

Reconstruction 3D à partir des vues orthogonales d'un objet

3D Reconstruction from Orthogonal Views of an Object

par A. BACELAR, B.* NEYRAN, G. GIMENEZ

URA 1216 - CREATIS - INSA de Lyon - bât 502,
20, avenue Albert Einstein F-69621 Villeurbanne Cedex
* équipe de l'Université Lyon 1

Résumé

Reconstruire le volume englobant et extraire les paramètres d'un objet à partir de son ombre portée sur différentes vues est un problème souvent posé dans la recherche expérimentale. Dans cet article, nous présentons un algorithme de reconstruction appliqué dans le cas de vues orthogonales. L'extraction de différents paramètres géométriques de l'objet est ensuite réalisée. Une étude théorique de la variation de ces paramètres montre que l'efficacité de la reconstruction et par suite de l'extraction est intimement liée à la position de l'objet vis-à-vis des caméras. Le passage de deux à trois caméras et le gain en robustesse de la reconstruction, qui en découle, sont étudiés. Dans cette optique, la quantité d'informations de chaque projection est prise en compte.

Ce travail est dédié à la reconstruction de poisson afin d'extraire ses paramètres de position et de dimension. Ces paramètres seront par la suite corrélés à son écho ultrasonore. Cette étude peut cependant trouver d'autres applications comme par exemple en automatique industrielle.

Mots clés : Extraction de paramètres, algorithme de reconstruction 3D, contour, vues orthogonales, trois caméras.

Abstract

Building the including volume and extracting parameters of an object from its shadow on different views is a common problem in experimental research. In this paper, we present a reconstruction algorithm from orthogonal views. The extraction of different geometric parameters of object is then done. A theoretical study of parameters variation shows that the reconstruction accuracy and then the extraction is closely linked to object position next to the cameras. The change from two to three cameras and the increase of reconstruction accuracy which occurs, are studied. In this way, the data amount of each view is taken into account.

This work is applied to fish reconstruction in order to extract position and dimension parameters. These parameters will be later correlated to its ultrasonic echo. It can however find other applications like for example in industrial automation.

Key words : Parameter extraction, 3D reconstruction algorithm, contour, orthogonal views, three cameras.

1. Introduction

La reconstruction 3D d'objets à partir de différentes vues 2D est un problème souvent étudié dans les systèmes de vision par ordinateur, la robotique, la productique, l'infographie, et d'autres applications. Des méthodes ont été élaborées selon le nombre de vues existantes. La méthode « forme à partir des ombres » utilise une vue de l'objet et les propriétés de réflectance de sa surface [1]-[3]. A partir de deux vues, la stéréovision [4]-[5] et le biplan (vues orthogonales) représentent les deux concepts les plus couramment employés. Ces deux méthodes jouent un rôle important notamment en imagerie médicale pour la reconstruction des réseaux vasculaires ou en robotique pour la reconnaissance

de l'environnement au cours du déplacement d'un robot. La troisième vue joue un rôle de validation pour la stéréovision et permet d'affiner la reconstruction dans le biplan. Enfin, lorsqu'un grand nombre de vues est acquis, la méthode de tomographie est la plus utilisée [6].

Le cas qui nous intéresse est un peu spécifique : nous disposons d'un faible nombre de vues (deux ou trois) et nous ne voulons pas connaître la position 3D exacte de chaque point de l'objet mais simplement le volume englobant de l'objet. Nous contournerons ainsi la partie la plus délicate de la stéréovision : la mise en correspondance des primitives entre les images. Les données de départ se composent de deux ou trois vues de l'ombre portée de l'objet. En pratique, nous disposons de deux ou trois caméras disposées orthogonalement. Pour visualiser la reconstruction 3D, le choix d'une méthode de représentation 3D s'imposait. Dans [7]-[10], un

tableau des différentes représentations est donné. Dans l'optique de notre application, seules les représentations volumétriques ont retenu l'attention. Ces dernières permettent de donner une vue complète de l'objet et une bonne appréhension de l'espace occupé par l'objet à reconstruire, à l'instar des représentations dites de contour ou de balayage qui ont une approche surfacique pour visualiser les objets. Dans les représentations volumétriques, seul le type occupation spatiale est repris, la décomposition cellulaire [7][8] et la Constructive Solid Geometry (CSG) [7][8][11] étant écartées car il n'y a pas de choix de primitives spécifiques dans notre application pour la CSG.

Plusieurs algorithmes de reconstruction d'objets 3D ont été proposés à partir d'images 2D en utilisant la méthode d'intersection de volume. La fabrication du modèle octree d'un objet est souvent retenu dans la vision par ordinateur. Il peut être généré à partir de la région commune aux cônes de vision de chaque vue [12][13] ou du codage quadtree de chaque vue de l'objet et en effectuant la conversion en octree [14][15]. Dans [16], Kim et al. proposent un algorithme qui génère un codage par parallélépipède de l'objet à partir de plusieurs vues. Martin et al. [17] développent une représentation volumique par segments d'un objet utilisant les contours de plusieurs vues. Dans [18], Wang et al. utilisent un nouvel algorithme pour retrouver la structure d'objets 3D à partir de vues de différentes directions intégrant des capteurs actifs et passifs. En plus du volume englobant obtenu par les cônes de vision, ils utilisent les propriétés de la surface et d'une lumière structurée pour affiner le volume. Cette méthode est donc applicable dans un environnement où l'éclairage peut être contrôlé, et dans le cas où la réflectance de la surface peut être modélisée avec précision. Ceci est impossible dans les scènes naturelles complexes comme la nôtre.

D'autres auteurs utilisent une voie plus "géométrique" pour reconstruire un volume à partir de ses vues. Chen et al. [19], par exemple, décrivent l'objet à l'aide d'un arbre CSG. Ce dernier représente l'union des sous-primitives volumiques de l'objet, obtenues par des opérations de balayage de sous-vues 2D et d'intersection de plans. Le modèle peut être un polyèdre ou un cylindre ou des cylindres partiels et leurs composés. Dans [20], Gujar et al. reconstruisent un modèle à partir des vues 2D contenant uniquement des lignes droites (visibles ou cachées). Leur algorithme s'intéresse à l'existence de sommets et d'arêtes 3D trouvés à partir de sommets et arêtes 2D, de faces planes et de sous-objets appartenant ou non au modèle à reconstruire.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet d'identification de poisson. Cependant, ici, il ne s'agit pas d'une reconnaissance d'un type de poisson directement par traitement d'images comme dans [21]; nous voulons extraire optiquement les paramètres géométriques d'un poisson (volume, longueur, largeur, centre de gravité, angles de positionnement) afin de les corrélérer avec son écho ultrasonore. Il a été remarqué dans les études précédentes d'identification des poissons [22] la grande variabilité des échos

ultrasonores d'un même poisson entre deux instants (deux positions différentes dans le faisceau ultrasonore). Dans [23], Love montre que suivant les angles de positionnement du poisson, la valeur de réflexion de la cible et donc l'écho ultrasonore sont différents. Il est donc nécessaire de caractériser les relations reliant la position du poisson et son écho ultrasonore afin de retrouver dans l'écho ce qui est propre à son type.

Notre manipulation (poisson plastique placé entre trois caméras orthogonales à l'air libre) est un préambule à une manipulation finale qui se déroulera dans un aquarium entouré de trois caméras et équipé d'un transducteur ultrasonore. Nous voulons ici simplement valider l'extraction des paramètres. Plus tard, l'acquisition des trois images et de l'écho ultrasonore se fera de manière quasi-simultanée. Les trois repères caméras et le repère transducteur de chacune des caméras permet de retrouver l'attitude du poisson dans ce repère.

Pour l'extraction des paramètres, nous ne savons pas a priori avec quelle précision elle doit être obtenue. Nous pouvons simplement dire (et l'étude théorique le confirmera) que deux caméras sont insuffisantes pour une extraction de paramètres satisfaisante. L'apport d'une troisième caméra - comme dans [24], section VI - permet de corriger les imperfections dues à la position des deux premières caméras.

Notre approche ne suppose aucun traitement ou codage des vues de départ en dehors de l'extraction du contour (silhouettes), et travaille directement ligne par ligne sur ces images. Elle est pour cela non dédiée à une application spécifique comme les méthodes de codage rectangulaire peuvent l'être à la reconstruction de pièces géométriques positionnées verticalement. Ce type de codage serait peu adapté à notre cas. Le résultat de la reconstruction sous forme de points de la surface englobante se prête de plus très bien à la recherche des paramètres d'orientation qui nous intéressent.

La figure 1 présente notre manipulation qui est constituée de deux ou trois caméras disposées approximativement de façon orthogonale. La non-rigoureuse orthogonalité des caméras, ainsi que l'impossibilité d'approximer les caméras par une projection orthogonale, rend impossible l'utilisation des méthodes utilisant ces propriétés (Rectangular Parallelepiped Coding [16], octrees from quadtrees [14][15], Constructive Solid Geometry [19]).

Note : Les notions profil, face, dessus sont liées à la position de nos caméras dans le repère 3D. Nous étendons par la suite ces dénominations aux vues acquises. Il est cependant utile de rappeler que dans l'application qui nous intéresse, les caméras horizontales (profil et face) sont indifférentes, seule la caméra verticale (dessus) peut se différencier des deux autres.

Dans le paragraphe 2, l'algorithme de reconstruction du volume englobant est présenté. Dans le paragraphe 3, le besoin d'une troisième caméra est mis en évidence. Dans le paragraphe 4, nous présentons et commentons notre étude expérimentale. Enfin, une conclusion est donnée dans le paragraphe 5.

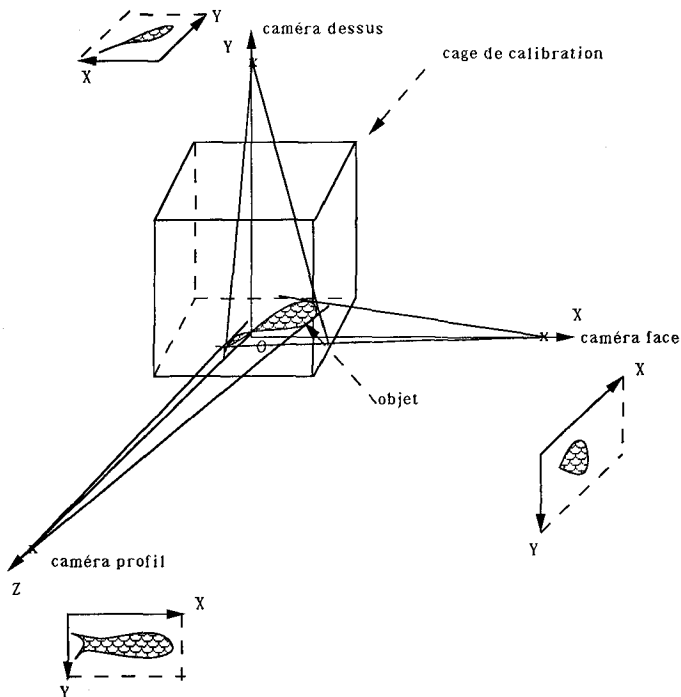


Figure 1. – Positionnement des caméras vis-à-vis de l'objet.

2. Présentation de l'algorithme de reconstruction du volume minimal englobant

L'algorithme retenu pour reconstruire l'objet dépend fortement de l'information à laquelle nous avons accès. Dans notre cas, la seule information fiable est le contour de l'objet.

Le contour vu par une caméra génère un cône dont le sommet est le foyer de la caméra. Ce cône contient entièrement l'objet observé. En considérant deux caméras, le volume intersection des deux cônes est le plus petit volume contenant l'objet. Il englobe au plus près l'objet compte tenu des informations données par les deux contours [Fig.2]. La meilleure précision sur ce volume est obtenue quand les directions des deux caméras sont approximativement orthogonales, ce qui correspond à notre cas.

Description de l'algorithme.

Afin de déterminer la partie d'une droite δ qui est située à l'intérieur de l'objet à reconstruire, nous projetons δ sur chacune des images pour obtenir les droites D et D' [Fig.3]. Nous pouvons ainsi délimiter le segment de δ dont la projection est à l'intérieur de l'objet. Seule une droite perpendiculaire à l'axe de la caméra permet d'utiliser au mieux l'information contenue dans l'image de cette caméra. Une droite qui passerait par le foyer de la caméra se projetterait en un point sur le plan image, et ne permettrait pas de connaître le segment de la droite qui est situé à l'intérieur de l'objet. Nous sommes amenés à ne considérer pour δ que des droites perpendiculaires à l'axe des deux

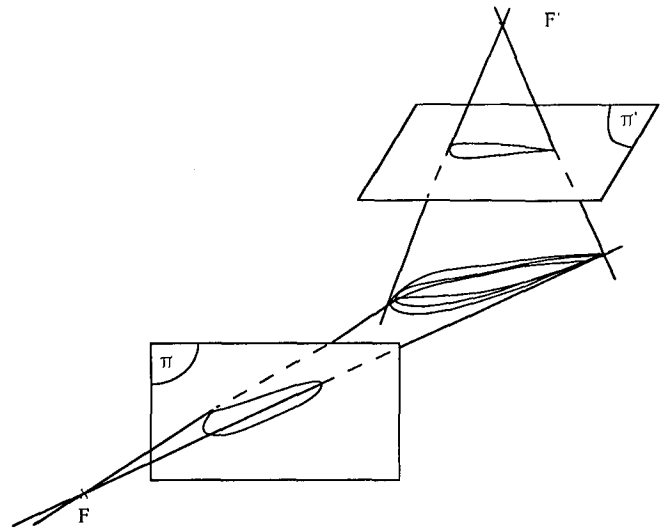


Figure 2. – Principe de l'algorithme du volume englobant.

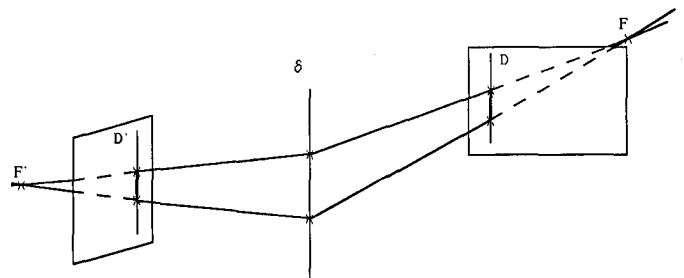


Figure 3. – Rétroprojection d'une droite de l'espace.

caméras. Afin d'envisager l'ensemble des droites δ , nous balayons successivement sur chacune des images toutes les droites D et D' .

Nous appelons π et π' les deux plans images correspondant à deux caméras à 90 degrés. Le couple (π, π') peut ainsi correspondre aux caméras (profil, dessus), (profil, face) ou (dessus, face). Nous verrons par la suite que la reconstruction dans ces trois cas nous donne des résultats différents : ceci s'expliquera par la disparité des informations contenues dans chaque projection. Dans la description qui suit et la figure 4, les plans π et π' correspondent aux vues de profil et dessus.

Nous notons (u, v) et (u', v') les coordonnées des points des plans π et π' et $D : v = v_0$ et $D' : v' = v'_0$ deux droites de π et π' . Les plans Q et Q' qui passent respectivement par D, D' et par les foyers F, F' se coupent en une droite δ . Tout segment P_1P_2 appartenant à la projection de l'objet sur π et à la droite D se rétroprojette sur δ en M_1M_2 . De même, $P'_1P'_2$ se rétroprojette en $M'_1M'_2$ sur δ . L'intersection de M_1M_2 et $M'_1M'_2$ appartient à l'intersection des cônes de vision donc au volume recherché [Fig.4]. M_1M_2 et $M'_1M'_2$ sont rarement égaux du fait de la disparité des vues acquises qui entraîne une différence entre P_1P_2 et $P'_1P'_2$.

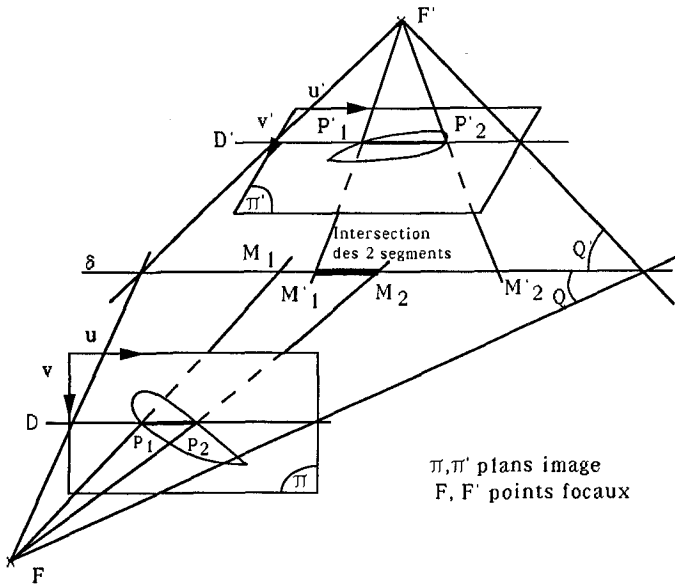


Figure 4. - Reconstruction du volume minimal englobant l'objet.

En faisant balayer D sur π et D' sur π' , le volume recherché est échantillonné par un ensemble de segments.

procédure de reconstruction du volume :

Pour v allant de v_{min} à v_{max} (v est l'ordonnée de D dans π)

Déterminer le plan Q

Pour v' allant de v'_{min} à v'_{max} (v' est l'ordonnée de D' dans π')

Déterminer le plan Q'

Calculer la droite $\delta = Q \cap Q'$

Rechercher les segments de D et D' appartenant à la projection sur π et π'

Rétroprojeter les segments trouvés sur δ

Effectuer l'intersection entre les deux jeux de segments retroprojetés (détaillée par la suite)

Stocker les segments de l'intersection

Fin pour

Fin pour

procédure de détermination de l'intersection d'un ensemble de segments d'une même droite :

* La droite δ étant définie par un point A et un vecteur \vec{v} , toutes les extrémités de segment M seront repérées par un paramètre α tel que : $A\vec{M} = \alpha\vec{v}$

* Chaque extrémité est repérée pour identifier :

- son type : début ou fin de segment
- son plan image origine.

* Les extrémités issues des deux plans sont mises en commun et sont classées par ordre croissant de α .

* L'algorithme d'intersection est le suivant :

Partir du 2^{ème} point mémorisé

Répéter

Regarder si le point courant est inclus dans un segment issu de l'autre plan.

Dans ce cas

Prendre le point courant pour début du segment intersection
Passer au point suivant
Jusqu'au dernier point.

Apport de la troisième caméra

La projection correspondant à la troisième caméra intervient directement dans la reconstruction 3D. Nous projetons chaque segment reconstruit avec deux caméras sur la troisième vue. Nous ne conservons que la partie du segment comprise dans la troisième projection [Fig. 5].

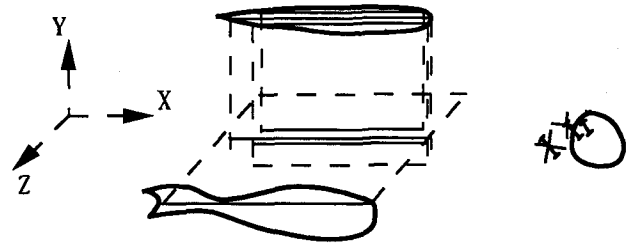


Figure 5. - Affinement du volume à l'aide de la troisième vue. La troisième vue permet d'enlever et de couper les segments non compris dans la projection.

A l'issue de l'algorithme de reconstruction, le volume est constitué de segments.

3. Étude théorique d'une troisième caméra

Pour cette étude, nous nous plaçons en 2D dans le plan contenant les axes des deux premières caméras utilisées pour la reconstruction. Dans ce plan, nous allons approximer le poisson par une ellipse et étudier en fonction de l'angle θ donné initialement à l'ellipse [Fig. 6.] les variations de la valeur de la surface englobante, de son centre de gravité, de son orientation et de ses dimensions. La troisième caméra aurait un axe perpendiculaire à ce plan et éliminerait (dans ce cas théorique) toute erreur de reconstruction puisque la troisième vue donnerait exactement l'ellipse quelque soit son orientation. Nous comparons donc la surface reconstruite avec deux caméras et l'ellipse parfaite que l'on pourrait reconstruire avec trois caméras. La reconstruction 3D avec deux caméras correspond à la somme de n surfaces 2D reconstruites, et les résultats de robustesse obtenus en 2D sont ainsi généralisables en 3D. L'apport d'une troisième caméra lors de la reconstruction permettra de limiter les erreurs de reconstruction mises en valeur dans ce paragraphe.

D'après la figure 6,

$$H1E1 = \frac{F(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta)}{\sqrt{Dt^2(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta) - a^2 b^2 + \sin \theta \cos \theta (b^2 - a^2)}}$$

$$H1E'1 = \frac{F(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta)}{-\sqrt{Dt^2(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta) - a^2 b^2 + \sin \theta \cos \theta (b^2 - a^2)}}$$

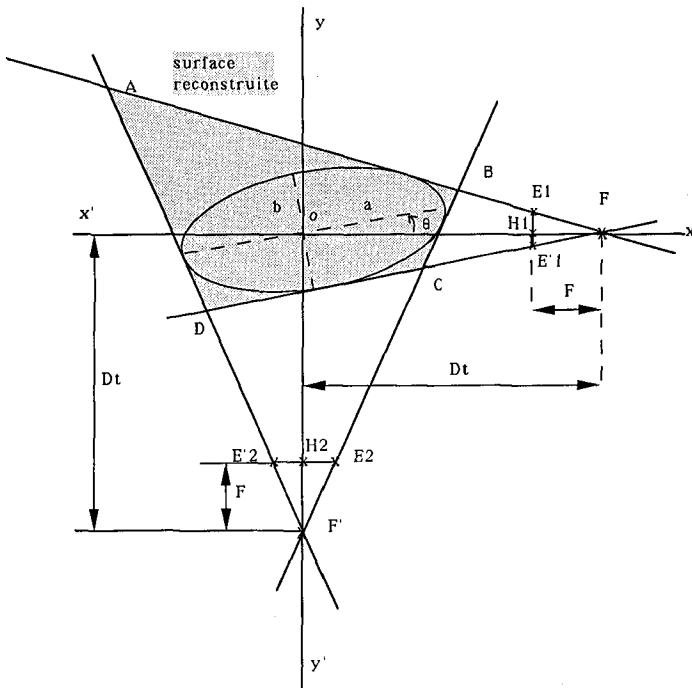


Figure 6. - Reconstruction d'une ellipse à partir de deux caméras.

De même,

$$H2E2 = \frac{F(b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta)}{\sqrt{Dt^2(b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta) - a^2 b^2 + \sin \theta \cos \theta (a^2 - b^2)}}$$

$$H2E'2 = \frac{F(b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta)}{-\sqrt{Dt^2(b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta) - a^2 b^2 + \sin \theta \cos \theta (a^2 - b^2)}}$$

Les courbes suivantes sont obtenues en considérant un rapport a/b des axes de l'ellipse de quatre ($a = 10$ cm, $b = 2.5$ cm), Dt distance entre le centre optique et le centre de l'ellipse égale à 100 cm, F distance focale des caméras égale à 1.2 cm.

3.1. Surface reconstruite (ABCD)

D'après [25], on peut trouver la surface d'un polygone (défini par N points, sommets du polygone) :

$$S = \left| \sum_{j=1}^N (y'_{j+1} x'_j - y'_j x'_{j+1}) / 2 \right|$$

où (x'_j, y'_j) désignent les coordonnées des points sommets successifs du polygone.

Le rapport (surface reconstruite / surface ellipse) varie entre 1.3 dans le cas favorable où les axes de l'ellipse sont dirigés suivant les axes des caméras ($\theta = 0^\circ$ ou 90°), et 2.75 dans le cas où l'ellipse est à 45° . Le calcul de la surface (du volume englobant en 3D) présente donc peu de robustesse avec deux caméras.

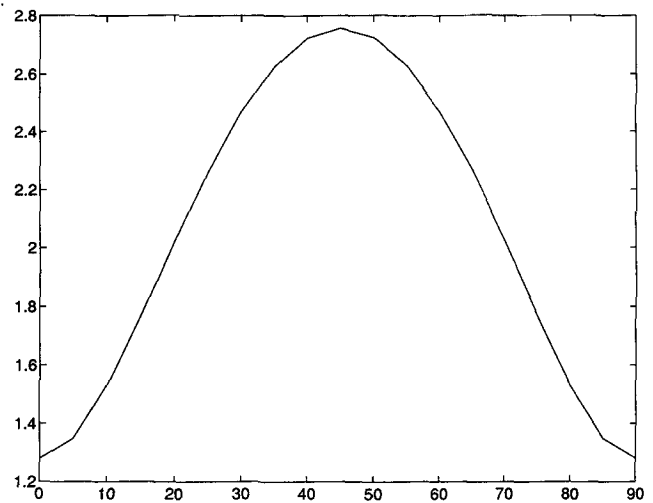


Figure 7. - Rapport (surface reconstruite / surface ellipse) en fonction de l'angle donné à l'ellipse.

3.2. Centre de gravité de la surface reconstruite (ABCD)

[25] donne pour le centre de gravité :

$$Xg = \sum_{j=1}^N (x'_j + x'_{j+1})(y'_{j+1} x'_j - y'_j x'_{j+1}) / 6S$$

$$Yg = \sum_{j=1}^N (y'_j + y'_{j+1})(y'_j x'_{j+1} - y'_{j+1} x'_j) / 6S$$

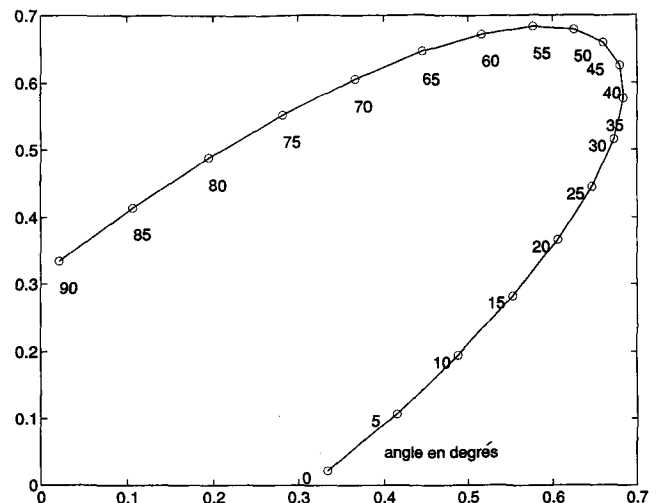


Figure 8. - Sensibilité du centre de gravité (xg, yg) .

Le centre de gravité de l'ellipse initiale est à $(0, 0)$. Le centre de gravité de la surface reconstruite varie peu (bonne sensibilité). La symétrie de notre objet explique ce résultat.

3.3. Angle d'inertie de la surface reconstruite (ABCD)

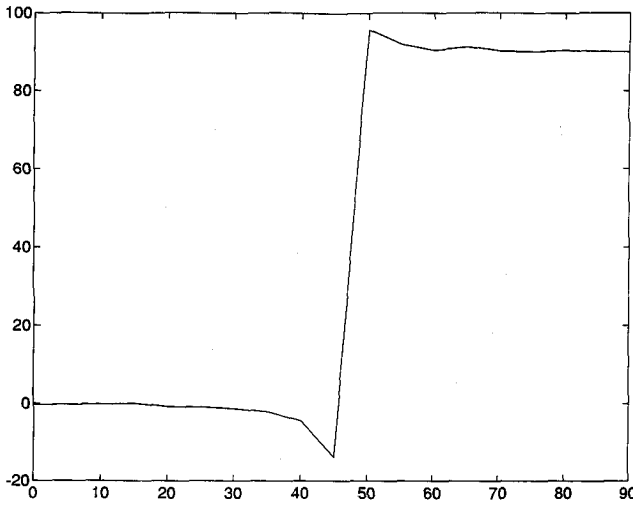


Figure 9a. - Variation du θ reconstruit en fonction du θ initial donné à l'ellipse.

L'angle reconstruit est déduit de la position de l'axe d'inertie de la surface reconstruite. Cet axe est calculé par une méthode de Monte-Carlo. Si θ petit (inférieur à 30° ou supérieur à 60°), la surface reconstruite possède un axe d'inertie à peu près perpendiculaire à l'axe de la caméra présentant la plus grande projection $E_i E'_i$.

Si θ est compris entre 30° et 60° , les deux valeurs propres sont sensiblement égales et le calcul de θ reconstruit n'a pas de signification. La surface reconstruite n'a pas vraiment d'axe principal. Le rapport des deux valeurs propres de la matrice d'inertie de la surface reconstruite est d'ailleurs un bon indice de la confiance que l'on peut accorder à θ reconstruit [Fig. 9b].

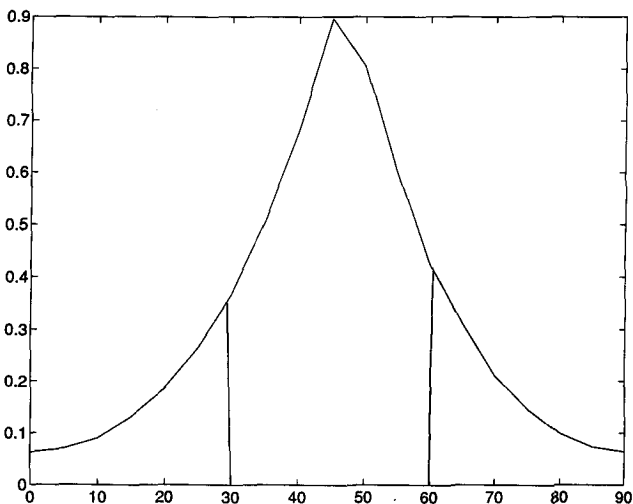


Figure 9b. - Rapport (plus petite / plus grande) des valeurs propres de la matrice d'inertie de la surface en fonction de θ .

Le tracé du rapport de la plus petite sur la plus grande des valeurs propres montre que le calcul de l'axe d'inertie n'a pas

de signification pour un angle compris entre 30° et 60° car ce rapport est supérieur à 0.3.

Seule une troisième vue permettrait :

- dans le cas d'angle inférieur à 30° ou supérieur à 60° d'affiner le calcul de θ reconstruit.
- dans le cas d'angle compris entre 30° et 60° de trouver une valeur pour θ reconstruit, ce qui est impossible avec deux caméras.

3.4. Dimensions de la surface reconstruite (ABCD)

Le calcul a été effectué sur la longueur.

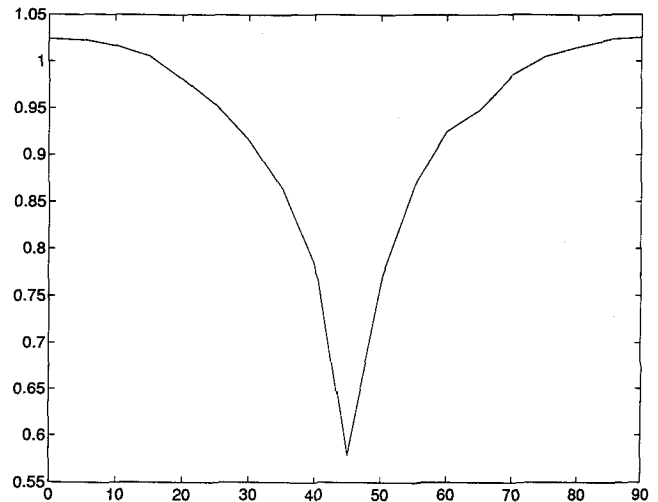


Figure 10. - Rapport (longueur reconstruite / longueur ellipse (2a)) en fonction de l'angle donné à l'ellipse.

Comme pour la surface, nous trouvons une très mauvaise sensibilité pour $\theta = 45^\circ$. Là encore, c'est le moment où les deux vues sont quasi-identiques.

3.5. Conclusions de l'étude théorique

Avec deux caméras, nous notons un manque de robustesse dans les calculs de paramètres. Une troisième caméra, d'axe perpendiculaire à la surface reconstruite ici avec deux caméras, permettra de limiter ces problèmes. De plus la troisième caméra permet, dans le cas d'une orientation quelconque du poisson dans l'espace, de retrouver quasi-systématiquement une configuration favorable de l'ellipsoïde (du poisson) par rapport à au moins deux caméras.

4. Étude expérimentale

4.1. Calibration

La méthode de calibration utilisée est une méthode classique de minimisation de l'erreur de projections ([4] chapitre 3).

Pour un point n'ayant pas servi à la calibration, l'erreur de projection est inférieure à un pixel sur chaque image.

L'erreur de reconstruction d'un point 3D, n'ayant pas servi à la calibration, à partir de ses trois projections 2D, est inférieure à 0.8 mm.

Ces erreurs de calibration sont tout à fait tolérables pour notre application.

4.2. Acquisition

L'acquisition se fait à l'aide de deux ou trois caméras CCD PHILIPS LDH 0255/00, 256 niveaux de gris. Nous leur appliquons, avant d'extraire les contours des silhouettes, des traitements classiques : tout d'abord un seuillage binaire, puis une fermeture et une ouverture morphologique pour éliminer le bruit. Ensuite, nous extrayons les contours qui vont nous servir à la reconstruction.

Les temps moyens de reconstruction et d'extraction de paramètres sont longs (respectivement 1 min 5 s et 1 min pour deux caméras, 1 min 7 s et 36 s pour trois caméras) car nous devons faire des accès mémoire à la carte de traitement d'images MATROX PIP-1024 B où sont stockées les images. Si nous pouvions utiliser la mémoire vive de notre PC pour les stocker, le gain en temps serait appréciable. La résolution de nos images (512X512 pixels, 8 bits/pixel) interdit ceci dans notre configuration.

4.3. Calcul des paramètres

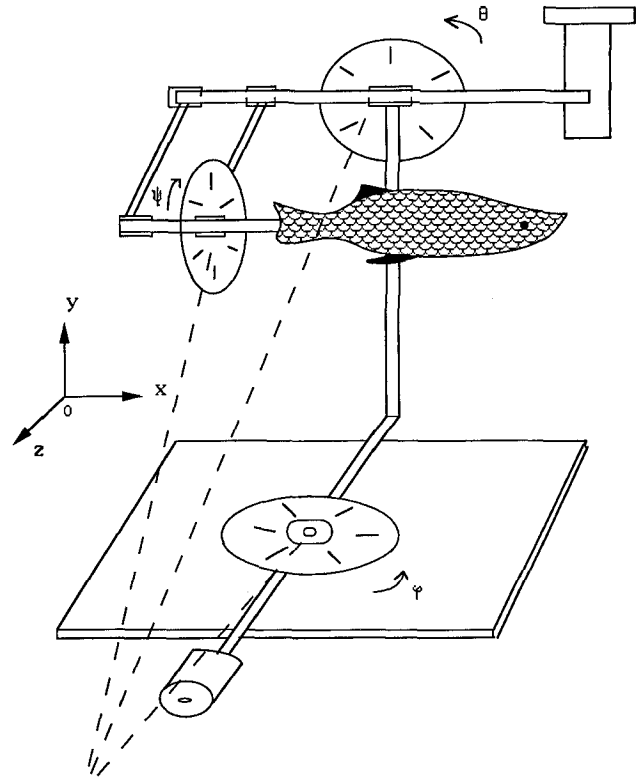
A l'aide du dispositif [Fig. 11], il est possible de fixer la position du fantôme (maquette en plastique d'un poisson) dans l'espace afin de la comparer avec les trois angles d'orientation calculés à partir du volume englobant.

La calibration des caméras permet de connaître la position de chacun des segments reconstruisant le fantôme. Nous déterminons, en premier lieu, le centre de gravité de l'objet.

4.3.1. Centre de gravité

Comme l'objet reconstruit est décrit par un nuage de points situé sur sa surface englobante, les coordonnées du centre d'inertie sont donc estimées par la moyenne des coordonnées des n points du nuage :

$$C_g = \left(\sum_{i=1}^n (x_i, y_i, z_i) \right) * \frac{1}{n}$$



Systèmes de repérage des angles (précision $\pm 2^\circ$)

Figure 11. - Position de l'objet dans l'espace.

4.3.2. Angles de positionnement

Les angles d'orientation sont calculés par rapport au centre de gravité du poisson. Nous effectuons sur le nuage de points une translation afin de prendre le centre de gravité G comme nouvelle origine.

Pour extraire les trois angles de positionnement θ, φ, ψ nous cherchons les vecteurs propres du nuage de points. Ils définissent les axes principaux et donc l'orientation de l'objet.

A partir des trois vecteurs propres $\vec{V}_x(V_{xx}, V_{xy}, V_{xz}), \vec{V}_y(V_{yx}, V_{yy}, V_{yz}), \vec{V}_z(V_{zx}, V_{zy}, V_{zz})$, il est possible de retrouver les angles de positionnement (le sens positif est celui du sens des aiguilles d'un montre dans l'axe) [Fig. 12a].

$$\varphi = \text{Arctg} \left(\frac{-V_{xz}}{V_{xx}} \right)$$

$$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{V_{xz}}{\sqrt{V_{xx}^2 + V_{xz}^2}} \right)$$

$$\psi = \text{Arccos} \left(\frac{\vec{V}_y \cdot \vec{W}}{\|\vec{V}_y\| * \|\vec{W}\|} \right)$$

avec

$$\vec{W} = \left(1, -\frac{1}{V_{xy}} * \left(V_{xx} + \frac{V_{xz}^2}{V_{xx}} \right), \frac{V_{xz}}{V_{xx}} \right)$$

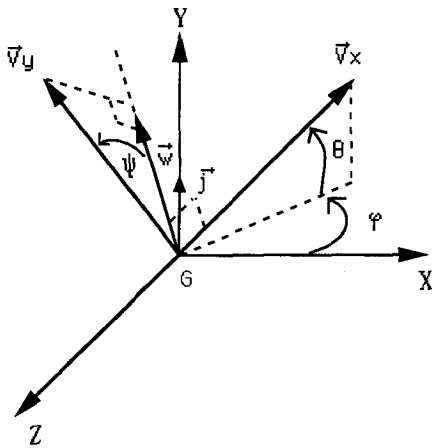


Figure 12a. – Calcul des angles de positionnement.

En effet, $\vec{W} \perp \vec{V}_x$ et $\vec{W} \in \text{plan}(\vec{V}_x, \vec{j})$

$$\Leftrightarrow (\vec{W} \cdot \vec{V}_x = 0) \\ (\alpha \vec{V}_x + \beta \vec{j} = \vec{W}) \quad (1)$$

D'après le tableau 4, le calcul de θ, φ avec trois caméras est assez robuste (écart moyen de 1.6 et 1.7 degrés respectivement). Seul le calcul de ψ pose problème avec un écart moyen de 5.7°. La section presque circulaire du poisson conduit à une coupe dans le second plan principal possédant peu d'inertie, d'où un calcul de ψ difficile.

Pour cette raison, nous avons essayé de considérer une section du poisson moins circulaire et contenant ainsi plus d'informations sur l'angle de gîte ψ . Nous prenons un plan perpendiculaire à l'axe du poisson, le coupant au tiers inférieur (queue). L'intersection de chacune des droites du volume englobant avec ce plan nous donne un nuage de points dont l'axe d'inertie fournit une valeur de ψ .

$$\text{Ici } \psi = \text{Arctg}\left(\frac{V_{y1z}}{V_{y1y}}\right).$$

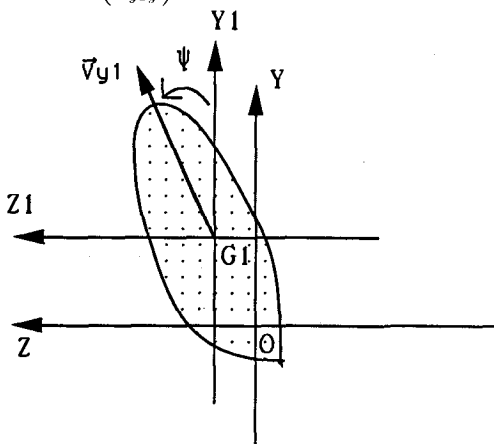


Figure 12b. – ψ calculé dans un plan perpendiculaire au poisson.

Ce calcul de ψ ne peut se réaliser que si les deux premières caméras de la reconstruction sont celles de profil et dessus. En effet, dans les deux autres cas, les droites constituant le volume englobant sont parallèles au plan perpendiculaire à la queue du poisson et n'ont pas d'intersection avec ce plan. Avec cette méthode, la robustesse s'est améliorée car l'écart moyen avec l'angle ψ initial est de 3.1°. La détermination de l'angle ψ reste cependant bien moins robuste que celle des angles θ et φ , qui sont donnés par la direction du premier axe d'inertie.

4.3.3. Volume, longueur, largeur, hauteur

Pour le calcul des autres paramètres, nous orientons les axes du repère global 3D suivant les axes principaux en leur faisant subir trois rotations θ, φ, ψ . Les dimensions maximales et minimales en X, Y, Z du nuage de points donnent la longueur, la largeur et la hauteur du poisson.

Le volume est ensuite codé sous forme d'une matrice de (160 x 40 x 40) voxels, permettant une définition suffisante pour le calcul du volume. Tous les voxels traversés par un segment sont considérés comme faisant partie de l'objet. Cette représentation permet de visualiser le volume en 3D.

4.4. Résultats

Le premier objet étudié est un poisson droit de longueur 21.1 cm, de largeur 3.1 cm, de hauteur 5.2 cm, de volume 145 cm³, dont le centre de gravité est approximativement à (4.8 cm ; 8.1 cm ; 1.1 cm) dans notre repère 3D [Fig. 13].

Nous avons aussi étudié une pièce géométrique de longueur 9.9 cm, de largeur 7.5 cm, de hauteur 7.5 cm, de volume 205 cm³, dont le centre de gravité est approximativement à (-1.6 cm ; 6.8 cm ; -0.5 cm) dans notre repère 3D [Fig. 13].

Les résultats sont présentés dans les tableaux 1, 2 et 3. En souligné apparaissent les cas où la troisième caméra améliore nettement la mesure.

Dans chaque calcul de paramètre, la précision augmente avec la troisième vue [tab.4.]. Pour le poisson, la troisième caméra apporte plus de robustesse sur l'extraction du volume (gain moyen de 57%) et des trois dimensions de l'objet (gain moyen de 15%). En ce qui concerne le centre de gravité, l'apport de la troisième caméra (gain moyen de 0.3 cm) est réduit, vue la forme symétrique du poisson. Pour les angles d'orientation θ et φ , la troisième caméra trouve toute son utilité dans le cas d'angle important (tab. 1. et 2., exemples 11 et 17). L'extraction des angles avec trois caméras dépend de l'orientation des droites du volume englobant, et donc de l'ordre d'utilisation des vues servant à la reconstruction (profil/face et dessus diffère de dessus/face et profil). Seul le paramètre ψ demeure difficile à retrouver, vue la quasi-circularité du poisson.

Tableau 1. Extraction des paramètres d'un poisson droit avec deux caméras.

Exemple n°	$\theta \quad \varphi \quad \psi$ donnés à $\pm 2^\circ$	place des 2 caméras	$\theta \quad \varphi \quad \psi$	Volume estimé en cm^3	C_g (X,Y,Z) en cm	Longueur Largeur Hauteur estimées en cm
			ψ calculé dans le plan ZGY (pro+des) estimés en °			
1	0 0 0	profil dessus	1.3 0.1 0.8 2.7	185.2	46.8 83.1 16.0	21.7 3.4 5.6
2	0 0 0	face profil	-0.1 0.4 0.0	224.5	24.1 79.9 15.1	22.0 3.8 5.2
3	0 0 0	face dessus	1.8 -0.1 0.6	213.9	27.8 76.9 15.4	21.5 3.2 6.4
4	10 0 0	dessus profil	9.8 -1.1 0.7 3.5	194.6	49.6 82.7 15.9	21.3 4.0 6.0
5	10 0 0	face profil	9.1 0.3 1.8	228.8	26.6 77.7 14.9	22.0 30.8 5.6
6	10 0 0	face dessus	1.5 -1.3 4.3	238.0	34.6 80.1 14.1	21.4 3.3 7.7
7	10 10 10	dessus profil	9.6 7.2 3.7 6.7	204.3	48.5 82.8 11.8	21.3 4.0 5.9
8	10 10 10	face profil	8.7 0.3 1.6	302.3	26.2 79.0 10.4	22.2 5.4 5.8
9	10 10 10	face dessus	2.8 8.0 3.9	245.2	38.3 84.1 13.6	21.3 3.7 6.9
10	0 20 0	dessus profil	1.7 20.4 4.4 5.1	192.1	44.7 81.5 9.9	21.9 3.7 5.9
11	0 20 0	face profil	0.9 -1.5 2.5	527.0	18.5 80.1 11.4	21.4 9.6 5.6
12	0 20 0	face dessus	1.8 21.1 2.8	190.6	44.9 81.3 9.5	21.9 3.5 5.8
13	20 20 20	dessus profil	20.7 16.0 9.7 3.6	211.8	50.2 82.5 9.5	21.3 4.0 5.9
14	20 20 20	face profil	20.4 11.5 27.2	360.8	35.5 77.2 12.6	21.5 9.3 5.9
15	20 20 20	face dessus	14.6 17.1 10.6	308.2	44.7 82.0 12.2	21.3 5.0 9.1
16	20 30 10	dessus profil	21.4 28.5 13.2 16.4	204.3	48.3 76.9 6.4	21.3 4.4 5.8
17	20 30 10	face profil	20.4 21.0 13.3	429.3	32.3 70.3 13.7	21.4 12.0 5.8
18	20 30 10	face dessus	19.6 29.4 11.2	229.0	49.1 78.8 6.5	21.9 4.6 7.2

Tableau 2. Extraction des paramètres d'un poisson droit avec trois caméras (en souligné apparaissent les cas où la troisième caméra améliore nettement la mesure).

Exemple n°	θ φ ψ donnés à $\pm 2^\circ$	place des 3 caméras (La troisième servant à affiner le volume).	θ φ ψ ψ calculé dans le plan ZGY (pro+des) estimés en°	Volume estimé en cm^3	C_g (X,Y,Z) en cm	Longueur Largeur Hauteur estimées en cm
1	0 0 0	des + faces profil	0.1 0.3 0.9 -0.4	160.0	42.2 78.2 15.4	21.7 3.2 5.3
2	0 0 0	fac + dessus profil	0.4-0.40.0	<u>159.2</u>	<u>47.6</u> <u>79.6</u> 15.9	21.7 3.2 5.3
3	0 0 0	fac + profil dessus	0.5 -0.2 5.0	<u>157.1</u>	<u>46.8</u> <u>81.9</u> 15.5	21.7 3.4 5.2
4	10 0 0	des + faces profil	7.3 -0.7 2.5 3	169.8	42.7 78.9 14.7	21.3 3.5 5.9
5	10 0 0	fac + dessus profil	11.0 -2.0 0.7	<u>165.8</u>	<u>51.8</u> <u>81.4</u> 15.4	21.8 3.3 5.6
6	10 0 0	fac + profil dessus	<u>10.3</u> -1.6 2.4	<u>164.1</u>	<u>49.6</u> <u>82.9</u> 14.9	21.3 3.3 <u>5.7</u>
7	10 10 10	des + face profil	7.4 6.4 0.6 12.6	191.3	49.4 83.2 11.6	21.2 4.3 5.9
8	10 10 10	fac + dessus profil	<u>11.2</u> 8.8 1.7	<u>182.7</u>	<u>51.2</u> <u>82.9</u> 11.5	21.3 3.5 5.6
9	10 10 10	fac + profil dessus	<u>10.7</u> 8.8 20.8	<u>194.7</u>	50.0 83.7 11.6	21.2 5.5 <u>5.6</u>
10	0 20 0	des + face profil	1.4 18.7 3.1 5.0	188.1	44.0 80.5 9.9	21.8 5.0 6.0
11	0 20 0	fac + dessus profil	1.7 <u>22.1</u> 1.8	<u>152.0</u>	<u>48.8</u> <u>80.4</u> 7.9	21.3 <u>3.3</u> 5.6
12	0 20 0	fac + profil dessus	1.3 22.3 10.8	180.6	47.9 82.0 8.6	21.8 4.0 5.7
13	20 20 20	des + face profil	19.7 15.4 8.9 19.9	208.2	50.8 83.5 9.8	21.3 5.3 5.9
14	20 20 20	fac + dessus profil	23.8 <u>17.4</u> 1.9	<u>192.3</u>	<u>51.1</u> <u>83.0</u> 9.4	21.2 <u>3.9</u> 5.6
15	20 20 20	fac + profil dessus	<u>21.8</u> <u>18.6</u> <u>19.4</u>	<u>201.9</u>	54.3 85.2 8.5	21.2 5.1 <u>5.9</u>
16	20 30 10	des + face profil	21.0 27.6 14.7 16.2	187.0	47.6 77.5 7.4	21.3 4.3 5.6
17	20 30 10	fac + dessus profil	24.9 <u>29.3</u> 2.0	<u>156.1</u>	<u>50.5</u> <u>78.4</u> 5.2	21.3 <u>3.5</u> 5.8
18	20 30 10	fac + profil dessus	22.4 30.9 24.2	190.0	52.6 80.0 4.4	21.8 5.3 <u>5.4</u>

Tableau 3. Extraction des paramètres de la pièce géométrique.

Objet étudié	Ex. n°	Place des trois caméras (La 3ième servant à affiner le volume)	Volume estimé		$C_g(X, Y, Z)$			longueur, largeur					
			en cm ³		en cm			hauteur en cm					
			2 caméras/	3 caméras	2 caméras/	3 caméras	2 caméras/	3 caméras	2 caméras/	3 caméras			
pièce géométrique	1	profil des + face	245.7	211.4	2.2	59.4	9.4	1.4	56.1	6.3	9.9	8.0	8.3
	2	profil fac + dessus	263.8	206.8	32.5	38.8	11.2	19.2	44.5	1.4	10.7	8.0	8.3
	3	dessus fac + profil	353.4	208.3	27.7	59.6	-3.9	8.2	52.2	-0.4	10.1	7.9	8.4
pièce géométrique avec $\theta = 0^\circ$ $\varphi = 20^\circ$ $\psi = 0^\circ$	1	profil des + face	294.8	273.6	-45.6	94.5	-6.7	-46.0	91.3	-7.9	La pièce étant posée de façon oblique et n'étant pas ramenée dans une position originale, ce calcul n'a pas de sens.		
	2	profil fac + dessus	393.6	268.1	-25.3	73.9	-13.7	-35.5	80.7	-16.8			
	3	dessus fac + profil	365.1	270.6	-29.9	93.7	-20.0	-43.2	89.2	-14.0			

Tableau 4. Comparaison des valeurs moyennes des différents paramètres avec les valeurs exactes (initiales).

objet	Vol.recons./vol.initial	écart avec le C_g initial en cm (x, y, z)			long.recons./long.initial	larg.recons./lar.initial	haut.recons./haut.initial	écart θ en °	écart φ en °	écart $\psi 1$ en °	écart $\psi 2$ en °
poisson deux	1.79	1.1	0.3	0.3	1.03	1.63	1.20	2	3.8	3.7	6.2
poisson trois	1.22	0.3	0.2	0.3	1.01	1.31	1.09	1.6	1.7	5.7	3.1
pièce deux	1.55	2.6	1.7	0.9	1.03	1.06	1.11	/	/	/	/
pièce trois	1.16	2.5	1.6	0.7	1.00	1.04	1.10	/	/	/	/

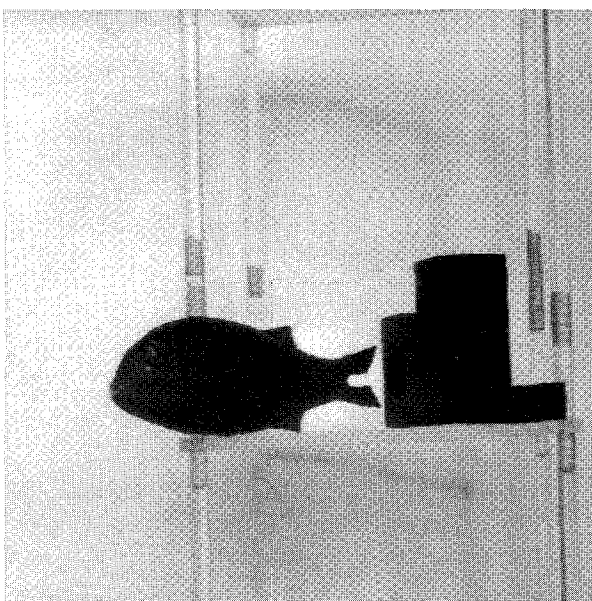


Figure 13. – Poisson droit et pièce géométrique originaux.

4.5. Exemples de reconstruction du poisson et de la pièce avec deux et trois caméras

Dans le cas du poisson (reconstruction avec deux [Fig. 14] ou trois caméras [Fig. 15]) ou de la pièce de robotique (reconstruction avec deux [Fig. 16] ou trois caméras [Fig. 17]), l'apport de la troisième caméra est mis en évidence.

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons extrait différents paramètres de position (centre de gravité, angles de positionnement) et de dimension (volume, longueur, largeur, hauteur) d'un poisson. Un algorithme de reconstruction du volume englobant à partir de silhouettes d'un objet fournit un ensemble de segments intérieurs. A partir des extrémités des segments, nous extrayons les paramètres de position et de dimension. Une étude théorique de la robustesse de la reconstruction et de la variation des différents paramètres a été

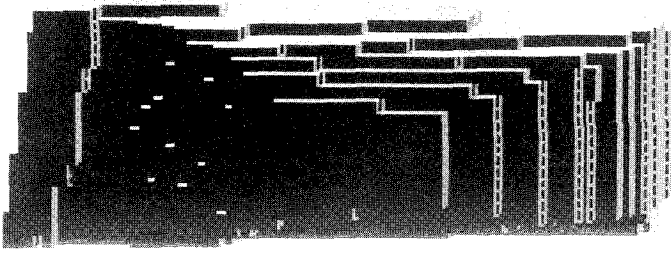


Figure 14. – Reconstruction avec $\theta = 10^\circ, \varphi = \psi = 0^\circ$ à l'aide des vues de dessus et de face.

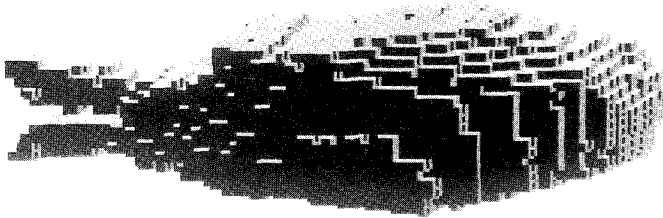


Figure 15. – Reconstruction avec $\theta = 10^\circ, \varphi = \psi = 0^\circ$ à l'aide des vues de dessus face et profil.

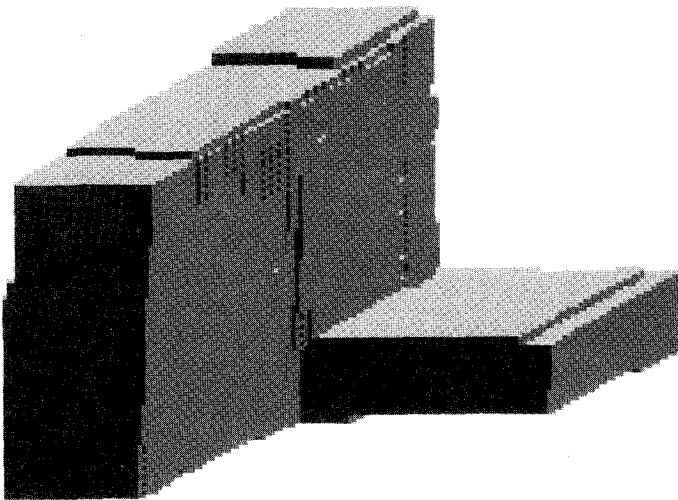


Figure 16. – Reconstruction de la pièce géométrique avec deux caméras.

réalisée avec deux caméras. Elle a permis de conclure que l'utilisation d'une troisième caméra est nécessaire afin de limiter les erreurs.

Dans le but d'améliorer la robustesse de la méthode, il serait intéressant d'avoir une connaissance a priori des paramètres du poisson. Par exemple, nous pourrions connaître le rapport entre la longueur, largeur, hauteur du poisson. La plage d'incertitude dans le calcul des paramètres pourrait ainsi être réduite.

Le temps de calcul élevé est lié aux moyens informatiques utilisés. Il peut être réduit de façon importante en travaillant en mémoire vive de l'ordinateur et éventuellement en diminuant le pas d'échantillonnage utilisé lors de la reconstruction, mais l'objet n'est alors pas aussi finement reconstruit.

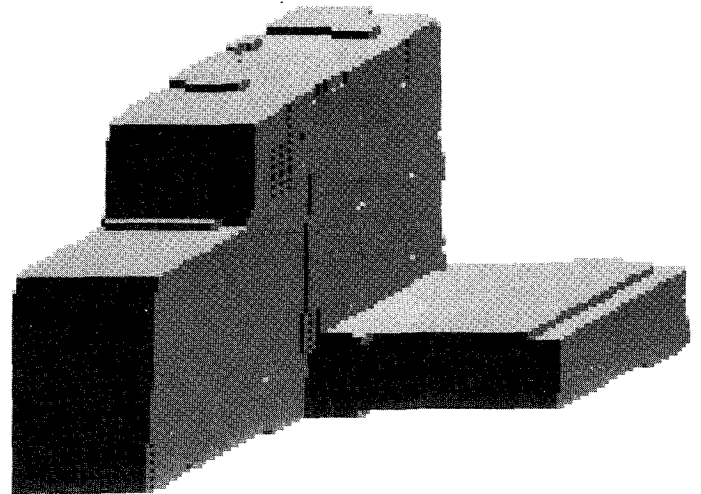


Figure 17. – Reconstruction de la pièce géométrique avec trois caméras

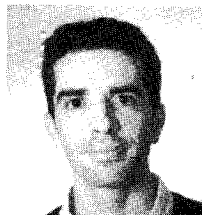
Cette étude prend cadre dans la modélisation de solides, la robotique et autres applications. Pour des applications en automatique industrielle, les trois caméras, nécessaires à la reconstruction, peuvent se réduire à deux si nous considérons les images différentes d'un objet se déplaçant sur un convoyeur. Dans notre application, l'extraction de paramètres d'un poisson va permettre de corréler sa signature ultrasonore avec son volume, sa position et ses dimensions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Horn « Obtaining shape from shading information, » in P.H. Winston (Ed.) The psychology of computer vision, New York, Mc Graw-Hill, 1975.
- [2] B. Horn « Shape from shading : a method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view, » MIT Laboratory for computer science, Technical report 79, 1970.
- [3] B. Horn and K. Ikeuchi « The mechanical manipulation of randomly oriented parts, » Science America, Aug. 1984, vol. 251, n° 2, pp. 90-99.
- [4] N. Ayache « Vision stéréoscopique et perception multisensorielle, » in InterÉditions (Ed.), Paris, Science informatique, 1989.
- [5] E. Grosso, G. Sandini and M. Tistarelli « 3-D object reconstruction using stereo and motion, » IEEE SMC, Nov/Dec 1989, vol. 19, n° 6, pp. 1465-1476.
- [6] G.T. Herman « Image reconstruction from projections : The fundamentals of computerized tomography, New York, Academic Press, 1980.
- [7] D.H. Ballard and C.M. Brown, Computer vision. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1982, pp. 264-311.
- [8] A.A.G. Requicha « Representation for rigid solids : Theory, methods, and systems, » Comput. Surveys, Dec. 1980, vol. 12, pp. 437-464.
- [9] J.K. Aggarwal, L.S. Davis, and J.W. Roach « Survey : representation methods for the three-dimensional objects, » in Progress in pattern recognition, L.K. Kanal and A. Rosenfeld, Eds. North-Holland, 1981, pp. 377-391.
- [10] N. Badler and R. Bajcsy « Three-dimensional representations for computer graphics and computer vision, » Comput. Graphics, Aug. 1978, vol. 12, pp. 153-160.
- [11] W.C. Lin and K.S. Fu « A syntactic approach to 3-D object representation, » IEEE PAMI, May 1984, vol. PAMI-6, n° 3, pp. 351-364.
- [12] H. Noborio, S. Fukuda and S. Arimoto « Construction of the octree approximating three-dimensional objects by using multiple views, » IEEE PAMI, Nov. 1988, vol. 10, n° 6, pp. 769-781.

- [13] M. Potmesil « Generating octree models of 3D objects from their silhouettes in a sequence of images, » Computer vision, graphics, and image processing, 1987, vol. 40, pp. 1-29.
- [14] C.H. Chien and J.K. Aggarwal « Volume/Surface octrees for the representation of three-dimensional objects, » Computer vision, graphics, and image processing, 1986, vol. 36, pp. 100-113.
- [15] N. Ahuja and J. Veenstra « Generating octrees from object silhouettes in orthographic views, » IEEE PAMI, Feb. 1989, vol. 11, n° 2, pp. 137-149.
- [16] Y.C. Kim and J.K. Aggarwal « Rectangular parallelepiped coding : a volumetric representation of the three-dimensional objects, » IEEE journal of robotics and automation, Sept. 1986, vol. RA-2, n° 3, pp. 127-134.
- [17] W.N. Martin and J.K. Aggarwal « Volumetric descriptions of objects from multiple views, » IEEE PAMI, March 1983, vol. PAMI-5, n° 2, pp. 150-158.
- [18] Y.F. Wang and J.K. Aggarwal « Integration of active and passive sensing techniques for representing three-dimensional objects, » IEEE transactions on robotics and automation, August 1989, vol. 5, n° 4, pp. 460-471.
- [19] Z. Chen and D.B. Perng « Automatic reconstruction of 3-D solid objects from 2-D orthographic views, » Pattern recognition, 1988, vol. 21, n° 5, pp. 439-449.
- [20] U.G. Gujar and I.V. Nagendra « Construction of 3-D solid objects from orthographic views, » Comput. graphics, 1989, vol. 13, n° 4, pp. 505-521.
- [21] J. Shave « A shipboard imaging system to sort and identify live fish, » Advanced imaging, May 1993, pp. 57-59.
- [22] P. Roux « Expériences en vue de l'identification des espèces de poissons avec un sonar large bande, » rapport INRA, Thonon-les-Bains, Juin 1991.
- [23] R.H. Love « Target strength of an individual fish at any aspect, » J. Acoust. Soc. Am., 1977, vol.62, n° 6, pp. 1397-1403.
- [24] J.Y.S. Luh and J.A. Klaasen « A three-dimensional vision by off-shelf system with multi-cameras, » IEEE PAMI, Jan. 1985, vol. PAMI-7, n° 1, pp. 35-45.
- [25] Y. Watanabe « A method for volume estimation by using vector areas and centroids of serial cross-sections, » IEEE transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-29, n° 3, pp. 202-205.

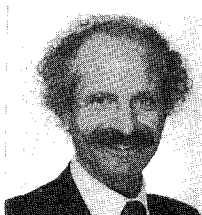
LES AUTEURS



Alexis BACELAR, diplômé d'ingénieur du CUST de Clermont-Ferrand (section génie électrique 1991). DEA Électronique et Systèmes de l'Université Blaise Pascal option traitement d'images et reconnaissance des formes en 1991. Poursuit depuis Octobre 1991 une thèse de doctorat spécialité acoustique au Centre de Recherches et Applications en Traitement des Images et du Signal de l'INSA de Lyon. Activités de recherche en identification de cibles sous-marines par des moyens optiques et acoustiques. Moniteur de l'enseignement supérieur en informatique à l'INSA pour les années 1991-1992 et 1992-1993.



Bruno NEYRAN, maître de conférences à l'IUT B - Lyon 1 département de Génie Électrique. Après une thèse de doctorat en Automatique en 1987, il a rejoint en 1988 l'URA 1216 où il fait partie de l'équipe dépendant de l'Université Lyon 1. Sa principale activité de recherche concerne la stéréoscopie et principalement ses applications médicales.



Gérard GIMENEZ, docteur d'État (1978, Paris Sud Orsay), est professeur au département de Génie Électrique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Il travaille à CREATIS depuis 1980 où il est particulièrement impliqué dans la Recherche et Développement concernant les signaux et images ultrasonores.

Manuscrit reçu le 6 mars 1993.