

Stéréovision axiale : modélisation et calibrage du système de prises de vues, reconstruction 3D d'objets naturels

Axial Stereovision : Modeling and Calibration of the Optical System, 3D Reconstruction of Natural Objects

par V. RODIN, A. AYACHE

Equipe "Vision Par Calculateur André Bruel", ENSEEIHT - IRIT - URA 1399 CNRS
2, rue Charles Camichel, 31071 Toulouse Cedex
Tél. 61 58 82 72. Fax : 61 58 82 09. e-mail : {rodin,ayache}@enseeiht.fr

Résumé

En stéréovision binoculaire passive, on distingue généralement deux approches : la stéréovision latérale et la stéréovision axiale. Nous présentons ici une étude portant plus particulièrement sur la stéréovision axiale.

Les systèmes axiaux ont été étudiés par de nombreuses équipes de recherche, en raison de leur relative simplicité géométrique qui les rend intéressants pour des applications industrielles, en simplifiant la phase de mise en correspondance. Parmi les systèmes optiques étudiés antérieurement et pouvant être axiaux, nous trouvons :

- une caméra munie d'un zoom,
- une caméra se déplaçant le long de son axe optique.

Dans cet article, nous présentons tout d'abord le modèle géométrique d'un système de stéréovision axiale. Puis nous décrivons une méthode robuste de calibrage d'un tel système de stéréovision. Cette méthode prend en compte le fait que les systèmes optiques décrits ci-dessus ne sont pas strictement des systèmes axiaux : en effet, il subsiste toujours des problèmes mécaniques ne permettant pas un mouvement parfait du centre optique le long de l'axe optique.

En conclusion, nous présentons un algorithme d'appariement permettant de mettre en correspondance des points caractéristiques présents dans les images et rendant ainsi possible la reconstruction d'objets non polyédriques.

Mots clés : appariement, calibrage, mouvement axial, rectification, reconstruction 3D, stéréovision axiale, zoom.

Abstract

In passive binocular stereovision, we generally discern two approaches : the lateral stereovision and the axial stereovision. We present here a study relating more particularly to axial stereovision.

The axial systems have been studied by numerous research teams because of their relative geometrical plainness which makes them interesting for industrial applications, by simplifying the matching phase. Among the optical systems previously studied, and able to be axial, we find :

- a camera with a zoom,
- a camera moving along its optical axis.

In this paper, we first present the geometrical model of an axial stereovision system. Then, we describe a robust calibration method of such a system. This method takes into account the fact that the optical systems described above are not strictly axial because there always remain mechanical problems that do not allow a perfect motion of the optical center along the optical axis.

Finally, we present a matching algorithm allowing to match characteristic points present in the images and making thus possible the reconstruction of non polyhedral objects.

Key words : Axial motion, axial stereovision, calibration, matching, 3D reconstruction, rectification, zoom.

1. Introduction

Bon nombre de chercheurs [2, 9, 15, 18, 27] ont étudié la possibilité offerte par une caméra munie d'un zoom ou se déplaçant sur son axe optique, de retrouver l'information tridimensionnelle d'une scène. La relative simplicité géométrique associée à ces systèmes optiques, rend cette approche intéressante pour des ap-

plications industrielles, en simplifiant la phase de mise en correspondance. Il a en effet été démontré [2] que, dans un système de stéréovision axiale, la probabilité de déterminer de faux appariements est plus faible que dans un système de stéréovision latérale.

Le lecteur intéressé peut trouver dans [2, 14, 20] des études comparatives des systèmes axiaux et latéraux. Ces études montrent que :

- Dans un système axial, la plupart des sources d'ambiguïtés survenant lors de la mise en correspondance sont absentes, par rapport à un système latéral. En effet, les problèmes liés aux occlusions et aux reflets y sont beaucoup moins importants [14] et peuvent facilement être résolus [2].
- Un système de stéréovision axiale est beaucoup plus sensible aux erreurs de mise en correspondance et aux erreurs de calibrage qu'un système de stéréovision latérale [20]. Un autre problème important lié à l'utilisation d'un système axial est la multirésolution. En effet, compte tenu du grossissement visible d'une image à l'autre, le même point 3D n'est pas représenté par un nombre de pixels identique dans chaque image [2]. Cette caractéristique devra être prise en compte lors de la phase d'appariement.

La plupart des études menées sur la stéréovision axiale n'ont été que théoriques (études sur les erreurs induites par l'utilisation d'un tel système [9, 20], appariement sur des images de synthèse [2, 18], ...). Ces études n'ont pas été suivies d'expérimentations réelles, car leurs auteurs n'ont pu décrire de façon pratique un système de stéréovision axiale, à partir d'un zoom ou d'une caméra qui se déplace sur son axe. A notre connaissance, seul J.M.Lavest a pu s'approcher d'un système axial [15], en utilisant un zoom haut de gamme (Angénieux [3] : changement de focale réalisé par translation pure de deux blocs mobiles de lentilles).

Dans cet article, nous présentons une méthode robuste de calibrage d'une caméra :

- soit munie d'un zoom de qualité standard,
- soit se déplaçant sur un axe proche de son axe optique.

Cette méthode repose sur le principe que les systèmes optiques décrits ci-dessus ne sont jamais parfaitement axiaux. Elle a l'avantage de prendre en compte le fait qu'il subsiste toujours des problèmes mécaniques, ne permettant pas un déplacement parfait du centre optique le long de l'axe optique. Nous présentons également les apports de notre méthode par rapport aux méthodes de calibrage existantes.

Après la phase de calibrage, nous introduisons une rectification géométrique qui transforme un système presque axial en un système axial. Ainsi construit, le système permet d'utiliser les propriétés géométriques des systèmes axiaux en simplifiant le calcul des droites épipolaires lors de la phase d'appariement.

Nous présentons ensuite un algorithme de mise en correspondance, permettant d'apparier des points caractéristiques présents dans les images et rendant possible la reconstruction d'objets non polyédriques et naturels.

2. Modèle géométrique d'un système axial

Nous présentons ici le modèle géométrique "général" d'un système de stéréovision axiale. La plupart des études menées

jusqu'alors ne sont que des cas particuliers de ce modèle général [2, 9, 18, 20].

2.1. LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE

Si l'on considère que la distance objets-caméra est grande par rapport aux longueurs focales f_1 et f_2 , le modèle sténopé peut être adopté comme modèle du processus de formation des images. La figure 2.1 représente un système de stéréovision axiale "général" qui peut être considéré comme deux caméras ayant leurs axes optiques confondus, leurs plans image parallèles étant séparés d'une distance ΔZ .

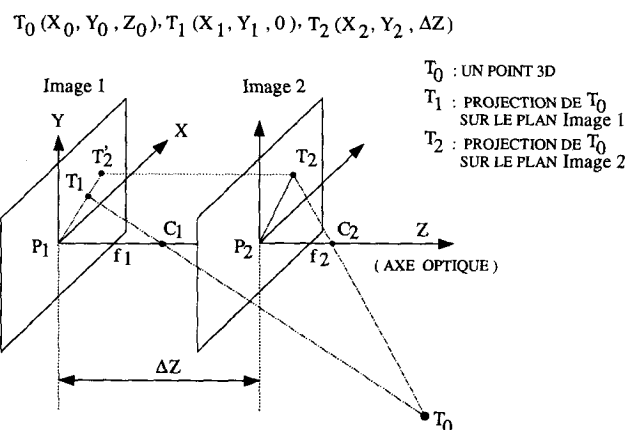


Figure 2.1. - Modèle géométrique d'un système axial.

Dans ce qui suit, nous supposons que l'image 2 apparaît "zoomée" par rapport à l'image 1 et nous appellerons "caméra 1" la caméra ayant saisi l'image 1 et "caméra 2" la caméra ayant saisi l'image 2.

2.2. ESPACE DE RECHERCHE LORS DE L'APPARIEMENT

Des études ont été menées par [2, 8], afin de restreindre l'espace de recherche dans un système axial et donc de diminuer la complexité de la mise en correspondance. Ces études ont permis la démonstration de propriétés géométriques visibles sur la figure 2.1 :

- P_2 , le point principal de l'image 2, se projette orthogonalement en P_1 , point principal de l'image 1, et inversement.
- Tout point situé sur l'axe optique du système axial se projette en P_1 , sur l'image 1, et en P_2 , sur l'image 2.
- Le plan $(T_0 T_1 T_2)$ est perpendiculaire aux plans image et contient les segments $[P_1 T_1]$ et $[P_2 T_2]$. De plus, ces segments sont parallèles et sont contenus dans le même quadrant des images 1 et 2.

- La longueur du segment $[P_2 T_2]$ est au moins égale à celle du segment $[P_1 T_1]$. Ainsi, l'homologue de T_2 est situé sur le segment $[P_1 T'_2]$, T'_2 étant la projection orthogonale de T_2 sur le plan image 1.
- Dans un système axial, les droites épipolaires sont radiales et peuvent être déterminées directement à partir des points principaux. En effet, la droite épipolaire $(P_1 T'_2)$, associée au point T_2 , a même équation que la droite $(P_2 T_2)$. De plus, la droite épipolaire associée à T_1 a la même équation que la droite épipolaire associée à T_2 .
- Le champ de vision de la "caméra 1" recouvre entièrement le champ de vision de la "caméra 2". Ainsi, à quelques rares cas d'occlusion près, tout point de l'image 2 a un homologue sur l'image 1.

A partir de ces propriétés, nous pouvons définir une méthode de résolution du problème de l'appariement dans un système axial définie comme suit :

1. Sélection d'un point T_2 de l'image 2.
2. Recherche de l'homologue de ce point sur le segment $[P_1 T'_2]$ de l'image 1.

2.3. ÉQUATIONS DE TRIANGULATION

Afin d'éviter le renversement des images, il est toujours possible de situer le plan image entre le monde observé et le centre optique (voir figure 2.2).

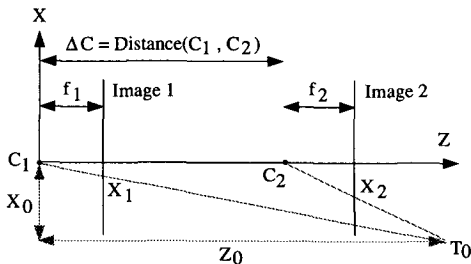


Figure 2.2. - Modèle géométrique réduit aux axes X, Z.

Le repère est ici centré sur C_1 , centre optique de l'image 1.

Pour déterminer les équations de triangulation posons que :

- (X_1, Y_1) sont les coordonnées du projeté de T_0 sur le plan image 1,
- (X_2, Y_2) sont les coordonnées du projeté de T_0 sur le plan image 2,
- X_1, Y_1, X_2 et Y_2 sont exprimés en pixels dans les repères centrés sur les centres de projection, c'est-à-dire C_1 pour l'image 1 et C_2 pour l'image 2.
- $T_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ est exprimé par rapport au repère lié à C_1 , centre optique de l'image 1.

En se limitant aux axes X, Z (voir figure 2.2) nous avons de façon immédiate :

$$\frac{X_1}{f_1} = \frac{X_0}{Z_0} \quad (1)$$

et

$$\frac{X_2}{f_2} = \frac{X_0}{Z_0 - \Delta C} \quad (2)$$

Où ΔC est la distance entre les centres optiques C_1 et C_2 .

A partir de (1) et (2) nous pouvons déduire que :

$$Z_0 = \frac{X_2 f_1 \Delta C}{X_2 f_1 - X_1 f_2} \quad (3)$$

et que

$$X_0 = \frac{X_1 X_2 \Delta C}{X_2 f_1 - X_1 f_2} \quad (4)$$

Il faut remarquer que :

- pour exprimer X_0 en millimètres, il faut multiplier X_0 par dx (la taille d'un pixel en X),
- Z_0 est exprimé en mm,
- le même raisonnement est, bien entendu, applicable aux axes Y, Z.

Ainsi, nous pouvons résumer :

$$X_0 = \frac{X_1 X_2 \Delta C}{X_2 f_1 - X_1 f_2} dx \quad (5)$$

$$Y_0 = \frac{Y_1 Y_2 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2} dy \quad (6)$$

$$Z_0 = \frac{X_2 f_1 \Delta C}{X_2 f_1 - X_1 f_2} = \frac{Y_2 f_1 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2} \quad (7)$$

Nous voyons, à partir des équations obtenues, que X_0, Y_0 et Z_0 ne sont pas définis lorsque $X_2 f_1 - X_1 f_2 = 0$ et $Y_2 f_1 - Y_1 f_2 = 0$.

A partir des équations (1) et (2), nous pouvons déduire que si $\frac{X_1}{f_1} = \frac{X_2}{f_2}$ alors nous avons :

$$\frac{X_0}{Z_0} = \frac{X_0}{Z_0 - \Delta C} \quad (8)$$

Ainsi, $X_2 f_1 - X_1 f_2 = 0 \iff X_0 = 0$ ou $\Delta C = 0$.

Étudions chaque cas plus précisément :

- le cas où $X_0 = 0$ correspond aux points situés sur l'axe optique. Ils sont tels que $X_0 = X_1 = X_2 = 0$.
- le cas où $\Delta C = 0$ montre que le déplacement du centre optique est nécessaire pour calculer la position d'un point dans l'espace. Ainsi, à partir des équations obtenues, nous pouvons dégager trois cas particuliers :
 - Si $X_2 f_1 = X_1 f_2$ et $Y_2 f_1 = Y_1 f_2$: Z_0 non défini
 - Si $X_2 f_1 = X_1 f_2$ et $Y_2 f_1 \neq Y_1 f_2$: $Z_0 = \frac{Y_2 f_1 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2}$ et $X_0 = 0$

– Si $X_2 f_1 \neq X_1 f_2$ et $Y_2 f_1 = Y_1 f_2$: $Z_0 = \frac{X_2 f_1 \Delta C}{X_2 f_1 - X_1 f_2}$ et $Y_0 = 0$

Z_0 n'est donc pas défini pour les points situés sur l'axe optique. De plus, toute une zone se trouvant proche de l'axe optique ne sera pas utilisable car les erreurs de triangulation y seront trop importantes.

A ce propos, des études complètes ont été réalisées dans [8] et dans [20] sur les erreurs de triangulation dans un système de stéréovision axiale. Ces études montrent que :

- Plus un point se projettera près du point principal, plus l'erreur théorique sur le calcul de ce point sera importante (voir figure 2.3).
- Une faible erreur de mise en correspondance ou de calibrage engendre des erreurs importantes sur le calcul de la profondeur, surtout près du point principal (voir figure 2.4).

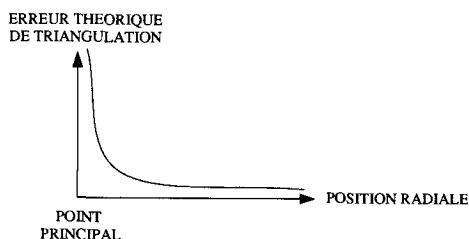


Figure 2.3. – Erreur théorique de triangulation dans un système de stéréovision axiale.

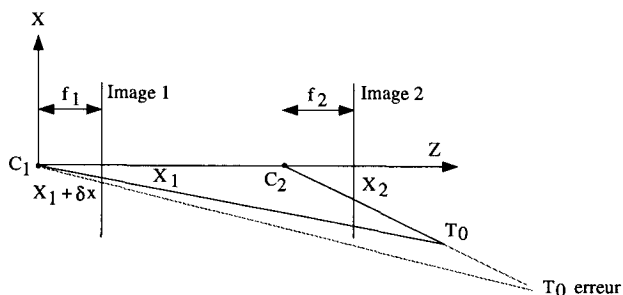


Figure 2.4. – Une faible erreur d'appariement δx engendre des erreurs importantes sur le calcul de l'information tridimensionnelle.

Elles montrent également que l'utilisation d'un ensemble caméra-numériseur haute résolution doit permettre d'augmenter la précision des systèmes de stéréovision axiale, car c'est la distance en pixels par rapport au point principal qui influe sur l'erreur théorique de triangulation.

2.4. SYSTÈMES AXIAUX PARTICULIERS ÉTUDIÉS ANTÉRIEUREMENT

2.4.1. Modèle à "déplacement de caméra"

Ce modèle, étudié par divers auteurs [2, 8, 9, 20], correspond à une caméra qui se déplace sur son axe optique. Ainsi, par rapport

au modèle général, il faut considérer que $f_1 = f_2$. Dans ce cas, on peut remarquer que Z_0 est indépendant de la longueur focale :

$$Z_0 = \frac{X_2 \Delta C}{X_2 - X_1} = \frac{Y_2 \Delta C}{Y_2 - Y_1} \quad (9)$$

2.4.2. Modèle à "plan image fixe"

Ce modèle, étudié par Ma [18], correspond à un modèle général, où les plans image 1 et 2 sont confondus (voir figure 2.5).

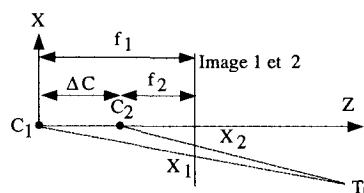


Figure 2.5. – Modèle à "plan image fixe".

Travaillant sur des images de synthèse, il pensait qu'un zoom pouvait se modéliser de cette façon. J.M.Lavest [15] a montré qu'un zoom ne pouvait pas se modéliser ainsi, car on constate que la position du plan image varie lorsque l'on change de focale. Il a trouvé l'explication de ce phénomène par l'étude du modèle de la lentille épaisse. Ainsi, un zoom doit plutôt se modéliser comme un système axial général.

A notre connaissance, aucun système de prise de vues ne peut se modéliser de cette façon. Nous indiquons malgré tout cette modélisation, car elle a été étudiée lors de travaux antérieurs.

2.4.3. Existence ou non-existence de systèmes physiquement axiaux

La question clef de cette partie est de savoir si un système physiquement axial existe. A notre connaissance, les systèmes pouvant être axiaux sont :

- une caméra en mouvement sur un rail ou au bout du bras d'un robot,
- une caméra munie d'un zoom.

Pour qu'une caméra en mouvement forme un système physiquement axial il faut que sa trajectoire soit confondue avec son axe optique. Ceci est possible en théorie. En pratique, le mouvement ne se fait pas parfaitement selon l'axe optique mais s'en approche. En effet, des problèmes mécaniques subsistent toujours et ne permettent pas un mouvement parfait selon l'axe optique.

Dans un zoom de qualité standard, le changement de focale est réalisé par rotation-traduction d'un ou plusieurs blocs de lentilles. Ainsi, deux focales distinctes d'un zoom doivent être considérées comme deux systèmes optiques complètement différents [27]. En effet, il n'y a pas de raison que les axes optiques soient identiques.

La plupart du temps, les systèmes que nous avons considérés (une caméra munie d'un zoom, une caméra en mouvement) ne sont pas des systèmes physiquement axiaux.

Nous proposons donc, dans ce qui suit, une méthode robuste de calibrage qui prend en compte le fait que les systèmes étudiés ne sont pas strictement des systèmes axiaux.

3. Calibrage d'un système de stéréovision axiale

Lors de l'utilisation d'un système de stéréovision axiale, la phase de calibrage est une étape particulièrement importante pour ne pas dire cruciale. En effet, un système de stéréovision axiale est beaucoup plus sensible aux erreurs de calibrage qu'un système de stéréovision latérale [9, 20].

Nous présentons tout d'abord un aperçu des travaux existants dans ce domaine. Puis nous proposons une méthode robuste de calibrage qui ne suppose pas que les systèmes optiques étudiés (caméra munie d'un zoom ou en mouvement) soient purement des systèmes axiaux. Les apports de notre méthode par rapport aux méthodes de calibrage existantes sont présentés.

Nous introduisons ensuite une opération de rectification permettant de se ramener à un système de stéréovision axiale pur à partir d'un système presque axial.

3.1. PRINCIPAUX TRAVAUX EXISTANTS

J.M. Lavest [15] présente le calibrage d'un zoom haut de gamme [3] en vue de la reconstruction 3D. La méthode de calibrage présentée comporte deux phases :

- Détermination des coordonnées dans le repère image du point principal, en utilisant les propriétés des points de fuite en projection perspective [17]. Pour cela, il prend des images d'une grille à des focales différentes. Ainsi, si le centre optique se déplace sur l'axe optique, il pense calculer de façon simple et robuste l'intersection de l'axe optique et du plan image.

- Une fois le point principal calculé, les autres paramètres de calibrage sont estimés pour chaque focale (focale, centre optique, orientation du plan image).

Cette méthode a l'inconvénient de supposer que le système est physiquement axial pour le calibrer (ce qui semble vérifié dans le cas du zoom utilisé).

K. Tarabanis [25] propose de modéliser un zoom à l'aide du modèle lentille épaisse. Il présente une méthode de calibrage permettant de contrôler les paramètres d'un système optique motorisé (focale, ouverture et mise au point).

Signalons que cette méthode utilise un banc d'expérimentation complexe (microscope, lentille calibrée, illumination par fibres optiques, ...) et que la précision du calibrage n'est pas spécifiée.

A.G. Wiley [27] présente les résultats de calibrage d'une caméra avec deux combinaisons de lentilles différentes. Les expériences

présentées ont été menées dans le cadre de la stéréovision latérale binoculaire, afin de savoir s'il est préférable de doter les caméras de zooms ou d'objectifs simples.

Dans le cadre de la stéréovision axiale, l'intérêt principal des travaux de A.G. Wiley est de montrer, lors du calibrage d'un zoom, que le point principal varie lorsque l'on change de focale. Les auteurs pensent que la variation du point principal est probablement due à un mauvais alignement de l'axe optique par rapport au plan image.

Nous pensons que les variations observées sont plutôt dues au fait qu'un zoom est un système optique complexe.

3.2. RAPPELS SUR LE CALIBRAGE PAR PROJECTION CENTRALE ET CONVENTIONS

Afin de modéliser le processus de formation des images, différents modèles ont été généralement utilisés. Parmi ces modèles, nous trouvons le modèle par projection centrale (appelé également modèle sténopé), le modèle lentille mince et le modèle lentille épaisse. L'équivalence de ces trois modèles a été démontrée dans [8].

Lors de nos expériences, nous avons choisi le modèle par projection centrale, en raison de sa simplicité géométrique.

Réaliser un calibrage par projection centrale consiste à évaluer la transformation C permettant de passer des coordonnées 3D d'un point $P(x_{3d}, y_{3d}, z_{3d})$ de la scène observée, aux coordonnées 2D (x_{2d}, y_{2d}) de l'image de ce point, exprimées dans le repère image. Les coordonnées 2D homogènes sont données ainsi :

$$\begin{pmatrix} w \cdot x_{2d} \\ w \cdot y_{2d} \\ w \end{pmatrix} = C \cdot \begin{pmatrix} x_{3d} \\ y_{3d} \\ z_{3d} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

où C est une matrice de dimension [3,4] appelée matrice de calibrage et définie de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{11} = px.r_{11} + f.dx.r_{21} \\ c_{12} = px.r_{12} + f.dx.r_{22} \\ c_{13} = px.r_{13} + f.dx.r_{23} \\ c_{14} = -px.(r_{11}.lx + r_{12}.ly + r_{13}.lz) - \\ \quad f.dx.(r_{21}.lx + r_{22}.ly + r_{23}.lz) \\ c_{21} = py.r_{11} + f.dy.r_{31} \\ c_{22} = py.r_{12} + f.dy.r_{32} \\ c_{23} = py.r_{13} + f.dy.r_{33} \\ c_{24} = -py.(r_{11}.lx + r_{12}.ly + r_{13}.lz) - \\ \quad f.dy.(r_{31}.lx + r_{32}.ly + r_{33}.lz) \\ c_{31} = r_{11} \\ c_{32} = r_{12} \\ c_{33} = r_{13} \\ c_{34} = -(r_{11}.lx + r_{12}.ly + r_{13}.lz) \end{array} \right. \quad (11)$$

où (voir figure 3.1) :

- (px, py) sont les coordonnées du point principal P dans le repère image.
- $R(r_{ij}; i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3)$ est la matrice de rotation permettant de passer du repère absolu, centré en O , au repère local centré sur le centre optique.
- (lx, ly, lz) sont les coordonnées du centre optique C dans le repère absolu.
- f est la longueur focale ($f = \|\vec{CP}\|$)
- (dx, dy) sont les dimensions d'un pixel.

Le repère local centré en C est tel que (voir figure 3.1) :

- l'axe des X est parallèle aux lignes de l'image,
- l'axe des Y est parallèle aux colonnes de l'image,
- l'axe des Z est orienté vers le plan image.

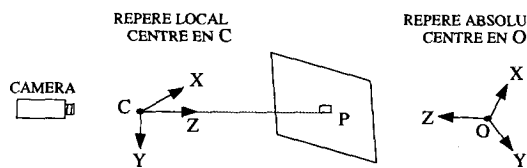


Figure 3.1. – Ensemble repères-caméra dans une modélisation par projection centrale.

3.3. DESCRIPTION DU PROCESSUS DE CALIBRAGE

Pour calibrer un système stéréoscopique, un grand nombre de points non coplanaires, détectables de façon précise, est indispensable. Généralement les paramètres de calibrage sont déterminés par des méthodes d'optimisation, nécessitant des points connus par leurs positions dans l'espace et leurs projections sur le plan image. La coplanarité des points introduit des incohérences lors de l'estimation des paramètres du système.

Afin d'obtenir des points non coplanaires, nous utilisons un ensemble de disques, situés sur des plans approximativement parallèles au plan image et à plusieurs profondeurs. Ces points constituent les données 3D utilisées pour le calibrage et sont connus précisément, car nous utilisons un ensemble de bougies calibrées supportant les disques (voir figure 3.2).

Afin de déterminer l'ensemble des points 2D utilisés pour le calibrage, nous avons calculé le centre des disques sur le plan image, grâce à la méthode proposée dans [21]. Cette méthode, valable lorsque le plan image est presque parallèle à la mire de calibrage, suppose que le centre d'un disque correspond au barycentre de tous ses points intérieurs. La précision de détection est d'environ $1/100^{\text{ème}}$ de pixel.

Afin de prendre en compte le défaut de parallélisme entre le plan image et la mire de calibrage, nous introduisons des erreurs sur les données 3D comme inconnues dans le problème d'estimation de paramètres [1].

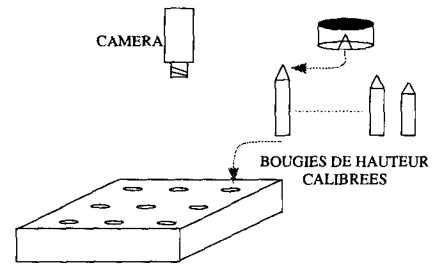


Figure 3.2. – Banc de calibrage et bougies calibrées de hauteurs différentes.

Les points 2D et 3D acquis sont utilisés afin de résoudre l'équation (11), par l'intermédiaire du logiciel OdrPack [5] qui permet de résoudre des problèmes d'estimation de paramètres au sens de la Régression en Distance Orthogonale (ODR). La meilleure précision obtenue sur le modèle mathématique est de l'ordre de $2/100^{\text{ème}}$ de pixel sur le système N.O.I.S.I.V [21].

Au cours de nos expériences, nous avons calibré :

- la caméra en considérant le zoom comme un ensemble de focales discrètes indépendantes,
- la caméra en mouvement en deux positions sur le rail. Ces deux positions correspondent aux butées avant et arrière du rail. La caméra a été calibrée deux fois, car la distance entre les deux butées et la direction du déplacement ne sont pas connues précisément. Il faut signaler que les calibrages sont indépendants l'un de l'autre.

3.4. RÉSULTATS DE CALIBRAGE ET APPORTS DE NOTRE MÉTHODE

Afin d'évaluer les apports de notre méthode de calibrage, nous présentons les résultats de deux expériences réalisées avec un zoom de qualité standard. Pour cela, nous calibrons tout d'abord le zoom pour les focales 15 et 25 mm en utilisant deux méthodes différentes :

- La première, appelée "Méthode 1", comporte deux étapes :
 - Détermination des coordonnées (px, py) des points de fuite [17] à partir d'images, prises à des focales différentes, d'un plan contenant des disques à surfaces mates uniformes.

Remarque : dans un système purement axial, les points de fuite coïncident avec les points principaux. De plus, ils ont les mêmes coordonnées dans chacune des images.
 - Estimation des autres paramètres de calibrage pour chacune des focales. Ici, les coordonnées (px, py) des points principaux sont supposées connues et fixées.
- Cette première méthode suppose donc que le système est axial pour le calibrer.
- La deuxième, appelée "Méthode 2", correspond à notre méthode de calibrage. Elle ne suppose rien sur la nature du système à calibrer : le zoom est calibré indépendamment pour chacune des focales.

Ainsi calibré, le zoom permet de réaliser plusieurs expériences permettant de comparer la qualité des méthodes 1 et 2. Nous avons choisi de comparer notre méthode de calibrage d'un système de stéréovision axiale avec la "Méthode 1", car cette dernière est, à notre connaissance, la seule proposée dans la littérature concernant le calibrage d'un tel système.

Au cours de ces expériences nous utiliserons un ensemble de points 3D de contrôle et leurs projections 2D sur les images prises avec les focales 15 et 25 mm. Signalons que les données de contrôle sont de même nature que les données de calibrage (disque) et qu'elles sont complètement indépendantes de celles-ci.

Les points 3D de contrôle, parfaitement connus, sont situés à environ 90 cm de la caméra. Le volume 3D étudié est égal à $48 \times 40 \times 48 \text{ mm}^3$ et le rapport moyen pixel/mm est de 1.47 environ.

Afin d'être dans les conditions réelles d'utilisation du zoom, les points 2D de contrôle ont été obtenus après repositionnement du zoom sur les positions calibrées.

L'incertitude de repositionnement induit des erreurs au niveau de la détermination des points 2D et donc au niveau du calcul des points 3D.

3.4.1. Résultats de calibrage

Lors du calibrage réalisé avec la "Méthode 1", les coordonnées des points de fuite ont été calculées à partir d'une séquence d'images contenant un ensemble de points caractéristiques de l'espace tridimensionnel.

Pour chaque point caractéristique T, un calcul aux moindres carrés permet de déterminer la droite D_T passant par les projections de T dans chacune des images. Les coordonnées des points de fuite correspondent à l'intersection, au sens des moindres carrés, des droites D_T (voir figure 3.3).

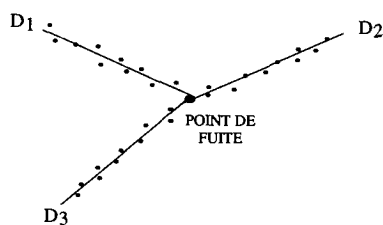


Figure 3.3. – Calcul des points de fuite par approximation aux moindres carrés.

Lors de nos expériences, les coordonnées des points de fuite sont égales à (81.388, 138.501). La distance moyenne entre les points de fuite et les différentes droites D_T est de 0.197 pixels avec un écart type de 0.074 pixels.

Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent, pour chacune des deux méthodes, les résultats de calibrage du zoom pour les focales 15 et 25 mm constructeur.

Tableau 3.1. – Résultats de calibrage obtenus avec la "Méthode 1".

	focale 15 mm	focale 25 mm
l_x (mm)	2.47	2.94
l_y (mm)	22.75	24.63
l_z (mm)	870.34	901.04
α (degrés)	179.86	179.73
β (degrés)	0.63	0.64
γ (degrés)	1.05	0.98
f (mm)	18.79	32.42
px (pixels)	81.39	81.39
py (pixels)	138.50	138.50

Tableau 3.2. – Résultats de calibrage obtenus avec la "Méthode 2".

	focale 15 mm	focale 25 mm
l_x (mm)	0.24	2.59
l_y (mm)	21.65	22.72
l_z (mm)	862.51	911.97
α (degrés)	180.66	180.29
β (degrés)	0.65	0.64
γ (degrés)	1.42	0.72
f (mm)	18.62	32.88
px (pixels)	83.46	75.79
py (pixels)	139.38	122.33

Où :

- (l_x, l_y, l_z) sont les coordonnées du centre optique dans le repère absolu,
- α, β, γ sont les angles définissant la matrice de rotation $R(r_{ij}; i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3)$,
- f est la longueur focale,
- (px, py) sont les coordonnées du point principal dans le repère image.

Nous constatons que dans le tableau 3.2, contrairement au tableau 3.1, la position des points principaux n'est pas identique pour les deux focales.

A partir des résultats de calibrage obtenus, nous présentons dans ce qui suit deux expériences permettant de comparer la qualité des deux méthodes.

3.4.2. Estimation de l'erreur de triangulation

Cette première expérience permet d'évaluer, pour chaque méthode de calibrage, l'erreur moyenne de triangulation à partir d'un ensemble de points 3D de contrôle et de leurs projections sur les images. Rappelons que les données de contrôle sont indépendantes des données de calibrage et qu'elles sont acquises après repositionnement du zoom sur les positions calibrées.

Nous définissons l'erreur de triangulation commise sur un point de contrôle C, comme la distance euclidienne entre ce point et le point calculé par triangulation à partir des projections C_1 et C_2 sur les images.

Le tableau 3.3 présente, pour chaque méthode de calibrage, les erreurs de triangulation obtenues à partir d'un même ensemble de données de contrôle.

Tableau 3.3. – Erreur globale de triangulation sur des données de contrôle.

	“Méthode 1”	“Méthode 2”
Erreur moyenne (mm)	59.46	16.29
Erreur minimale (mm)	2.28	0.53
Erreur maximale (mm)	309.32	39.76
Ecart type (mm)	5.65	3.49

A partir de ce tableau, nous constatons que les erreurs de triangulation sont plus faibles dans le cas de la “Méthode 2” que dans le cas de la “Méthode 1”. L'erreur maximale obtenue dans le cas de la “Méthode 2” peut toutefois sembler importante. Elle correspond à l'erreur commise sur le calcul d'un point 3D se projetant près du point principal.

Cette première expérience montre donc clairement la supériorité de notre méthode sur la “Méthode 1”, lors du calibrage d'un zoom de qualité standard.

3.4.3. Estimation de la distance à la droite épipolaire

Cette expérience a pour but de déterminer, pour l'ensemble des points de contrôle, la distance moyenne à la droite épipolaire. Pour tout point de contrôle C , cette distance sera calculée à partir de ses projections C_1 et C_2 et des matrices de calibrage. Elle correspond à la distance d entre l'homologue C_2 du point C_1 et la droite épipolaire DC_1 associée à C_1 (voir figure 3.4).

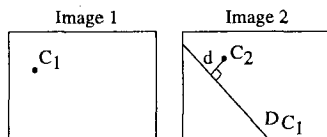


Figure 3.4. – Distance d entre l'homologue C_2 d'un point C_1 et la droite épipolaire DC_1 associée à C_1 .

Le tableau 3.4 présente les résultats de cette expérience en considérant trois cas différents pour le calcul des droites épipolaires :

– 1er cas : Les droites épipolaires sont calculées à partir des matrices de calibrage obtenues par la “Méthode 1”.

– 2ème cas : Les droites épipolaires sont calculées en supposant que le système obtenu par la “Méthode 1” est purement axial. Dans un tel système, elles peuvent être déterminées directement à partir des points principaux P_1 et P_2 , car ceux-ci ont les mêmes coordonnées dans les images [2, 9]. Ainsi, la droite épipolaire associée à un point C_1 a même équation que la droite $(C_1 P_1)$ (voir figure 3.5).

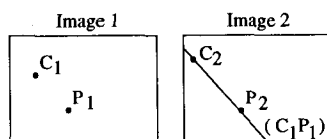


Figure 3.5. – Calcul des droites épipolaires dans un système purement axial.

– 3ème cas : Les droites épipolaires sont calculées à partir des matrices de calibrage obtenues par la “Méthode 2”.

Tableau 3.4. – Distance à la droite épipolaire.

	“Méthode 1”	“Méthode 1” et modèle axial	“Méthode 2”
Distance moyenne (pixels)	0.093	0.191	0.084
Distance minimale (pixels)	0.000	0.003	0.009
Distance maximale (pixels)	0.531	0.666	0.228
Ecart type (pixels)	0.078	0.123	0.035

A partir de ce tableau, nous remarquons que la distance moyenne à la droite épipolaire est plus faible dans le cas de la “Méthode 2” que dans tous les autres cas. La distance moyenne est d'environ 0.2 pixels si l'on considère que le zoom est un système purement axial.

De plus, dans les deux premiers cas, la distance maximale à la droite épipolaire est supérieure à 0.5 pixels. Ceci montre que considérer le zoom comme un système physiquement axial peut induire des erreurs importantes sur le calcul des droites épipolaires. Les erreurs d'appariement peuvent donc être importantes et engendrer de fortes erreurs de triangulation [9, 20].

Cette expérience montre que notre méthode de calibrage est plus précise que la “Méthode 1” pour le calcul des droites épipolaires. Notre méthode permettra donc une mise en correspondance beaucoup plus sûre et précise.

3.4.4. Conséquences

A partir des résultats des expériences précédentes, nous constatons qu'un zoom de qualité standard ne semble pas être un système de stéréovision axiale pur. Il doit se modéliser comme un système de stéréovision “classique”, car il subsiste toujours des problèmes mécaniques ne permettant pas un mouvement parfait du centre optique le long de l'axe optique.

3.5. RECTIFICATION D'IMAGES “PSEUDO-AXIALES” AFIN D'OBTENIR DES IMAGES AXIALES

Nous proposons une méthode de rectification [24] permettant d'obtenir un vrai système de stéréovision axiale, par rectification géométrique à partir d'un système “presque” axial. Signalons que cette rectification n'est en rien indispensable, car elle n'est utilisée que lors de la phase d'appariement afin de :

- simplifier le calcul des droites épipolaires lorsque celui-ci intervient trop souvent,
- utiliser les propriétés de l'espace de recherche d'homologues dans les systèmes de stéréovision axiaux.

La rectification proposée va transformer deux images “presque” axiales en deux images axiales.

Supposons tout d'abord que nous ayons calibré :

- soit un zoom de qualité standard pour deux focales particulières,
- soit une caméra en deux positions différentes sur son rail.

Ce calibrage étant réalisé par estimation de paramètres, nous avons deux matrices de calibrage M et N modélisant les systèmes de prise de vues (voir figure 3.6.a).

M (resp. N) est définie par :

- le centre optique C_1 (resp. C_2), connu par ses coordonnées dans le repère absolu,
- le plan de projection P_M (resp. P_N),
- le point principal P_1 (resp. P_2), connu par ses coordonnées (px_1, py_1) (resp. (px_2, py_2)) dans le repère image,
- la focale f_1 (resp. f_2).

Le principe de rectification que nous proposons définit deux nouvelles matrices M' et N' conservant respectivement les deux centres optiques C_1 et C_2 , mais modifiant les plans de projection, de façon à obtenir un système axial (voir figure 3.6.b). L'idée principale de notre rectification est que l'axe optique du système axial formé par M' et N' sera la droite 3D passant par les centres optiques de M et N (C_1 et C_2).

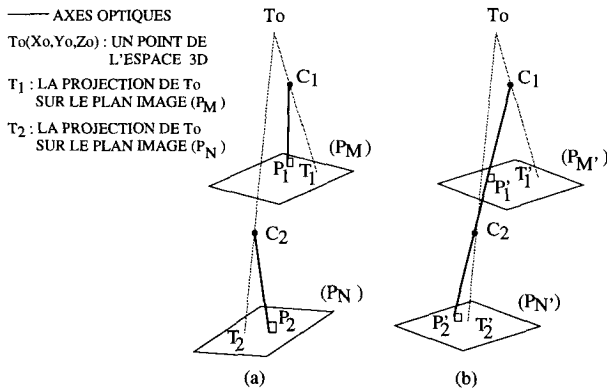


Figure 3.6. – Modèles des systèmes de prise de vues avant rectification (a) et après rectification (b).

Notons que cette technique de rectification d'images a déjà été proposée dans le cadre de la stéréovision latérale [4, 13]. En effet, elle permet dans ce cas d'obtenir un système où les axes optiques sont parallèles.

3.5.1. Contraintes sur les nouvelles matrices de calibrage

Précisons les contraintes sur les nouvelles matrices M' et N' à partir des matrices M et N :

1. les centres optiques C_1 et C_2 restent inchangés.
2. si $P_{M'}$ est le plan focal de M' et $P_{N'}$ est le plan focal de N' , alors on doit avoir $P_{M'} \parallel P_{N'}$.

3. si $P_{1'}$ est la projection orthogonale de C_1 sur $P_{M'}$ et $P_{2'}$ est la projection orthogonale de C_2 sur $P_{N'}$ ($P_{1'}$ et $P_{2'}$ sont les points principaux), alors on doit avoir $C_1, C_2, P_{1'}$ et $P_{2'}$ alignés (ces points sont sur l'axe optique du système axial).

On peut remarquer que 2.) est une conséquence de 3.) et que si on ne veut pas changer les focales, on doit avoir :

$$\|\overrightarrow{C_1 P_{1'}}\| = \|\overrightarrow{C_1 P_1}\| = f_1 \text{ et } \|\overrightarrow{C_2 P_{2'}}\| = \|\overrightarrow{C_2 P_2}\| = f_2 \quad (12)$$

3.5.2. Détermination des nouvelles matrices

Pour déterminer les matrices M' et N' , à partir de M et N, nous allons déterminer les paramètres px, py, f, R, lx, ly et lz de chaque matrice. Pour chacune des matrices M' et N' nous connaissons :

- f (la longueur focale reste inchangée),
- lx, ly, lz (même centre optique avant et après rectification),
- px, py (ils seront identiques dans les deux matrices et peuvent être déterminés arbitrairement comme nous le verrons plus loin).

Il reste donc à déterminer la matrice de rotation R qui doit être identique dans les matrices M' et N' (car $P_{M'} \parallel P_{N'}$).

Dans ce qui suit, nous utilisons deux repères différents (voir la figure 3.1) :

- un repère local, centré sur le centre optique,
- le repère absolu de la scène.

3.5.2.1. Détermination de la matrice de rotation R

Pour déterminer la matrice de rotation R, nous ne considérons que la matrice de calibrage M' . En effet M' et N' ont la même matrice de rotation, R.

Nous chercherons tout d'abord l'expression du plan focal de M' . Puis nous calculerons les coefficients de la matrice de rotation R.

a. Détermination du plan $P_{M'}$

Pour déterminer le plan $P_{M'}$, nous chercherons un vecteur normal à ce plan et un point de ce plan.

a.1. Détermination d'un vecteur normal à ce plan

Le vecteur $\overrightarrow{C_1 P_{1'}}$ est tout naturellement un vecteur normal au plan $P_{M'}$. Le point C_1 étant connu, il faut déterminer le point $P_{1'}$ qui est tel que :

- $P_{1'}$ se trouve sur la droite $(C_1 C_2)$,
- $\|\overrightarrow{C_1 P_{1'}}\| = f_1$ où f_1 est la focale associée à la matrice M (afin de conserver la longueur focale).

Ainsi, nous avons :

$$\overrightarrow{O P_{1'}} = \overrightarrow{O C_1} + t \overrightarrow{C_1 C_2} \quad (13)$$

et

$$\|\overrightarrow{C_1 P_1'}\| = f_1 \quad (14)$$

A partir de (13) et (14) on peut déduire que :

$$\overrightarrow{O P_1'} = \overrightarrow{O C_1} \pm \frac{f_1}{\|\overrightarrow{C_1 C_2}\|} \overrightarrow{C_1 C_2} \quad (15)$$

Une seule valeur du point P_1' est à considérer (cette valeur dépend de la position du plan image par rapport au centre optique). Nous avons donc les coordonnées 3D du point P_1' : $\begin{pmatrix} P_1'x \\ P_1'y \\ P_1'z \end{pmatrix}$ (dans le repère absolu).

a.2. Détermination d'un point de ce plan

Par construction, nous savons que P_1' appartient à $P_{M'}$.

a.3. Expression du plan $P_{M'}$

Maintenant, le plan $P_{M'}$ est parfaitement défini, puisque nous connaissons un vecteur normal à ce plan et un point de ce plan.

Ainsi, à partir du vecteur $\overrightarrow{C_1 P_1'} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$ et du point $P_1' \begin{pmatrix} P_1'x \\ P_1'y \\ P_1'z \end{pmatrix}$,

l'équation du plan s'écrit :

$$x_1.X + y_1.Y + z_1.Z - (P_1'x.x_1 + P_1'y.y_1 + P_1'z.z_1) = 0 \quad (16)$$

A partir du plan focal $P_{M'}$, nous allons déterminer la matrice de rotation R .

b. Calcul de la matrice de rotation R

La matrice de rotation R ainsi que lx, ly, lz permettent de passer du repère absolu au repère local et inversement. Dans le cas du passage du repère local au repère absolu nous avons, en coordonnées homogènes :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{local} \\ Y_{local} \\ Z_{local} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{absolu} \\ Y_{absolu} \\ Z_{absolu} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Dans ce qui suit, nous allons déterminer les coefficients r_{ij} . Ceci revient à évaluer l'orientation du nouveau repère local.

b.1. Calcul de r_{31}, r_{32}, r_{33}

Dans le nouveau repère local, P_1' s'écrit : $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 \end{pmatrix}$ car P_1' est

le point principal du nouveau système. Connaissant P_1' dans le repère local et dans le repère absolu, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1'x \\ P_1'y \\ P_1'z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

On a de façon immédiate :

$$\begin{cases} r_{31} = \frac{P_1'x - lx}{f_1} \\ r_{32} = \frac{P_1'y - ly}{f_1} \\ r_{33} = \frac{P_1'z - lz}{f_1} \end{cases} \quad (19)$$

b.2. Calcul de r_{11}, r_{12}, r_{13}

Connaissant l'équation du plan $P_{M'}$, il est toujours possible de déterminer un point X_p ($X_p \neq P_1'$) appartenant à ce plan. Soient

$\begin{pmatrix} X_{px} \\ X_{py} \\ X_{pz} \end{pmatrix}$ les coordonnées de X_p dans le repère absolu. Le point

X_p choisi détermine la nouvelle orientation des lignes de l'image (le vecteur $P_1'X_p$ est parallèle au nouvel axe des X).

Dans le repère local, le point X_p aura pour coordonnées :

$$\begin{pmatrix} \|\overrightarrow{P_1'X_p}\| \\ 0 \\ f_1 \end{pmatrix}.$$

Connaissant X_p dans le repère local et dans le repère absolu, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \|\overrightarrow{P_1'X_p}\| \\ 0 \\ f_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{px} \\ X_{py} \\ X_{pz} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

On a de façon immédiate :

$$\begin{cases} r_{11} = \frac{X_{px} - lx - r_{31} f_1}{\|\overrightarrow{P_1'X_p}\|} \\ r_{12} = \frac{X_{py} - ly - r_{32} f_1}{\|\overrightarrow{P_1'X_p}\|} \\ r_{13} = \frac{X_{pz} - lz - r_{33} f_1}{\|\overrightarrow{P_1'X_p}\|} \end{cases} \quad (21)$$

b.3. Calcul de r_{21}, r_{22}, r_{23}

Pour le moment, nous avons déterminé P_1' et X_p qui sont tels que $\overrightarrow{C_1 P_1'} \perp \overrightarrow{P_1' X_p}$. Pour déterminer le nouvel axe des Y, il faut calculer le vecteur $\overrightarrow{P_1' Y_p}$ tel que :

$$\overrightarrow{C_1 P_1'} \perp \overrightarrow{P_1' Y_p} \text{ et } \overrightarrow{P_1' X_p} \perp \overrightarrow{P_1' Y_p} \quad (22)$$

Ce vecteur détermine la nouvelle orientation des colonnes de l'image, puisqu'il est parallèle au nouvel axe des Y.

Les points $P_{1'}$, X_p et C_1 étant parfaitement définis, Y_p est également défini puisque

$$\overrightarrow{P_{1'}Y_p} = \overrightarrow{P_{1'}X_p} \wedge \overrightarrow{C_1P_{1'}} \quad (23)$$

Soient $\begin{pmatrix} Y_{px} \\ Y_{py} \\ Y_{pz} \end{pmatrix}$ les coordonnées de Y_p dans le repère absolu.

Dans le repère local, le point Y_p aura pour coordonnées :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \|\overrightarrow{P_{1'}Y_p}\| \\ f_1 \end{pmatrix}.$$

Connaissant Y_p dans le repère local et dans le repère absolu, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \|\overrightarrow{P_{1'}Y_p}\| \\ f_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{px} \\ Y_{py} \\ Y_{pz} \end{pmatrix} \quad (24)$$

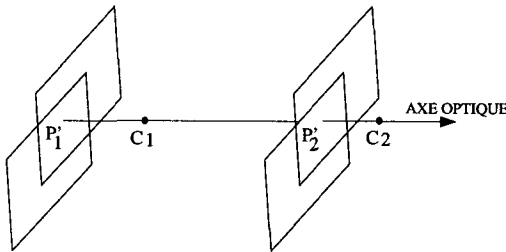
On a de façon immédiate :

$$\begin{cases} r_{21} = \frac{Y_{px} - lx - r_{31} f_1}{\|\overrightarrow{P_{1'}Y_p}\|} \\ r_{22} = \frac{Y_{py} - ly - r_{32} f_1}{\|\overrightarrow{P_{1'}Y_p}\|} \\ r_{23} = \frac{Y_{pz} - lz - r_{33} f_1}{\|\overrightarrow{P_{1'}Y_p}\|} \end{cases} \quad (25)$$

Nous avons donc calculé la matrice de rotation R. Ainsi, si on fixe les coordonnées (px, py) du point principal, les matrices de calibrage M' et N' sont parfaitement définies. Maintenant, nous allons étudier les raisons pour lesquelles le point principal peut être fixé arbitrairement.

3.5.2.2. Choix arbitraire de px et py

Les points $P_{1'}$ et $P_{2'}$ sont désormais fixés dans l'espace 3D. Ainsi, les coordonnées image du point principal peuvent être fixées arbitrairement. En effet une modification de px et py ne fait que déplacer l'image sur le nouveau plan de projection (voir figure 3.7).



3.7. – Le point principal peut être déterminé arbitrairement.

Nous déterminons les coordonnées du point principal à partir de $E_1 \begin{pmatrix} ex_1 \\ ey_1 \end{pmatrix}$, épipôle de l'image 1 et de $E_2 \begin{pmatrix} ex_2 \\ ey_2 \end{pmatrix}$, épipôle de l'image 2, de la façon suivante :

$$\begin{cases} px = \frac{ex_1 + ex_2}{2} \\ py = \frac{ey_1 + ey_2}{2} \end{cases} \quad (26)$$

Bien entendu, d'autres stratégies de calcul de (px, py) peuvent être envisagées.

3.5.3. Passage des images initiales aux images rectifiées

Les matrices M' et N' étant maintenant déterminées à partir des matrices de calibrage M et N, nous pouvons rectifier chacune des deux images. Pour cela, supposons que :

- I_M (resp. I_N) est l'image initiale associée à la matrice de calibrage M (resp. N),
- $I_{M'}$ (resp. $I_{N'}$) est l'image rectifiée obtenue à partir de l'image I_M (resp. I_N) et des matrices M et M' (resp. N et N'),
- $I_M(x, y)$ (resp. $I_N(x, y)$) est le pixel de coordonnées entières x, y de l'image I_M (resp. I_N), et
- $I_{M'}(x', y')$ (resp. $I_{N'}(x', y')$) est le pixel de coordonnées entières x', y' de l'image rectifiée $I_{M'}$ (resp. $I_{N'}$).

Le calcul de l'image rectifiée $I_{M'}$ est réalisé de la façon suivante :

Pour tous les pixels $I_{M'}(x', y')$ de $I_{M'}$:

- Calcul des coordonnées réelles (x_r, y_r) de l'antécédent de $I_{M'}(x', y')$ dans l'image I_M
- Calcul de la valeur de $I_{M'}(x', y')$ en fonction du voisinage du point de coordonnées réelles (x_r, y_r) de l'image I_M

Bien sûr, le même algorithme s'applique pour le calcul de l'image rectifiée $I_{N'}$.

Les coordonnées réelles (x_r, y_r) s'obtiennent en appliquant aux coordonnées (x', y') une rotation permettant de passer du repère dans la position rectifiée au repère initial :

$$\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix} = MM'^{-1} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Le calcul de la valeur de $I_{M'}(x', y')$ en fonction du voisinage du point de coordonnées réelles (x_r, y_r) de l'image I_M pose le problème du rééchantillonnage de l'image. Afin de résoudre ce problème, nous approchons la formule tronquée de Witter-Shannon [12] sur un 16-voisinage du point de coordonnées réelles (x_r, y_r) par le filtre interpolateur de Nack [19]. Ainsi, $I_{M'}(x', y')$ est égal à :

$$\sum_{X=-1}^2 \sum_{Y=-1}^2 I_M(x_e + X, y_e + Y) N(x_r - x_e - X) N(y_r - y_e - Y) \quad (28)$$

où :

– $(x_e, y_e) = ([x_r], [y_r])$ et

– N est le filtre interpolateur proposé par Nack [19] qui réalise une interpolation **cubique** par morceaux [11] du filtre parfait sinc sur l'intervalle $[-2, +2]$. N satisfait à :

$$\begin{aligned} N(0) &= \text{sinc}(0) = 1; & N'(0) &= \text{sinc}'(0) = 1; \\ N(1) &= \text{sinc}(1) = 0; & N'(1) &= \text{sinc}'(1) = -1; \\ N(2) &= \text{sinc}(2) = 0; & N'(2) &= 0 \neq \text{sinc}'(2); \end{aligned} \quad (29)$$

$$N(x) = \begin{cases} x^3 - 2x^2 + 1 & \text{si } x \in [0, 1] \\ -x^3 + 5x^2 - 8x + 4 & \text{si } x \in [1, 2] \\ N(-x) & \text{si } x \in [-2, 0] \end{cases} \quad (30)$$

L'avantage du filtre de Nack par rapport au filtre sinc tronqué est double :

- il est moins coûteux en temps de calcul;
- il simule l'amortissement qui se produit pour le sinc hors de l'intervalle $[-2, +2]$ grâce à la contrainte $N'(-2) = N'(2) = 0$, comme le montre la figure 3.8.

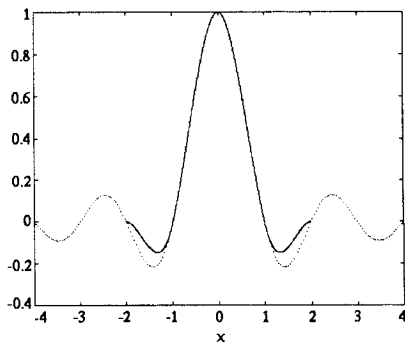


Figure 3.8. – Comparaison SINC – Filtre Interpolateur de NACK.

A partir des données de contrôle utilisées au paragraphe 3.4, nous avons constaté que la rectification introduit en moyenne une erreur inférieure à $1/100$ ^{ème} de mm sur le calcul de l'information tridimensionnelle.

3.5.4. Résultats de la rectification sur un couple d'images

Nous avons appliqué cette rectification à un couple d'images (voir figure 3.9) prises avec la caméra en mouvement sur un rail. Ici, le déplacement considéré est d'environ 20 cm. Nous obtenons les images rectifiées présentées figure 3.10.

Il y a peu de différences visibles entre les deux couples d'images. Néanmoins, nous pouvons constater un décalage de quelques pixels sur le bord gauche des images rectifiées (visible en blanc sur la figure 3.10). Ce décalage n'est pas le même pour l'image de gauche et l'image de droite. Il correspond à la transformation permettant de passer des images initiales aux images rectifiées.

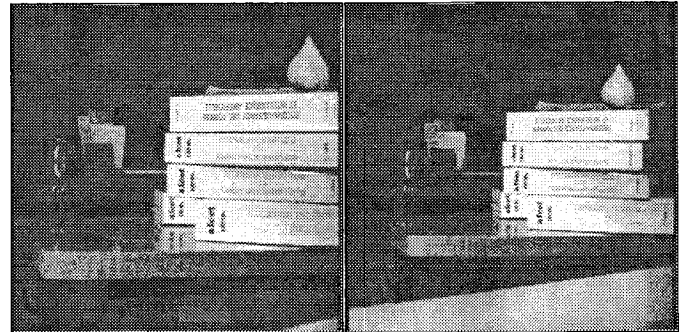


Figure 3.9. – Couple d'images avant rectification.

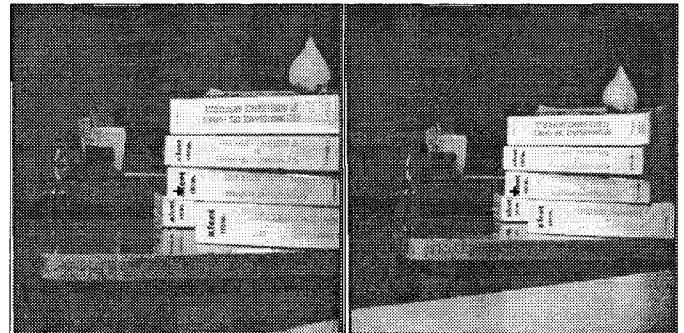


Figure 3.10. – Couple d'images de la figure 3.9 après rectification. La croix représente le point principal du système axial calculé.

4. Appariement et reconstruction 3D dans un système de stéréovision axiale

Dans cette partie, nous donnons tout d'abord un aperçu des travaux effectués sur la mise en correspondance, dans un système de stéréovision axiale. Puis nous présentons une méthode d'appariement, basée sur l'étude des profils d'intensité extraits le long de droites épipolaires qui se correspondent. Pour finir, nous décrivons une expérience permettant de reconstruire un objet naturel. Au cours de cette expérience, la caméra utilisée est munie d'un objectif 16 mm et subit un déplacement d'environ 20 cm sur le rail. Le nombre de pixels par image est de 512×512 et la taille d'un pixel est de $0.017 \times 0.011 \text{ mm}^2$.

Avant de commencer, précisons que la mise en correspondance dans un système axial doit être aussi précise que possible, car une faible erreur d'appariement engendre des erreurs importantes sur le calcul de l'information tridimensionnelle [9, 20], surtout près du point principal. De plus, la multirésolution liée à l'utilisation d'un système axial implique qu'un algorithme d'appariement doit permettre des mises en correspondance avec une précision sous-pixel.

4.1. ETUDE DES TRAVAUX EXISTANTS

Afin de résoudre le problème de la mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale, diverses solutions [2, 8, 18] ont été proposées.

N. Alvertos [2] propose un algorithme de mise en correspondance de points dans les images, basé sur les contraintes géométriques d'un système axial et sur l'étude de la radiance de la scène. Cet algorithme nécessite la connaissance des caractéristiques d'éclairage ainsi que des propriétés de réflectance des objets contenus dans la scène. Il n'est donc applicable qu'à des images de synthèse ou issues d'un environnement industriel contrôlé.

C. Carmona [8] présente deux types de mise en correspondance. Pour cela, il réalise tout d'abord, dans chaque image, une extraction de contours suivie d'une approximation polygonale. Puis, à partir de l'approximation polygonale, il met en œuvre deux méthodes d'appariement : l'une travaillant sur les sommets et l'autre travaillant sur les segments.

J. Ma [18] décrit également deux méthodes de mise en correspondance, utilisées sur des images de synthèse :

- l'une basée sur l'étude du flot optique. Malheureusement, cette méthode n'est valable que pour de faibles changements de longueur focale, et elle est très sensible aux erreurs de détermination du flot optique,
- l'autre approche utilise deux types de mise en correspondance :
 - l'appariement des passages par zéro du laplacien de gaussienne,
 - la mise en correspondance de segments issus de l'approximation polygonale.

Signalons qu'aucune des publications citées précédemment ne fait état d'une reconstruction tridimensionnelle. A notre connaissance, seul J.M.Lavest a pu, dans des conditions très particulières, reconstruire des objets en trois dimensions :

- un cube sur lequel des traits sont dessinés [15],
- un objet de révolution [16]. Dans ce cas, il procède de la façon suivante :
 - détection des contours de l'objet dans chacune des images,
 - à partir des contours obtenus, il localise, dans chaque image, l'axe de révolution,
 - en utilisant les axes de révolution obtenus dans chacune des images, il obtient, par triangulation, l'axe de révolution de l'objet dans l'espace,
 - enfin, il reconstruit l'objet à partir de cet axe de révolution.

Signalons que l'aspect "mise en correspondance" n'a pas été abordé lors de la reconstruction de ces objets.

Aucune des publications présentées ici ne nous a semblé apporter réellement une solution au problème de l'appariement, dans un système de stéréovision axiale. Nous avons donc décidé de mettre en œuvre notre propre méthode de mise en correspondance, en vue de la reconstruction tridimensionnelle.

4.2. NOS MOTIVATIONS ET NOS CHOIX

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3, la mise en correspondance doit être aussi précise que possible, afin de minimiser l'erreur de triangulation, qui peut être très importante dans un système de stéréovision axiale.

Ainsi, il ne nous a pas semblé correct d'utiliser les attributs de régions et de segments afin de résoudre le problème de l'appariement. En effet, ces attributs sont généralement très instables d'une image à l'autre.

Prenons par exemple le cas des segments issus de l'approximation polygonale. Compte-tenu du changement d'échelle d'une image à l'autre, le découpage d'un contour par approximation polygonale ne peut assurer une correspondance bi-univoque entre deux sommets ou deux segments présents dans les images.

A cause de l'instabilité des primitives généralement utilisées, nous avons préféré travailler directement au niveau des profils d'intensité, le long de droites épipolaires conjuguées (voir figure 4.1), sans utiliser d'approximation des contours ou de segmentation en régions.

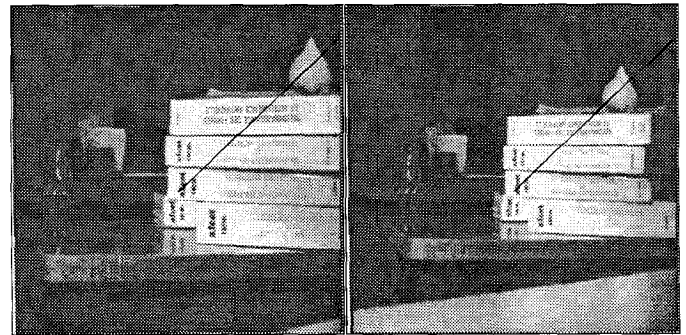


Figure 4.1. - Couple de droites épipolaires sur les images rectifiées.

A titre d'exemple, la figure 4.2 représente les profils extraits le long des droites épipolaires visibles sur le couple d'images rectifiées de la figure 4.1. Signalons que la robustesse de cette primitive est directement liée à la précision du calibrage.

A partir des profils obtenus, nous remarquons que :

- un des deux profils semble "dilaté" par rapport à l'autre,
- le facteur de dilatation n'est pas constant sur toute la longueur des profils car, il dépend de la profondeur à laquelle se trouvent les objets présents dans la scène observée.

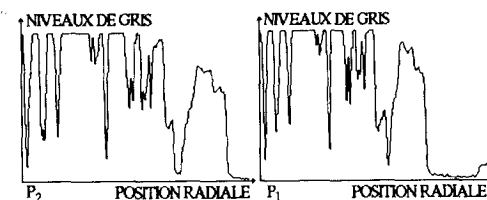


Figure 4.2. - Exemple de profils d'intensité le long des deux droites épipolaires visibles sur les images de la figure 4.1.

- les points principaux P_1 et P_2 se correspondent,
- les profils ont beaucoup de points caractéristiques communs (pics, vallées et points de fort gradient),
- ces profils sont bruités.

Dans ce qui suit, nous proposons une méthode de mise en correspondance réalisée à partir des profils d'intensité.

4.3. MÉTHODE DE MISE EN CORRESPONDANCE DANS UN SYSTÈME DE STÉRÉOVISION AXIALE

L'idée principale de notre méthode d'appariement est d'étudier les profils d'intensité le long de deux droites épipolaires qui se correspondent. Cette étude doit permettre d'apparier des points caractéristiques (pics, vallées, points de fort gradient) de ces profils.

Le processus d'appariement comporte deux phases principales :

- un filtrage réalisé grâce à une variante du filtre médian : le "filtre médian seuillé",
- une mise en correspondance à partir des profils "débruités".

4.3.1. Filtrage des profils d'intensité

Nous proposons un processus de filtrage des profils d'intensité basé sur une variante du filtre médian : le filtre médian "seuillé" [23]. Cette variante a la propriété de lisser les profils d'intensité, tout en conservant les impulsions étroites et significatives de ces profils. Cette propriété est fondamentale, car nous proposons un algorithme d'appariement des pics et des vallées des profils d'intensité.

Le filtre médian, introduit pour la première fois dans [26], a été très largement utilisé afin de réduire le bruit d'un signal mono ou bidimensionnel. L'utilisation fréquente de ce filtre s'explique par sa simplicité, son efficacité et sa conservation des contours. Dans [6], le lecteur peut trouver une étude très complète concernant les conséquences de l'application de ce filtre sur l'estimation et la préservation des contours.

Le "filtre médian seuillé" est défini à partir du filtre médian de la façon suivante :

Soit X un ensemble fini de variables aléatoires tel que :

$X = (X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_{2m+1}, m \geq 0$. Nous pouvons associer à X un vecteur $X_{(.)}$ tel que :

$$X_{(.)} = (X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(m)}, \dots, X_{(2m+1)}), \quad (31)$$

où $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(m)} \leq \dots \leq X_{(2m+1)}$

Ainsi, la valeur médiane "classique" de X est, rappelons-le, $X_{(m)}$. La valeur médiane "seuillée" V_{ms} est définie à partir de $X_{(m)}$ comme suit :

$$V_{ms} = \begin{cases} X_m & \text{Si } |X_m - X_{(m)}| \geq \text{Seuil} \\ X_{(m)} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (32)$$

Les résultats de l'application de ce filtre sur les profils bruités de la figure 4.2 sont présentés figure 4.3.

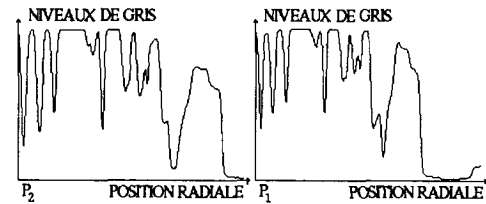


Figure 4.3. - Profils de la figure 4.2 après filtrage.

Sur les profils "débruités" de la figure 4.3, nous constatons que de nombreux points communs sont facilement détectables.

4.3.2. Mise en correspondance à partir des profils filtrés

A partir des profils filtrés, nous proposons un algorithme de mise en correspondance comportant deux phases essentielles : un appariement des points de fort gradient et un appariement des pics et des vallées.

La figure 4.4 représente l'organisation de notre algorithme de mise en correspondance.

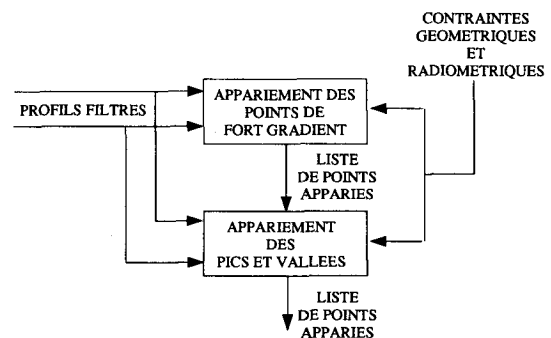


Figure 4.4. - Organisation de notre processus de mise en correspondance de points sur des profils lissés.

Nous avons préféré apparier en premier lieu les points de fort gradient des profils, car nous avons constaté expérimentalement que ces points engendraient moins de faux appariements que les pics et les vallées.

Les points de fort gradient mis en correspondance sont utilisés afin de réduire l'espace de recherche d'homologues, lors de la phase d'appariement des pics et des vallées des profils. En effet, à partir de la figure 4.5, nous constatons que si nous considérons (A_1, A_2) et (B_1, B_2) , deux couples de points mis en correspondance, l'espace de recherche de l'homologue du point Pic_2 est réduit à l'intervalle $[A_1, B_1]$.

Nous réalisons les appariements à l'aide d'algorithmes d'appariement relativement simples. Ces algorithmes sont basés sur la propriété fondamentale suivante :

Les points principaux P_1 et P_2 se correspondent.

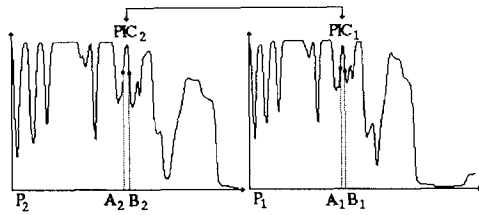


Figure 4.5. – Réduction de l'espace de recherche grâce aux points de fort gradient.

Cette propriété est due à la géométrie des systèmes axiaux (voir figure 2.1).

Ainsi, en commençant par P_1 et P_2 , un parcours des deux profils est réalisé en parallèle, afin de déterminer des points caractéristiques qu'ils peuvent avoir en commun. Ce parcours est effectué à l'aide d'un système à base de règles qui permet d'apparier des pics, des vallées et des points de fort gradient de ces profils. Les règles utilisées prennent en compte à la fois les propriétés radiométriques et les propriétés géométriques des systèmes axiaux (voir paragraphe 2.2).

4.4. RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE DANS UN SYSTÈME DE STÉRÉOVISION AXIALE

Les études théoriques [9, 20] des erreurs dans un système de stéréovision axiale montrent que, si l'on veut reconstruire un objet dans les meilleures conditions possibles, il faut qu'il soit éloigné du point principal. Pour cela, nous avons placé un objet naturel dans un coin de l'image (voir figure 3.9). Cet objet est situé à environ 1 m de la caméra lorsque celle-ci est en position *avant* sur le rail.

Afin de reconstruire cet objet, nous avons utilisé la méthode d'appariement décrite précédemment. Cette méthode permet d'apparier des points caractéristiques à la fois sur le "fond" de l'image et sur l'objet. Afin de simplifier la phase de reconstruction 3D, nous ne considérerons que les points appariés sur la tête d'ail (voir figure 4.6). Signalons qu'à l'heure actuelle, les points appariés sur l'objet et sur le "fond" sont différenciés manuellement.

A partir de la figure 4.6 nous constatons que quelques points ont été mis en correspondance sur la surface de l'ail. Ces points doivent nous permettre de reconstruire la surface étudiée. Afin

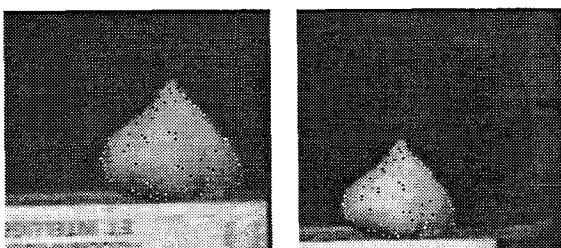


Figure 4.6. – Résultat de l'algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires traversant la tête d'ail.

d'augmenter le nombre de points appariés sur la surface, il peut être envisagé de projeter sur les objets une diapositive non calibrée composée de points.

Signalons que la plupart des points mis en correspondance sont situés sur les contours de l'objet. Ceci pourrait poser un problème, car les contours d'objets non polyédriques sont, en général, instables sur des vues multiples. En stéréovision axiale, les angles de prise de vue variant peu, ces contours sont beaucoup plus stables qu'en stéréovision latérale.

Sur la figure 4.6, nous constatons également que certains points ont été mal appariés. Les points 3D calculés à partir de ces points seront donc faux. De ce fait, le processus d'interpolation de surfaces doit prendre en compte que certains points 3D peuvent être faux et il doit, autant que possible, les éliminer.

A partir des points 3D calculés, nous avons éliminé les points aberrants dus aux mauvaises mises en correspondance. La méthode permettant de supprimer ces points est la suivante :

- calcul de la profondeur moyenne \overline{prof} ,
- calcul de l'écart-type de la profondeur σ_{prof} ,
- élimination des points ayant une profondeur P telle que : $|P - \overline{prof}| > \sigma_{prof}$.

Le tableau 4.1 représente le nombre de points appariés, le nombre de points aberrants éliminés et le nombre de points restants qui seront utilisés lors de la reconstruction. Ce tableau permet une analyse grossière de la qualité de la mise en correspondance.

Tableau 4.1. – Evaluation grossière de la qualité de la mise en correspondance.

Nombre de droites épipolaires considérées	25
Nombre de points appariés sur l'ail	67
Nombre de points aberrants éliminés	15
Nombre de points conservés pour la reconstruction	52
\overline{prof}	-38.18 mm
σ_{prof}	28.28 mm

Nous constatons que, lors de l'élimination des points aberrants, la majorité des points est conservée. Il reste en effet environ 80 % des points appariés, car l'écart type σ_{prof} est proche de la réalité physique. Ceci montre que notre algorithme de mise en correspondance donne des résultats satisfaisants sur des objets naturels. Néanmoins, la validité de la mise en correspondance doit être corroborée par la reconstruction tridimensionnelle.

Afin de reconstruire la surface de l'ail, nous utilisons une méthode très simple. En effet, le but de notre méthode de reconstruction est de montrer la validité de nos résultats et non de réaliser un processus d'interpolation de surfaces très performant. La méthode employée est la suivante :

Soit E_{3d} l'ensemble des points 3D calculés.

Pour chaque point 3D P appartenant à E_{3d} :

- chercher ses n plus proches voisins dans E_{3d} ,
- relier P à chacun de ses n plus proches voisins par un segment.

Cette méthode fournit un maillage grossier de la surface des objets, à partir des points 3D calculés. Ce maillage est en général suffisant pour la visualisation des résultats de la reconstruction tridimensionnelle.

Afin de mieux comprendre les représentations obtenues, nous avons saisi des images de la tête d'ail, dans les positions selon lesquelles elle sera visualisée. Ainsi, il sera aisé de comparer l'objet réel et sa reconstruction.

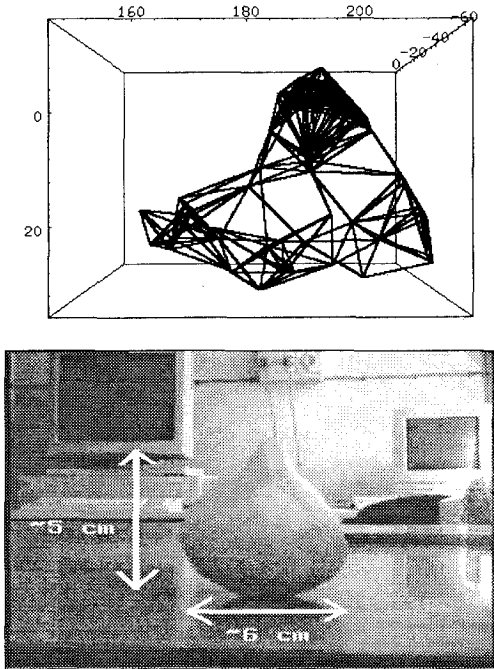


Figure 4.7. – Vues de face.

A partir des résultats de reconstruction, nous constatons que la forme générale de l'ail est conservée. Sur la figure 4.9, vue ne représentant que l'information de profondeur, nous remarquons que la courbure de l'ail est bien visible. Sur cette figure, nous constatons que :

- la courbure de l'ail est approximativement conservée,
- la décroissance de la surface, à partir du sommet, est visible,
- des erreurs de reconstruction sont présentes, mais la forme de l'objet est restituée.

Afin d'évaluer les résultats de reconstruction, nous regroupons dans le tableau suivant les différentes cotes mesurées directement sur l'ail et celles calculées par triangulation.

Tableau 4.2. – Evaluation des résultats de reconstruction de la tête d'ail.

mesures réelles	mesures calculées
largeur : 60 mm	largeur : ~ 58 mm
hauteur : 50 mm	hauteur : ~ 50 mm
profondeur : 30 mm	profondeur : ~ 38 mm

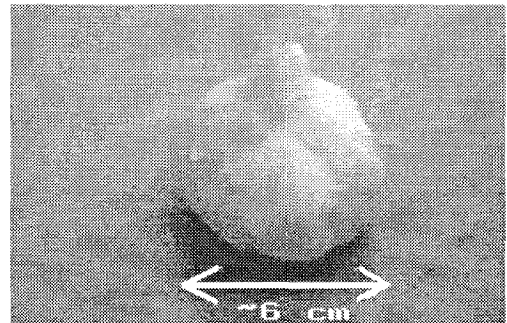
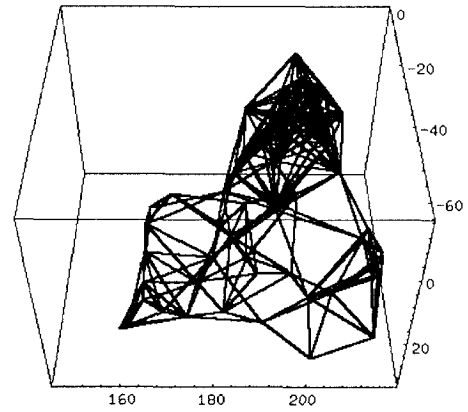


Figure 4.8. – Vues de face et de dessus.

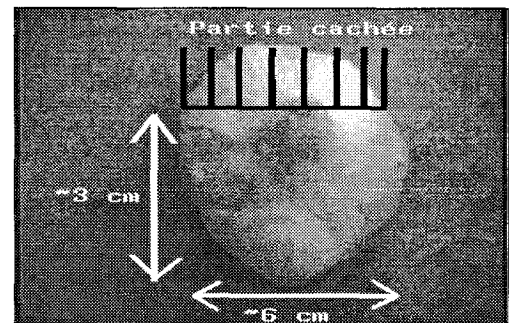
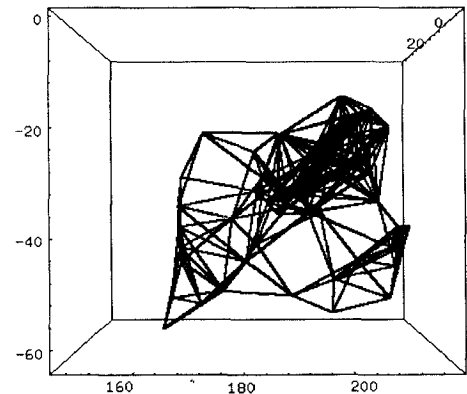


Figure 4.9. – Vues de dessus.

Ces résultats confirment la validité de notre méthode et la précision de la reconstruction. Nous voyons que l'erreur de reconstruction est inférieure à 1 cm lorsque les objets sont placés à environ 1 m de la caméra. Cette erreur peut paraître importante par rap-

port aux erreurs généralement rencontrées dans un système de stéréovision latérale.

Cette erreur de reconstruction est essentiellement due au système optique utilisé. Pour le montrer, nous réalisons une expérience à partir des matrices de calibrage représentant la caméra dans les positions *avant* et *arrière* sur le rail. Le principe de cette expérience est d'évaluer, à partir de données artificielles, les erreurs de triangulation en fonction de la distance radiale, lorsqu'une erreur systématique est introduite dans le processus d'appariement. Les données artificielles utilisées correspondent à des points de l'espace répartis régulièrement sur un plan. Ce plan est situé à environ 1 m de la caméra lorsque celle-ci est en position *avant*.

Pour décrire cette expérience, posons que :

- M_{av} (resp. M_{ar}) est la matrice de calibrage représentant la caméra en position *avant* (resp. *arrière*),
- M'_{av} (resp. M'_{ar}) est la matrice représentant la caméra en position *avant* (resp. *arrière*) après la rectification réalisée à partir des matrices M_{av} et M_{ar} ,
- $P(x, y, z)$ est un point 3D artificiel se projetant en (x'_{av}, y'_{av}) sur l'image rectifiée en position *avant* et en (x'_{ar}, y'_{ar}) sur l'image rectifiée en position *arrière*,
- E est l'erreur introduite lors de la phase de mise en correspondance,
- $P_c(x_c, y_c, z_c)$ est le point calculé par triangulation après introduction de l'erreur d'appariement

L'erreur systématique E étant introduite lors de l'appariement, nous calculons, pour chaque point artificiel P , l'erreur de triangulation en fonction de la distance radiale, de la façon suivante :

- Calcul de (x'_{av}, y'_{av}) à partir du point P :

$$\begin{pmatrix} w x'_{av} \\ w y'_{av} \\ w \end{pmatrix} = M'_{av} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

- Calcul de (x'_{ar}, y'_{ar}) à partir du point P :

$$\begin{pmatrix} w x'_{ar} \\ w y'_{ar} \\ w \end{pmatrix} = M'_{ar} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

- Calcul du point 3D $P_c(x_c, y_c, z_c)$, à partir des points 2D $(x_{av} + E, y'_{av})$ et (x'_{ar}, y'_{ar}) et des matrices M'_{av} et M'_{ar} .
- Calcul de l'erreur de triangulation : $\|\overrightarrow{PP_c}\|$.
- Calcul de la distance radiale à partir du point (x'_{av}, y'_{av}) et du point principal du système axial. Les coordonnées du point principal peuvent être facilement déterminées à partir de la matrice M'_{av} ou de la matrice M'_{ar} .

Signalons que, la distance calculée correspond à la distance entre le point principal et la projection du point P sur l'image rectifiées en position *avant*.

Nous avons réalisé cette expérience pour deux valeurs différentes de E , l'erreur systématique de mise en correspondance. La figure 4.10 représente les résultats obtenus pour une erreur de 0.25 pixel et la figure 4.11 pour une erreur de 0.5 pixel.

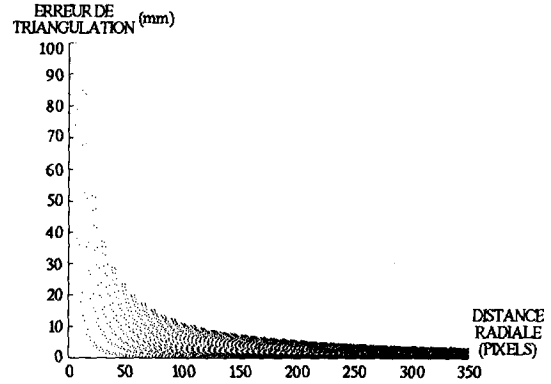


Figure 4.10. - Erreur de triangulation en fonction de la position radiale lorsqu'une erreur de 0.25 pixel est introduite dans le processus de mise en correspondance.

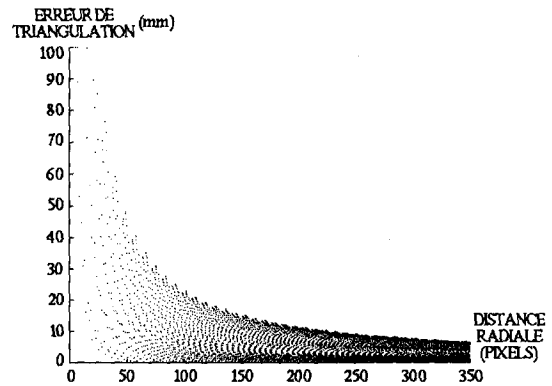


Figure 4.11. - Erreur de triangulation en fonction de la position radiale lorsqu'une erreur de 0.5 pixel est introduite dans le processus de mise en correspondance.

Nous constatons sur les figures 4.10 et 4.11 que l'erreur de triangulation diminue lorsque la distance radiale augmente. Ceci est conforme aux études théoriques réalisées sur les erreurs de triangulation dans un système de stéréovision axiale [8, 20] (voir figure 2.3).

Le tableau 4.3 présente, pour chaque erreur d'appariement introduite, l'erreur maximale engendrée, pour certaines distances radiales.

A partir de ce tableau nous constatons que, si une erreur de mise en correspondance d'un demi-pixel est commise, alors l'erreur de reconstruction que nous obtenons est normale. En effet, l'objet étudié est situé à environ 250 pixels du point principal sur l'image rectifiée en position *avant*.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que, lors de la reconstruction 3D à partir de données réelles, des erreurs de calibrage viennent s'ajouter aux erreurs de mise en correspondance.

Tableau 4.3. – Erreur maximale de triangulation en fonction de la distance radiale et de l'erreur d'appariement introduite lors de la phase d'appariement.

		Erreur d'appariement introduite (pixels)	
		0.25	0.5
Distance radiale (pixels)	0	erreur infinie	erreur infinie
	50	23.07 mm	47.39 mm
	100	10.88 mm	21.51 mm
	150	6.54 mm	13.16 mm
	200	5.54 mm	11.16 mm
	250	4.47 mm	9.19 mm
	300	3.78 mm	7.53 mm
	350	3.18 mm	6.39 mm

5. Conclusions et perspectives

Une caméra munie d'un zoom ou se déplaçant sur son axe n'est pas, en général, un système véritablement axial : elle doit se modéliser comme un système de stéréovision classique. Néanmoins, un vrai système axial peut être obtenu par rectification géométrique à partir d'un système "pseudo-axial".

Nous présentons une méthode permettant d'obtenir un vrai système de stéréovision axiale par calibrage puis rectification.

L'idée clef de la rectification proposée est de former un système axial ayant pour axe optique la droite passant par les centres optiques de deux systèmes optiques calibrés indépendamment (deux focales d'un zoom, une caméra en deux positions sur un rail,...). Cette rectification permet de simplifier le calcul des droites épipolaires lors de la phase d'appariement.

Afin de vérifier la validité de notre méthode de calibrage, nous reconstruisons un objet naturel en utilisant un algorithme d'appariement original. Les résultats de reconstruction sont satisfaisants, malgré quelques imperfections dues au maillage grossier et aux points erronés.

Pour obtenir une meilleure précision de reconstruction, nous envisageons d'utiliser un matériel plus adapté, c'est à dire un ensemble caméra-numériseur haute résolution. Ainsi, en augmentant le nombre de pixels par image, l'erreur doit diminuer. De plus, compte tenu des problèmes dus aux erreurs de triangulation dans un système axial, un calibrage des distorsions radiales et tangentielles des lentilles serait nécessaire [7, 10, 22]. En effet, une erreur de 1 ou 2 pixels peut entraîner des erreurs importantes sur le calcul de profondeur. Signalons que la méthode de rectification proposée dans cet article, resterait valable dans le cas où la notion de matrice de calibrage disparaît [10]. En effet pour appliquer cette méthode, il suffit de déterminer la position des deux centres optiques du système de prise de vues utilisé.

Le travail présenté est particulièrement novateur, car nous proposons une modélisation d'un système de stéréovision axiale qui ne suppose pas que le système optique étudié soit purement axial.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Abi-Ayad. *Calibrage statique et dynamique de caméras. Application à la manipulation d'objets polyédriques par un robot sous le contrôle d'une tête de vision stéréoscopique*. Thèse de l'INP-ENSEEIH informatique, 1989.
- [2] N. Alvertos, D. Brzakovic and R.C. Gonzalez. *Camera geometries for image matching in 3D machine vision*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 11, n° 9, pages 897-974, 1989.
- [3] P. Angénieux. *Objectif à longueur focale variable*. Brevet d'invention N° 1.120.271, G 02 b, Juillet 1956
- [4] N. Ayache. *Vision Stéréoscopique et Perception Multisensorielle : Application à la robotique mobile*. Collection Science Informatique. InterEditions. Paris, 1989.
- [5] P.T. Boggs, R.H. Byrd, J.R. Donaldson and R.B. Schnabel. *ODRPACK Software for weighted orthogonal distance regression*, CU-CS-360-87. University of Colorado, February 1987.
- [6] A.C. Bovik, T.S. Huang and Jr D.C. Munson. *The effect of median filtering on edge estimation and detection*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 9, n° 2, pages 181-194, 1987.
- [7] P. Brand, R. Mohr et P. Bobet. *Distorsions optiques : Correction dans un modèle projectif*. Congrès AFCET-RFIA'94, vol 1, pages 87-98, 1994.
- [8] C. Carmona. *Etude de la stéréovision axiale. Modélisation mathématique et résolution algorithmique*. Thèse de l'INP-ENSEEIH informatique, 1991.
- [9] C. Carmona, A. Ayache and C. Krey. *A study of an axial stereovision system*. Intern. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision (ICARCV'90), Singapore, pages 1101-1106, 1990.
- [10] G. Champleboux, S. Lavallée, P. Sautot et P. Cinquin. *Accurate calibration of cameras and range imaging sensors : the NPBS method*. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Nice, pages 1552-1557, 1992.
- [11] C. De Boor. *A practical guide to splines*. Springer-Verlag, New-York Heidelberg Berlin, 1978.
- [12] J.W. Goodman. *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Masson et Cie, 1972.
- [13] R. Horaud et O. Monga. *Vision par ordinateur*. Hermès, 1993.
- [14] E. Krotkov. *Active computer vision by cooperative focus and stereo*. Springer-Verlag, pages 58-62, 1989.
- [15] J.M. Lavest, G. Rives et M. Dhome. *Utilisation d'un objectif à focale variable en vision monoculaire en vue de la reconstruction 3D*. Revue Traitement du Signal, vol 9, n° 6, pages 491-506, 1992.
- [16] J.M. Lavest, G. Rives et M. Dhome. *Modelling an object of revolution by zooming*. 8th Scandinavian Conference on Image Analysis, vol II, pages 1121-1128, 1993.
- [17] R.K. Lenz and R.Y. Tsai. *Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology*. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, pages 68-75, 1987.
- [18] J. Ma and S.I. Olsen. *Depth from zooming*. Journal of the Optical Society of America, vol 7, n° 10, pages 1883-1890, 1990.
- [19] M.L. Nack. *Final report on image registration research*. Contrat NAS-5-11999-Nov, 1976.
- [20] T.C. Nguyen and T.S. Huang. *Quantization errors in axial motion stereo on rectangular-tessellated image sensors*. 11th Intern. Conf. on Pattern Recognition, The Hague, vol 1, pages 13-16, 1992.
- [21] C. Ragi. *N.O.I.S.I.V.* Thèse de l'INP-ENSEEIH informatique, 1989.
- [22] S. Remy, M. Dhome, N. Daucher et J.T. Lapresté. *Estimation de la distorsion radiale d'un système optique*. Congrès AFCET-RFIA'94, vol 1, pages 99-108, 1994.
- [23] V. Rodin and A. Ayache. *A medical robotics application of monocular stereovision — Filtering and matching techniques*. Intern. Conf. on Automation,

- Robotics and Computer Vision (ICARCV'92), Singapore, vol 1, pages cv-8.7.1 - cv-8.7.5, 1992.
- [24] V. Rodin et A. Ayache. *Modélisation d'un système de stéréovision axiale*. Congrès AFCET-RFIA'94, vol 1, pages 709-714, 1994.
- [25] K. Tarabanis, R.Y. Tsai and D.S. Goodman. *Modeling of a computer-controlled zoom lens*. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Nice, pages 1545-1551, 1992.
- [26] J.W. Tukey. *Nonlinear (nonsuperposable) methods for smoothing data*. Conf. Rec. EASCON, page 673, 1974.
- [27] A.G. Wiley and K.W. Wong. *Metric aspects of zoom vision*. SPIE, Zurich (Suisse), vol 1395, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, pages 112-118, 1990.

Manuscrit reçu le 12 janvier 1994.

LES AUTEURS

Vincent RODIN



Vincent Rodin est né le 28 février 1966. Ancien élève de l'Université Paris 7, il obtient le diplôme d'Ingénieur en Informatique et Mathématiques Appliquées de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse (ENSEEIH) en 1989, et le diplôme de Docteur en Informatique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse en 1993. Actuellement Ingénieur de Recherche temporaire du CNRS, il travaille au sein du Groupement De Recherche "Traitement Du Signal et Images" (GDR 134).

Alain AYACHE



Alain Ayache est né le 6 juillet 1955. Il obtient le diplôme d'Ingénieur en Informatique et Mathématiques Appliquées de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse (ENSEEIH) en 1979, et le diplôme de Docteur en Informatique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse en 1982. Habilité à diriger des recherches en 1992, il est actuellement Professeur d'Université à l'ENSEEIH. Il participe à l'encadrement d'une équipe de recherche sur le thème Vision Par Calculateur, au sein de l'IRIT - ENSEEIH (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, URA 1399)