentatifs de l'ensemble des rayons. Les points ayant permis au calcul de la droite apparaissent d'ailleurs dans la figure 5. Sur l'ensemble des 361 rayons, la valeur moyenne de la valeur absolue de cette distance est de 0,08 pixels alors que la valeur maximale est égale à 0,34 pixels. Ces résultats valident le choix d'approcher la projection des rayons dans l'image par une droite. Toutefois, cette hypothèse n'est valable que pour l'approximation d'une partie de chaque rayon, située entre les plans Π_0 et Π_1 . En effet, en s'éloignant de cette zone, il est très probable que les distorsions de l'image ne permettent plus d'utiliser la droite comme modèle des rayons projetés. Mais les deux plans Π_0 et Π_1 ayant été choisis de manière à englober complètement la scène à analyser *a posteriori*, cette contrainte n'est en aucun cas restrictive.

On peut noter qu'un système d'acquisition sans distorsion impliquerait une intersection de l'ensemble de ces droites en un point unique, la projection du point émetteur de la diode. Le système utilisé n'étant pas parfait, cette remarque n'est pas complètement vérifiée sur nos jeux d'essais.

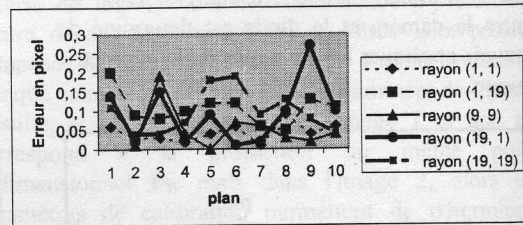


Fig.6 – erreurs sur la modélisation de la projection des rayons par une droite.

Chaque courbe est liée à un rayon. Elle représente la distance de la droite calculée supportant la projection du rayon aux dix points ayant permis son calcul.

Le deuxième paramètre de calibration à déterminer est la fonction F_{mn} régissant pour chaque rayon m, n la profondeur en Z du plan Π en fonction de la position curviligne de la tache lumineuse \mathbf{p}'_{mni} sur la droite Δ_{mn} . \mathbf{p}_{mni} n'étant pas exactement sur la droite Δ_{mn} , on utilise \mathbf{p}'_{mni} qui est la projection orthogonale de \mathbf{p}_{mni} sur cette droite. F_{mn} existe puisqu'à chaque tache \mathbf{p}'_{mni} dans une image correspond une profondeur Z_i connue (par exemple, $F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni})=0$, $F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni})$ =distance entre Π_0 et Π_1). On doit avoir

$$F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni}) = Z_i \cdot (Eq. 3)$$

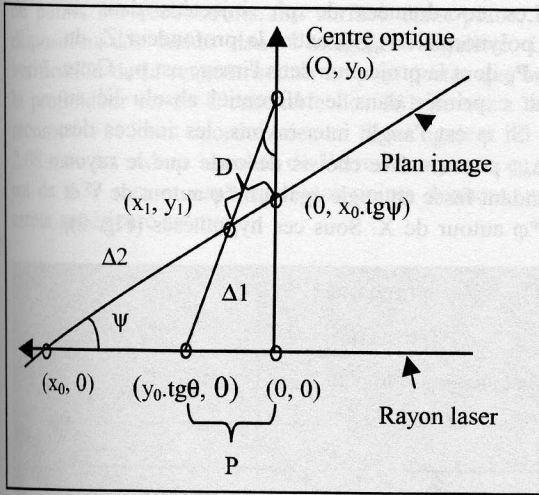


Fig. 7 - Schéma de projection d'un rayon laser sur le plan image.

La figure précédente (Fig. 7) représente la transformation qui relie une distance Diff mesurée en pixel dans une image à Prof la distance tridimensionnelle correspondante. L'équation du plan image dans le référentiel utilisé est :

$$\Delta 2: x \cdot \text{tg} \psi + y - x_0 \cdot \text{tg} \psi = 0. \quad (\text{Eq. 4a})$$

L'équation de la droite modélisant la projection d'un point de coordonnées $(y_0 \cdot \text{tg} \theta, 0)$ dans l'image est donnée par :

$$\Delta 1: x + y \cdot \text{tg} \theta - y_0 \cdot \text{tg} \theta = 0. \quad (\text{Eq. 4b})$$

Les coordonnées (x_1, y_1) du point intersection des deux droites décrites précédemment sont :

$$x_1 = \frac{(x_0 \cdot \text{tg} \psi - y_0) \cdot \text{tg} \theta}{(\text{tg} \psi \cdot \text{tg} \theta - 1)}, \quad (\text{Eq. 5a})$$

$$y_1 = \frac{(y_0 \cdot \text{tg} \theta - x_0) \cdot \text{tg} \psi}{(\text{tg} \psi \cdot \text{tg} \theta - 1)} \quad (\text{Eq. 5b})$$

La distance Diff est alors égale à :

$$\text{Diff} = \frac{(\text{tg} \theta \cdot (x_0 \cdot \text{tg} \psi - y_0) \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \psi})}{(\text{tg} \psi \cdot \text{tg} \theta - 1)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Pour un rayon laser donné, x_0 , y_0 et ψ sont des constantes. Cela signifie que l'équation précédente peut s'écrire de la façon suivante :

$$\text{Diff} = \frac{S \cdot \text{tg} \theta}{(T \cdot \text{tg} \theta - 1)} \quad (\text{Eq. 7a})$$

ou encore

$$\text{tg} \theta = \frac{\text{Diff}}{(T \cdot \text{Diff} - S)} \quad (\text{Eq. 7b})$$

avec S et T des constantes. Or, à un changement de repère près, Diff correspond à la distance pixel entre

deux points image \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j appartenant à la projection d'un même rayon laser. Prof, quant à lui, représente la distance tridimensionnelle entre les deux points \mathbf{P}_i et \mathbf{P}_j dont les projections apparaissent respectivement dans l'image en \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_j . De plus, Prof est égal à $y_0 \cdot \text{tg} \theta$. On a ainsi montré que la fonction F_{mn} recherchée est du type :

$$F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni}) = \frac{C \cdot d(\mathbf{p}'_{mni}, \mathbf{p}'_{mni1})}{D \cdot d(\mathbf{p}'_{mni}, \mathbf{p}'_{mni1}) + E} \quad (\text{Eq. 8})$$

avec $d(\mathbf{p}_r, \mathbf{p}_s)$ la distance entre les points \mathbf{p}_r et \mathbf{p}_s et C, D et E des constantes. Ceci est l'équation d'un arc d'hyperbole. La courbure locale de cet arc étant relativement faible et pour des raisons de facilité de calcul, nous utilisons, en première approximation, un polynôme de degré deux afin d'approcher F_{mn} avec une bonne précision. F_{mn} est donc de la forme suivante :

$$F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni}) = C_{mn} \cdot d^2(\mathbf{p}'_{mni}, \mathbf{p}'_{mni1}) + D_{mn} \cdot d(\mathbf{p}'_{mni}, \mathbf{p}'_{mni1}) + E_{mn} \quad (\text{Eq. 9})$$

Comme précédemment, nous avons déterminé cette fonction par une minimisation aux moindres carrés :

$$\min_{C_{mn}, D_{mn}, E_{mn}} \left(\sum_i (Z_i - F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni}))^2 \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Nous avons représenté figure 8 l'erreur en Z avec cette fonction de modélisation pour les cinq fois I points \mathbf{p}_{mni} des rayons déjà utilisés. Cette erreur est la différence entre la translation subie par le plan pour l'acquisition i et le résultat de $F_{mn}(\mathbf{p}'_{mni})$. Sur l'ensemble du faisceau, l'erreur moyenne (en valeur absolue) est de 0,19 mm et la valeur maximale vaut 1,26 mm. A noter que cette erreur dépasse 1 mm pour moins de 10 points parmi les $361 \cdot I$ points traités par calibration. A nouveau, ces erreurs sont relativement faibles et valident le choix du polynôme pour la modélisation de F_{mn} .

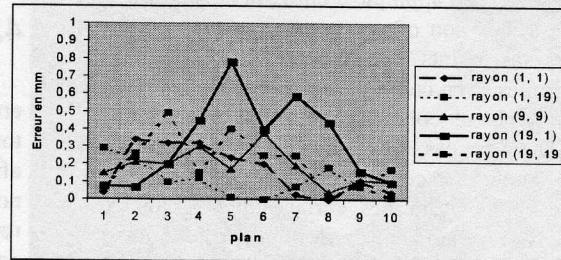


Fig. 8 - erreurs sur la modélisation par un polynôme de degré deux de la profondeur du plan en fonction de l'abscisse curviligne du point sur le rayon projeté.

Finalement, la calibration nous apporte, pour chaque rayon d'indices (m, n) du faisceau :

- les paramètres A_{mn} et B_{mn} de la droite Δ_{mn} modélisant la projection du rayon (m, n) ;
- les paramètres C_{mn} , D_{mn} et E_{mn} de la fonction polynomiale F_{mn} modélisant la profondeur de l'objet intersectant le rayon (m, n) en fonction de la position curviligne de la tache lumineuse sur la droite Δ_{mn} ;
- les coordonnées des deux points \mathbf{p}_{mn1} et \mathbf{p}_{mn2} de la droite Δ_{mn} correspondants respectivement aux plans Π_0 et Π_1 .

3.3. Reconstruction tridimensionnelle

La calibration terminée, voyons maintenant l'utilisation de ces paramètres à des fins de reconstruction tridimensionnelle. Il est naturellement nécessaire d'acquérir une image d'une scène éclairée par la diode laser tout en conservant la configuration du système. Rappelons que la scène doit être comprise entre les plans Π_0 et Π_1 . L'algorithme de détection du centre des taches lumineuses précédemment expliquée est utilisé afin de stocker le centre des taches \mathbf{p}_k apparaissant sur l'image. La phase suivante consiste à associer à chaque tache une droite Δ_{mn} dont l'équation fait partie des 361 calculées au cours de la calibration. Cette association se base sur une heuristique répondant à quatre critères :

- le point \mathbf{p}_k est à une distance de la droite Δ_{mn} inférieure à un seuil fixé ;
- les coordonnées du point \mathbf{p}_k sont situés entre celles des points \mathbf{p}_{mn1} et \mathbf{p}_{mn2} ;
- il n'existe pas d'autre droite $\Delta_{mn'}$ vérifiant les critères (a) et (b) ;
- une droite ne peut être associée qu'à un point maximum.

Ces critères permettent d'associer une droite à une grande majorité de points issus de la détection du centre des taches lumineuses. Après élimination des points et droites associés, on applique à nouveau ce principe aux points et droites non encore associés. Après plusieurs itérations, les points non associés sont considérés comme bruités et en conséquence éliminés. Les critères proposés semblent cohérents pour les objets simples étudiés. Dans ce cas, très peu de points restent non associés. Toutefois, cette heuristique est insuffisante pour des objets ayant des surfaces plus complexes. Cette insuffisance apparaît de façon assez nette lorsque la contrainte d'ordre souvent utilisée dans les systèmes stéréoscopiques n'est pas vérifiée. Nous travaillons actuellement sur une méthode de mise en correspondance point-droite à l'aide des algorithmes génétiques [9].

Si le point \mathbf{p}_k est associé à la droite Δ_{mn} , nous calculons \mathbf{p}'_k , la projection orthogonale de \mathbf{p}_k sur la

droite. Les coordonnées de \mathbf{p}'_k injectées dans la fonction polynomiale F_{mn} donnent la profondeur Z_k du point 3D \mathbf{P}_k dont la projection dans l'image est \mathbf{p}_k . Cette valeur est exprimée dans le référentiel absolu lié au plan Π_0 . Si φ est l'angle inter-rayons, les indices des droites Δ_{mn} peuvent être choisis de sorte que le rayon correspondant fasse un angle égal à $m*\varphi$ autour de Y et égal à $n*\varphi$ autour de X. Sous ces hypothèses (Fig. 9), on a

$$X_k = (L_0 - Z_k) \cdot \tan(m\varphi) \quad (\text{Eq. 11a})$$

$$Y_k = (L_0 - Z_k) \cdot \tan(n\varphi), \quad (\text{Eq. 11b})$$

avec L_0 distance entre le plan Π_0 et l'émetteur laser.

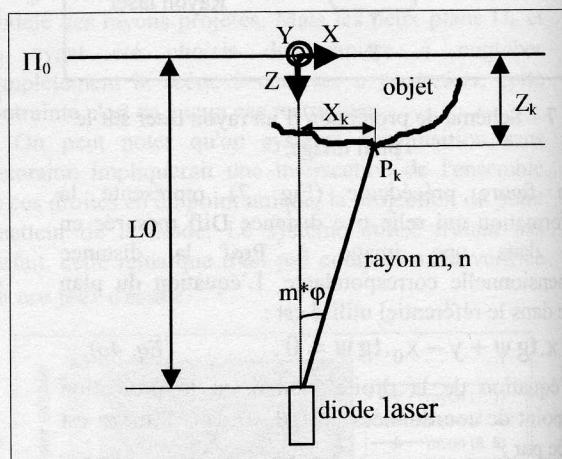


Fig.9 – reconstruction tridimensionnelle

La répétition de cette reconstruction pour chaque tache lumineuse dans l'image donne un nuage de points tridimensionnels \mathbf{P}_k décrivant la surface de l'objet, ou des objets, illuminé(s) par la diode et visible(s) par la caméra. Nous utilisons actuellement un modèle surfacique de type spline [10] pour représenter sous une forme surfacique ce nuage de points.

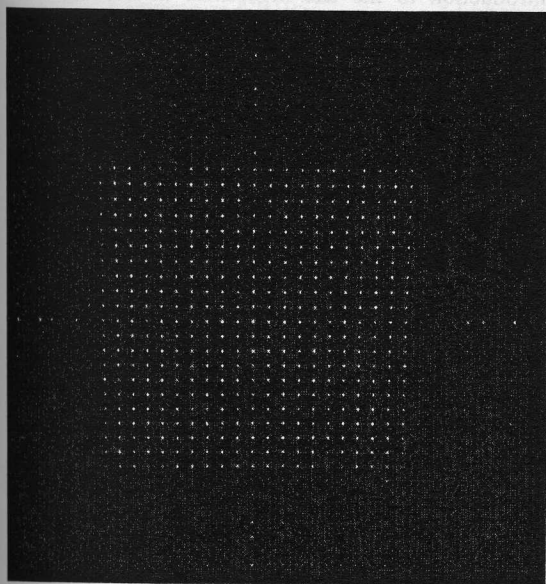
4. Résultats

Parmi la dizaine de jeux de calibration effectués, les erreurs mesurées et présentées dans la section 3.2. sont totalement représentatives des résultats observés. Mais afin de valider complètement la méthode proposée, nous avons choisi de présenter dans ce paragraphe la reconstruction de deux objets dont la forme est parfaitement connue. La précision obtenue au niveau de la reconstruction est un bon indice pour qualifier la calibration.

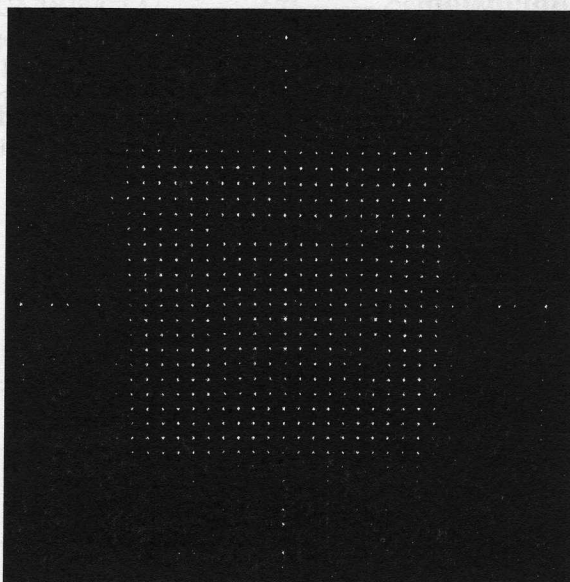
Le premier objet est un plan perpendiculaire au rayon principal et placé à une distance $Z=40$ mm du plan Π_0 . La figure 10a représente l'image acquise et la figure 10b la surface spline obtenue à partir du nuage

de points 3D reconstruits. La surface étant plane, la disposition des taches dans l'image est régulière. La vérification de la reconstruction ne peut porter que sur la profondeur en Z. L'ensemble des 361 points a été reconstruit et leurs coordonnées en Z est égale à 40 ± 2.08 mm. La valeur absolue de l'erreur moyenne en Z est de 0.37 mm et seuls quelques points donnent une erreur supérieure au mm.

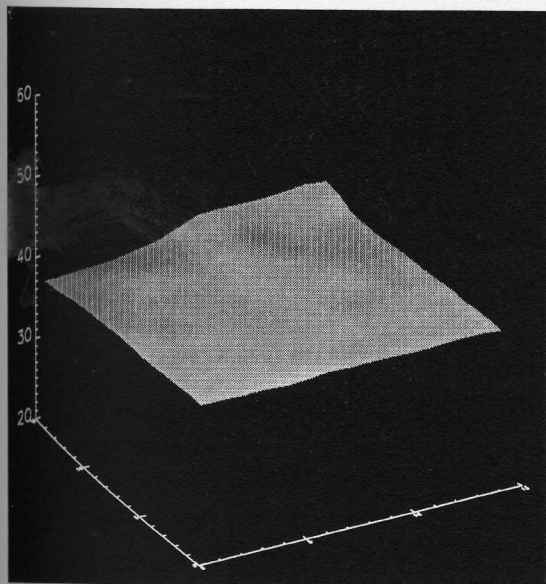
Le second objet est constitué d'un parallélépipède rectangle posé sur un plan de profondeur constante. Son épaisseur réelle est de 38 mm. Les points reconstruits appartenant au parallélépipède (Fig. 11b) à partir de l'image acquise (Fig. 11a) ont une cote en Z de 36 mm avec une erreur moyenne égale à 0.32 mm. L'erreur maximale est de 1.84 mm.



a – image obtenue

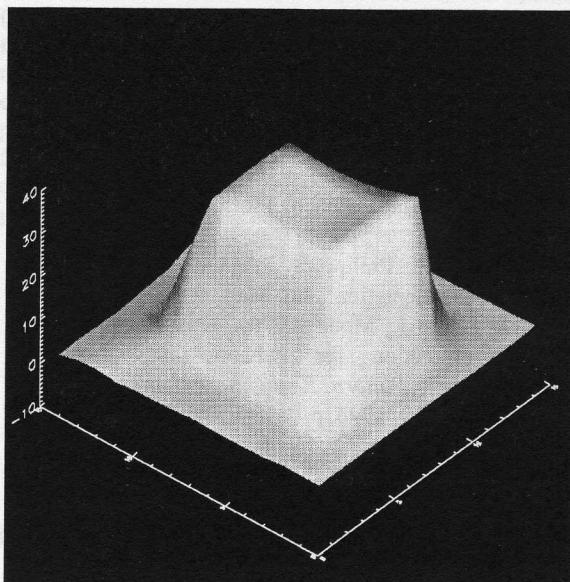


a – image obtenue



b- surface reconstruite

Fig.10 – objet plan



b- surface reconstruite

Fig.11 – objet parallélépipède rectangle

Ces résultats, pris points par points, souffrent d'une certaine imprécision. Toutefois, il est à noter que le nuage de points 3D reconstruits sert de base au calcul d'une surface. Dans notre cas, l'utilisation des splines permet de lisser la surface obtenue et donc réduit l'erreur de reconstruction de l'objet dans son intégralité.

5. Conclusion

La méthode de calibration proposée a été développée dans le but de calibrer un système de stéréovision active. Celui-ci est composé d'une caméra et d'un réseau de rayons laser. La calibration consiste à acquérir une séquence d'images d'un plan motorisé en translation, le plan étant illuminé par le réseau. La projection de chaque rayon apparaît sous forme d'une tache lumineuse dans chacune des images et est ainsi modélisée sous forme d'un segment de droite. De plus, ces segments sont indicés par la profondeur du plan. Les paramètres obtenus suffisent pour reconstruire ultérieurement un nuage de points 3D décrivant la surface d'un objet. Les expériences effectuées ont permis de valider la méthode et ont montré une précision assez correcte au niveau de la reconstruction. Nos travaux portent actuellement sur la quantification de l'erreur apportée par les étapes successives de calibration et de reconstruction. Ce travail devrait permettre l'amélioration de la méthode et ainsi de la précision lors du calcul des coordonnées 3D des points de la surface analysée.

6. Références bibliographiques

- [1] Bouguet J.Y. 3D "Transformations & caméra calibration", California Institute of Technology, Pasadena, 1998.
- [2] Faugeras O., Toscani G. "The calibration problem for stereo", *Computer Vision & Pattern Recognition*, Miami Beach, Florida, 1986, p.15-20.
- [3] Cocquerez J.P., Philipp S. "Analyse d'images : filtrage et segmentation", Ed. Masson, 1995.
- [4] Salvi J., Batlle J., Mouaddib E. "A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement", *Pattern Recognition Letters*, ed. Elsevier, Vol. 19, 1998, p.1055-1065.
- [5] Horaud R., Monga O. "Vision par ordinateur : outils fondamentaux, 2^{ème} édition", Ed. Hermes, 1995.
- [6] Hartley R.I. "Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras", *European Conference on Computer Vision*, 1992, p.579-587.
- [7] Pavlidis T. "Structural pattern recognition", Ed. Springer-Verlag, Heidelberg, 1977.
- [8] Eden M., Unser M., Leonardi R. "Polynomial representation of picture", *Signal Processing*, Vol. 10, 1986, p.385-393.
- [9] Beasley D., Bull D.R., Martin R.R. "An overview of genetic algorithms : part 1, Fundamentals", *University Computing*, Vol. 15, N°2, 1993, p.58-69.
- [10] Bartels R.H., Beatty J.C., Barsky B.A. "Introduction to the use of splines in freeform curve and surface design", *Siggraph*, course note n°4, 1986.

Remerciements : Les auteurs remercient le pôle imagerie de Bourgogne pour son soutien.