

# Reconstruction et Recalage de Surfaces en Mouvement par Projection Laser Multi-lignes

## Reconstruction and Registration of Moving Surfaces by means of a One-Shot Laser Projection

C. Matabosch<sup>1</sup>

D. Fofi<sup>2</sup>

J. Salvi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut d'Informatica i Aplicacions, Universitat de Girona, Girona (Spain)

<sup>2</sup> Le2i UMR CNRS 5158, Université de Bourgogne, Le Creusot (France)

rue de la fonderie 12, 71200, Le Creusot  
cmatabos@eia.udg.es

### Résumé

*L'acquisition de modèles tridimensionnels complets reste un problème ouvert en vision par ordinateur. La plupart des techniques utilisent un capteur à triangulation laser couplé à un système mécanique permettant de balayer la surface des objets à reconstruire. Ces techniques manquent de précision en présence de vibrations ou de mouvements extérieurs non commandés, notamment en raison du décalage d'alignement entre les images acquises. Dans cet article, nous proposons une méthode originale basée sur la projection laser d'un motif multi-lignes ; grâce aux techniques de recalage, elle permet l'acquisition complète des surfaces même en présence de mouvements non contrôlés.*

### Mots Clef

Reconstruction 3D, recalage, balayage à laser.

### Abstract

*The acquisition of three-dimensional models of a given surface is a very interesting subject in computer vision. Most of techniques are based on the use of laser range finders coupled to a mechanical system that scans the surface. These techniques lacks of accuracy in the presence of vibrations or non-controlled surface motion because of the misalignments between the acquired images. In this paper, we propose a new one-shot pattern which benefits from the use of registration techniques to recover a whole surface in the presence of non-controlled motion.*

### Keywords

3D reconstruction, registration, laser projection.

## 1 Introduction

La reconstruction 3D reste un axe de recherche important en vision par ordinateur. Des nombreuses applications, comme la navigation d'un robot mobile, la

numérisation pour le patrimoine culturel, le contrôle qualité, la rétroconception, etc., requièrent une information tridimensionnelle. Pour obtenir cette information, il existe différents capteurs 3D basés sur la projection laser [5] ou la projection de lumière structurée et codée [10], entre autres. En général, les techniques de projection laser sont basées sur une source lumineuse et une lentille cylindrique qui dévie le faisceau de manière à former un plan de lumière projeté sur les surfaces à mesurer.

La projection d'un plan laser ne permet de reconstruire qu'un profil unique de ces surfaces. De ce fait, dans la plupart des cas, un système de balayage mécanique est ajouté. Dans certaines applications : a) le plan laser est projeté sur un miroir rotatif et réfléchi sur la surface ; b) la faisceau laser est attaché à un engrenage à vis ; c) le faisceau laser est fixe et c'est l'objet qui est placé sur une table rotative. Toutes ces techniques permettent la reconstruction de l'ensemble de la surface avec une haute résolution. Cependant, leur précision dépend fortement du système mécanique utilisé et les vibrations potentielles provoquées par le balayage peuvent conduire à des mauvais alignements entre les différentes vues. En outre, la séquence d'images acquises dans le processus de balayage impose que les mouvements de l'objet soient contrôlés, ce qui réduit considérablement le nombre d'applications possibles.

Par ailleurs, ces capteurs ne permettent de reconstruire qu'une partie de l'objet à cause des occlusions et du champ de vision limité. Dans le but d'obtenir une reconstruction complète (une surface topologiquement fermée par exemple), plusieurs vues doivent être fusionnées, "cousues" les unes avec les autres. Les techniques permettant d'opérer une telle couture, connues sous le nom de *recalage*, visent à estimer le déplacement Euclidien entre deux vues consécutives.

L'objectif de cet article est de présenter un capteur à triangulation par projection laser multi-lignes permettant

d'acquérir plusieurs portions de surface d'un même objet. Au fur et à mesure que la reconstruction est obtenue, une technique de recalage est appliquée pour aligner les différentes vues. On sait que l'erreur de recalage se propage de vue en vue, l'erreur finale peut donc être très importante, en particulier si l'objet ne présente pas de formes marquées. Pour résoudre ce problème, une nouvelle technique de minimisation de l'erreur est proposée.

L'article est structuré comme suit. La section 2 présente le capteur 3D par projection laser que nous utilisons. La procédure de calibrage du capteur est présentée dans la section 3. La section 4 décrit l'étape de reconstruction. La procédure de recalage est détaillée dans la section 5. Des résultats expérimentaux sont présentés et l'article finit avec une conclusion.

## 2 Capteur 3D par projection laser

De nos jours, il existe un grand nombre de lentilles qui, couplées à une source laser, permettent la projection de motifs divers : plans, cercles, matrice de points, lignes. Cependant, il a été démontré que les motifs de lignes sont les mieux adaptés dans les procédures de mesure grâce à leur segmentation aisée et aux techniques de détection sous-pixels qu'elles permettent.

Le nombre de lignes projetées est directement lié à la résolution finale, toutefois, un compromis entre résolution et segmentation doit être trouvé car la difficulté dans la segmentation croît avec le nombre de lignes. Dans ce travail, un motif de 19 lignes est utilisé et les images sont acquises par une caméra couplée avec un filtre optique à 635 nm solide du système laser. Une photographie du prototype est donnée en figure 1.

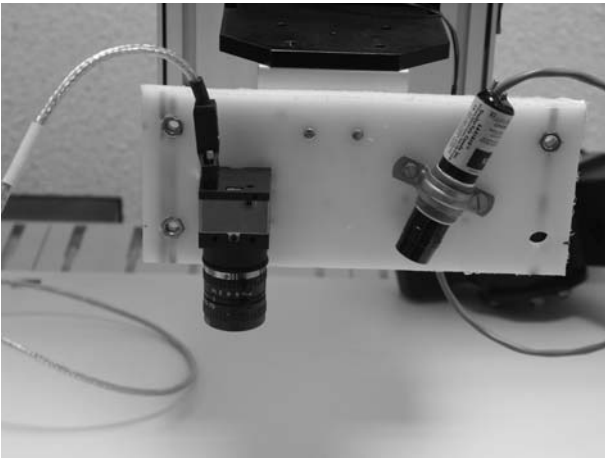


FIG. 1 – Prototype développé

## 3 Calibrage

La procédure de calibrage consiste à trouver une relation entre les points 3D de la surface à mesurer et la projection de ces points dans l'image capturée. La projection du la-

ser correspond à l'équation d'un plan. L'intersection de ce plan avec l'objet produit une courbe qui est visualisée par la caméra. Si les relations entre la caméra et le laser sont connues, la courbe 3D peut être calculée au moyen de la courbe 2D obtenue. Cette relation peut être représentée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} sX \\ sY \\ sZ \\ s \end{bmatrix} = {}^W T_L \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

où  $[u,v]$  sont les points 2D visualisés par la caméra,  $[X,Y,Z]$  les points 3D, et  ${}^W T_L$  est la matrice qui les relie.

Une fois que la matrice  ${}^W T_L$  est calculée, les points 2D dans l'image peuvent être directement transformés en points 3D dans le repère de référence. Évidemment, les paramètres  $t_{ij}$  de la matrice doivent être estimés aussi précisément que possible pour maximiser la précision de la reconstruction. De l'équation 1, les expressions pour  $sX$ ,  $sY$ ,  $sZ$  et  $s$  sont tirées :

$$\begin{aligned} sX &= t_{11} \cdot u + t_{12} \cdot v + t_{13} \\ sY &= t_{21} \cdot u + t_{22} \cdot v + t_{23} \\ sZ &= t_{31} \cdot u + t_{32} \cdot v + t_{33} \\ s &= t_{41} \cdot u + t_{42} \cdot v + t_{43} \end{aligned} \quad (2)$$

En arrangeant les termes et en les regroupant, un système homogène à 3 équations et 12 inconnues est obtenu :

$$\begin{aligned} t_{11} \cdot u + t_{12} \cdot v + t_{13} - t_{41} \cdot u \cdot X - t_{42} \cdot v \cdot X - t_{43} \cdot X &= 0 \\ t_{21} \cdot u + t_{22} \cdot v + t_{23} - t_{41} \cdot u \cdot Y - t_{42} \cdot v \cdot Y - t_{43} \cdot Y &= 0 \\ t_{31} \cdot u + t_{32} \cdot v + t_{33} - t_{41} \cdot u \cdot Z - t_{42} \cdot v \cdot Z - t_{43} \cdot Z &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Dans le but d'établir les correspondances entre les points 3D et les points 2D, la méthode du quadrangle complet est utilisée [4]. La méthode originale a été adaptée pour calibrer l'ensemble des 19 plans en vue d'obtenir les 19 matrices de transformation qui décrivent la géométrie du capteur. Pour chaque plan laser, les étapes suivantes doivent être réalisées :

- détection des points du profil laser dans le plan image ;
- mise en correspondance entre les points de l'image et les points 3D de la mire de calibrage ;
- calcul de la matrice  $T$ .

Ces étapes sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

### 3.1 Segmentation des lignes laser

Quand un seul plan est projeté sur l'objet, la détection des pics avec une précision sous-pixel peut être obtenue avec une grande précision en utilisant un filtre FIR [6]. Or, quand plusieurs plans sont projetés, la courbe dérivée du profil (figure 2) est hautement influencée par le voisinage. Dans certaines situations, la courbe dérivée ne coupe pas l'axe des abscisses à la valeur maximale du profil d'intensité. Pour résoudre ce problème, une méthodologie adaptée basée sur des travaux précédents sur la lumière structurée et codée est utilisée [8]. D'abord, la dérivée première est calculée. Idéalement, la dérivée peut être calculée comme

la différence entre deux valeurs consécutives, mais comme l'image est bruitée, la dérivée est calculée en utilisant un filtre de dérivation, en convoluant chaque ligne de l'image avec le vecteur  $[-1 -1 -1 0 1 1 1]$ . Ensuite, la dérivée seconde est calculée en vue d'obtenir un rehaussement des pics par rapport à l'image d'intensité. Un seuil est défini comme suit de manière à déterminer la dérivée seconde saturée :

$$\begin{cases} 0 & \text{si } f_i'' < \text{seuil} \\ 255 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

où  $f$  est le profil d'intensité et  $f_i''$  est la dérivée seconde en chaque pixel des lignes de l'image. Comme on peut le voir sur la figure 3, les intervalles où se situent les pics peuvent être trouvés facilement parce qu'ils correspondent directement à la région où la dérivée seconde est maximale. Pour chaque intervalle, la valeur centrale est calculée comme approximation de la position de chaque maximum. Ensuite, une dérivée locale est calculée à partir des voisins à gauche et à droite du centre de chaque intervalle :

$$f'_L = \text{conv}([1 -1 -1 0 1 1 1], [f(p_i-3) : f(p_i+3)]) \quad (5)$$

où  $\text{conv}$  est le produit de convolution et  $f(p_i)$  est la valeur du profil d'intensité dans le  $i^e$  pic estimé. Le passage par zéro de la fonction  $f'_L$  donne la position sous-pixel de chaque ligne laser. En outre, si l'intensité en ce point est inférieure à un seuil donné, le pic ne sera pas considéré par la suite.

Avec cette méthode, on peut calculer tous les pics de chaque ligne de l'image. Pour cela, on doit déterminer le plan laser auxquels ils appartiennent. Initialement, tous les pics de chaque ligne de l'image sont déterminés. Après la segmentation, une étape d'identification des lignes laser est appliquée pour déterminer la correspondance entre les plans laser projetés et les lignes laser acquises. Dans cette étape, on suppose que si, dans une ligne de image il y a 19 pics, ils correspondent, respectivement, aux 19 plans laser projetés. S'il y a moins de 19 pics, on utilise la ligne précédente de l'image, et quand un pic est très proche (moins de 3 pixels) d'une ligne laser déjà identifiée, ce pic est considéré comme appartenant à cette ligne laser. Par ailleurs, d'autres contraintes sont utilisées pour améliorer cette étape, par exemple, si dans une image avec 10 pics, on a trouvé que le pic 8 correspond au plan laser 17, alors, les pics 9 et 10 correspondent automatiquement aux plans laser 18 et 19. Théoriquement, sur une surface plane, l'identification est triviale : toutes les lignes sont visualisées et forment une droite continue (sans rupture) dans l'image. L'étape d'identification que nous avons présentée est adaptée à des surfaces plus complexes.

### 3.2 Mise en correspondance des points 3D et des points de l'image

La méthodologie est basée sur le calcul de birapports sur un quadrangle complet [2]. On peut facilement vérifier (fi-

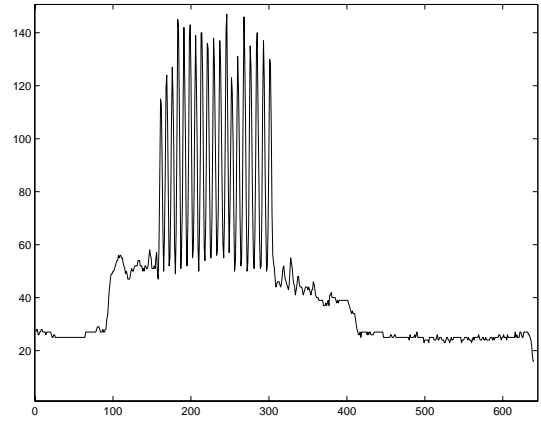


FIG. 2 – Profil d'intensité d'une ligne de l'image

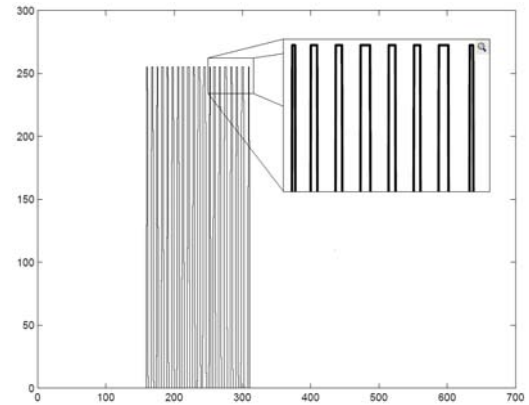


FIG. 3 – Dérivée seconde saturée du profil d'intensité

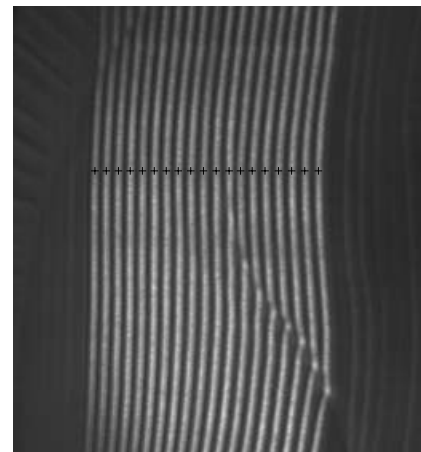


FIG. 4 – Les 19 pics détectés dans une ligne de l'image quand le laser est projeté sur un objet courbe

$$\begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i & v_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i \cdot X_i & -v_i \cdot X_i & -X_i \\ 0 & 0 & 0 & u_i & v_i & 1 & 0 & 0 & -u_i \cdot Y_i & -v_i \cdot Y_i & -Y_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_i & v_i & -u_i \cdot Z_i & -v_i \cdot Z_i & -Z_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \\ t_{33} \\ t_{41} \\ t_{42} \\ t_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6)$$

figure 5) l'égalité suivante entre les points 3D du quadrangle complet et les points images correspondants :

$$\frac{\overline{A'P'_A}}{\overline{A'G'}} = \frac{\overline{AP_A}}{\overline{AG}} \quad (7)$$

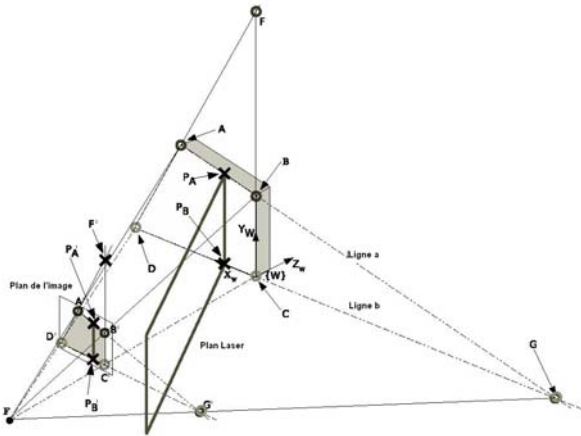


FIG. 5 – Birapport et quadrangle complet utilisé pour déterminer les correspondances 2D/3D

où  $A$  et  $B$  sont des points 3D connus ;  $A'$ ,  $B'$  et  $P'_A$  sont obtenus par l'analyse de l'image ;  $P_A$  est calculé à l'aide du birapport des points alignés. Les dimensions du quadrangle sont connues a priori. De plus, comme la surface du quadrangle est plane, la coordonnée  $Z$  est la même pour tous les points situés sur sa surface. Les projections  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  et  $D'$  dans l'image sont obtenues en calculant l'intersection des contours de l'image du quadrangle. Finalement, le point  $P'_A$  est calculé par l'intersection entre la droite  $A'B'$  et la droite correspondant au plan laser. Finalement  $P_A$  est calculé au moyen de l'équation 7. Le même principe est appliqué au point  $P_B$ . Si le quadrangle est déplacé le long de l'axe  $z$ , un ensemble de correspondances 2D/3D peut être établi pour chaque position en  $z$ . La matrice  ${}^W T_L$  de l'équation peut être estimée à l'aide d'un nombre suffisant de ces correspondances.

En général, deux correspondances seulement sont suffisantes pour chaque position. Mais puisque la précision

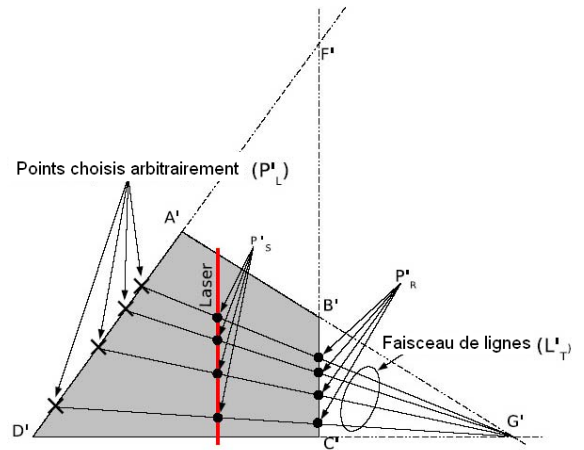


FIG. 6 – Génération de points pour accroître la précision du calibrage

du calibrage dépend directement du nombre de correspondances utilisés, un ensemble de points le long des lignes laser est sélectionné. Pour ce faire, des points ( $P'_L$ ) sont arbitrairement et automatiquement choisis dans le quadrangle (figure 6). Un faisceau de lignes joignant ces points avec  $G$  peut ainsi être obtenu. L'intersection de ces lignes avec une ligne laser interpolée nous donne des points supplémentaires de calibrage. La procédure pour déterminer les correspondances  $P_L$  avec les points  $P'_L$  reste la même que précédemment. De plus amples détails sont donnés dans [4]

### 3.3 Calcul de $T$ à partir des correspondances

La matrice de transformation peut être obtenue en minimisant l'équation 6, tirée de l'équation 3, où les  $t_{ij}$ 's sont les éléments de  ${}^W T_L$ , les  $(u_i, v_i)$  sont les points de l'image (en pixels) et les  $(X_i, Y_i, Z_i)$  sont les coordonnées des points 3D. La solution est obtenue par le calcul du vecteur  $\theta$  solution de l'équation  $A \cdot \theta = 0$ . Une bonne estimation de la solution est le vecteur propre correspondant à la plus petite valeur propre de  $A^T \cdot A$ .

## 4 Reconstruction

Une fois que le système est calibré et la matrice de transformation pour chaque ligne laser est calculée, les points 3D peuvent être reconstruits en utilisant la matrice de transformation correspondante. L'étape qui suit dans la reconstruction est la segmentation des lignes laser et la mise en correspondance. La segmentation est très délicate parce que dans la plupart des lignes de l'image, moins de 19 lignes laser sont détectées. La méthode utilisée est expliquée dans la section 3.1.

Une dernière étape consiste à interpoler les profils 3D obtenus de manière à obtenir une surface continue. Différentes possibilités ont été testées ; finalement, les splines ont été choisis pour l'interpolation. Le but est de déterminer les paramètres de la spline entre deux lignes laser consécutives de manière à interpoler des points dans ces régions. Les paramètres de la spline sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} x(t) &= a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x \\ y(t) &= a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y \\ z(t) &= a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z \end{aligned} \quad (8)$$

où  $t$  est égal à 0 pour le point initial, et est égal à 1 pour le point final. De plus, les équations de continuité pour la position et pour la dérivée première sont utilisées pour déterminer ces paramètres.

Dans notre cas, à partir de chaque ligne de l'image contenant plus de cinq lignes laser détectées, les splines sont générées. Les points peuvent être interpolés entre deux profils consécutifs en faisant varier  $t$  de 0 à 1.

Les avantages de l'interpolation sont mis en évidence par la comparaison des figures 7a et 7c. Dans la première, seuls quelques points sont reconstruits (ce qui est un inconvénient pour l'étape de recalage qui suivra) et la surface triangulée souffre de discontinuités. Dans la seconde, la surface interpolée donne un nuage de points plus uniforme (la forme de cette surface peut être observée sur la figure 15a).

## 5 Recalage

La surface que nous avons reconstruite ne représente qu'une partie de la scène. Il nous faut effectuer plusieurs acquisitions successives et recoller chaque nouvelle surface avec les surfaces précédemment reconstruites. Ce processus est connu sous le nom de recalage. Les lecteurs intéressés par le sujet peuvent se référer à un état de l'art complet récemment publié [7]. L'objectif du recalage est de déterminer le déplacement entre deux (ou plus) images de profondeur ou vues 3D. Si ce déplacement est très petit, ou une estimation de ce déplacement est connue, les techniques de recalage fin peuvent être directement appliquées. Ces techniques minimisent itérativement les distances entre les points correspondants des surfaces à recaler. Pour la méthode ICP [1], la distance à minimiser est la suivante :

$$f = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\vec{m}_i - R\vec{p}_i - \vec{t}\|^2 \quad (9)$$

où  $m_i$  et  $p_i$  sont les points de la seconde et de la première surface respectivement, et  $R$  et  $t$  sont les paramètres initiaux du déplacement.

Toutefois, quand le déplacement est inconnu, une étape préalable est nécessaire. Le but de cette étape, connue sous le nom de recalage grossier, est d'approximer le déplacement en établissant des correspondances entre les deux surfaces à recaler. Dans le cas qui nous intéresse, puisque l'acquisition entre deux images consécutives est très rapide, le déplacement du capteur (ou de l'objet) est très faible et une méthode de recalage fin peut être directement appliquée. Le déplacement entre deux prises d'image consécutives est calculé à partir d'une variante robuste de l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) [11]. C'est une méthode de recalage par paire, i.e. deux images seulement sont recalées simultanément. Pour appliquer cet algorithme, toutes les vues sont recalées par rapport à la dernière vue capturée de manière à obtenir la matrice de transformation  ${}^{i-1}T_i$  qui aligne deux vues consécutives.

Pour représenter la vue  $n$  dans le repère de la première vue, la matrice  ${}^1T_i$  est construite comme suit :

$${}^1T_i = \prod_{i=2}^n ({}^{i-1}T_i) \quad (10)$$

Théoriquement, cette procédure permet de représenter toutes les vues dans le même repère et d'ainsi reconstruire le modèle final. Cependant, comme le déplacement entre deux vues consécutives n'est pas exactement estimé, l'erreur est propagée à mesure des recalages successifs si bien qu'après quelques vues seulement, l'erreur peut être considérable (notamment quand l'objet est de forme lisse). Pour résoudre ce problème, nous proposons une méthode originale de minimisation de l'erreur. L'algorithme est basé sur la minimisation d'un coût dans un graphe de connectivité. Ce graphe représente les connexions entre les vues qui ont une région de recouvrement (partie commune entre deux morceaux de surface) suffisante. Le coût pour transformer une vue dans une autre est donné par l'erreur de recalage entre ces vues. L'objectif est de déterminer le meilleur chemin dans le graphe en minimisant le coût global de recalage (somme des erreurs des recalages partiels). Pour trouver ce meilleur chemin, le graphe de connectivité complet est construit (figure 8). Toutes les vues sont théoriquement représentées dans le même système de coordonnées en utilisant les paramètres de déplacement obtenus par la méthode de recalage ICP. Ainsi, toutes les vues sont recalées les unes par rapport aux autres, mais la plupart des recalages nous donnent une erreur importante à cause des régions de recouvrement trop petites. De bons résultats peuvent tout de même être obtenus avec des vues qui ne sont pas acquises consécutivement. Quand le graphe

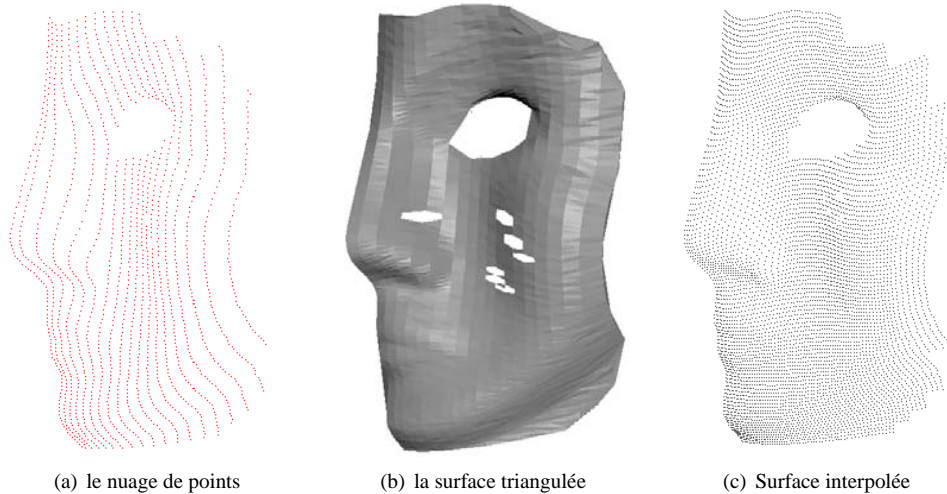


FIG. 7 – Reconstruction du objet

complet est construit, l’algorithme de Dijkstra lui est appliqué. Cet algorithme bien connu détermine le chemin optimal passant par toutes les vues par rapport à une vue de référence. Le résultat de l’algorithme est un graphe de connectivité réduit (figure 9). Ce graphe ne contient que le chemin minimal représentant chaque vue par rapport à la vue de référence. Le graphe de la figure 9 a été obtenu avec 10 vues partielles du modèle synthétique de la figure 12.

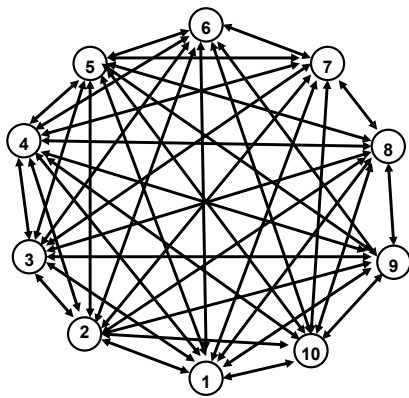


FIG. 8 – Graphe de connectivité initial

Ainsi, toutes les vues peuvent être représentées dans le même repère en appliquant le déplacement associé à chaque arête du graphe. Cependant, dans certaines situations, certaines vues peuvent être mal recalées (voir l’exemple de la figure 10). Pour éviter ce problème, le coût de recalage est calculé comme la somme de chaque erreur liée au chemin de correspondance. Alors, les vues admettant de trop grandes erreurs ne sont pas initialement considérées et le modèle initial est construit à partir des autres vues (figure 11). De plus, une reconstruction complète peut être obtenue si les vues mal intégrées sont recalées par rapport au modèle initial plutôt qu’à la sur-

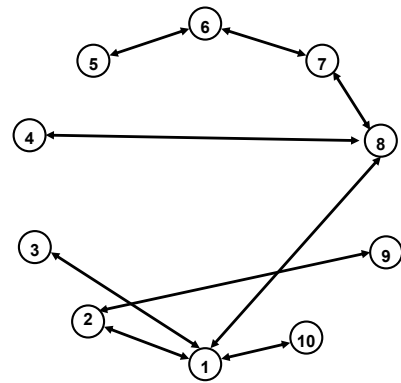


FIG. 9 – Exemple de graphe de connectivité réduit obtenu avec l’algorithme de Dijkstra. La vue 1 est la vue de référence, toutes les autres vues sont représentées par rapport à elle

face partielle. Comme ce modèle est plus grand que la vue partielle, la région de recouvrement est plus grande et les résultats du recalage s’en trouvent améliorés (figure 12). Les erreurs de recalage sont représentées dans le tableau 1. La première est l’erreur obtenue avec la méthode ICP traditionnelle, où les erreurs de propagation deviennent importantes, notamment après la vue 4. La deuxième erreur est celle obtenue après la réduction du graphe (après l’algorithme de Dijkstra). La troisième erreur est celle obtenue après que les deux vues produisant une erreur de recalage importante aient été recalées une seconde fois mais par rapport au modèle complet (l’ensemble des 8 meilleures vues). On peut affiner encore le recalage en éliminant à chaque iteration la plus mauvaise vue pour la recalcr directement sur le modèle complet, jusqu’à ce que l’erreur maximale soit inférieure à un seuil ou bien jusqu’à ce qu’on n’obtienne plus d’améliorations. Les erreurs obtenues dans ce

cas sont représentées dans la dernière colonne. Finalement, toutes les surfaces peuvent être fusionnées grâce aux techniques de *Volume integration* [3] ou *Mesh Integration* [9].

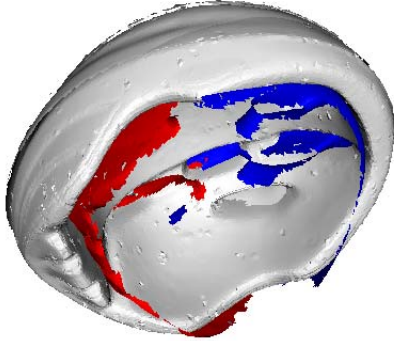


FIG. 10 – Modèle final à partir de la méthode traditionnelle de recalage obtenus sur des données synthétiques

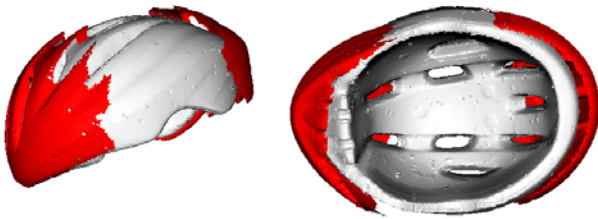


FIG. 11 – Modèle final obtenu par notre méthode sans élimination des vues mal recalées

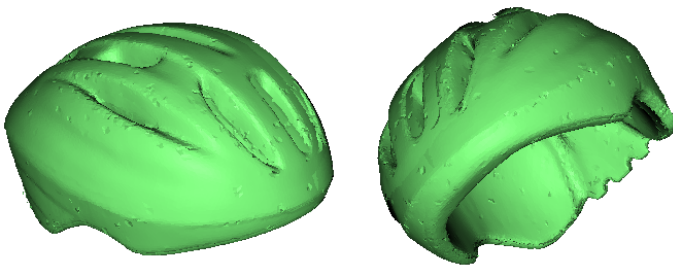


FIG. 12 – Modèle final obtenu en ajoutant les vues mal recalées au modèle intégré en les recalant par rapport au modèle initial

## 6 Résultats expérimentaux

Un capteur composé d'une caméra, d'une source laser à 635 nm et d'une lentille optique qui dévie le faisceau en 19 plans a été configuré et installé. Un quadrangle de calibration a été placé à plusieurs distances du capteur par

TAB. 1 – Erreurs en le recalage du modèle synthétique

Vue	Erreur du angle du rotation			
	ICP traditionnel	Après Dijkstra	Raffinement (2 itérations)	Raffinement final ( $n$ itérations)
2	0.32°	0.32°	0.32°	0°
3	0.71°	1.90°	1.90°	0°
4	6.40°	3.49°	3.49°	0°
5	8.23°	1.29°	1.29°	0°
6	8.34°	1.20°	1.20°	0°
7	9.11°	0.57°	0.57°	0°
8	9.75°	0.49°	0.49°	0°
9	13.87°	11.15°	0.31°	0°
10	17.1°	16.42°	0.32°	0°

incréments de 2 mm. Le plan le plus proche est placé approximativement à une distance de 20 cm du capteur. Pour chaque position du quadrangle, deux images ont été acquises : a) la première est une image du quadrangle b) la seconde est une image de la projection du laser sur le quadrangle. La première est utilisée pour déterminer les paramètres du quadrangle, tandis que la seconde permet de déterminer la géométrie de la projection laser. Chaque ligne laser est déterminée par une séquence de  $n$  correspondances qui sont utilisées pour calculer les matrices de transformation de chacune ( $n$  est le nombre de plans utilisés pour la calibration). Pour chaque distance  $z$ , 27 correspondances sont utilisées pour le calibrage de chaque plan laser.

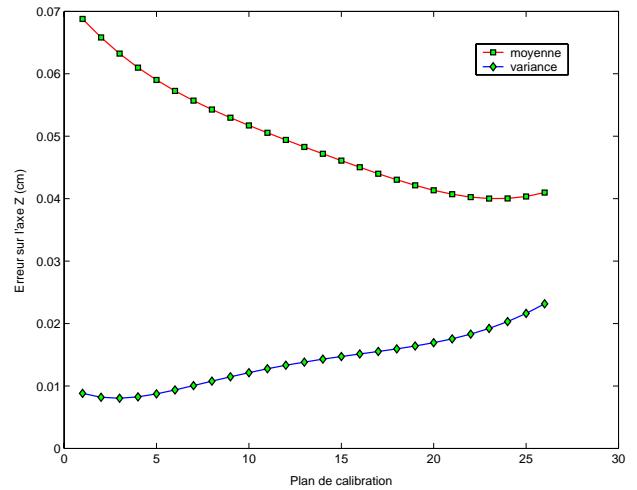


FIG. 13 – Précision obtenue par rapport à la profondeur (axe des  $z$ )

La précision du système est calculée grâce à l'écart entre les points 3D reconstruits et les points 3D utilisés dans la procédure de calibration. Les résultats sont illustrés par la figure 13. L'erreur est représentée suivant l'axe des  $z$  qui est l'axe le plus sensible et qui est directement lié à la profondeur. Les résultats sont satisfaisants dans une aire centrée sur les distances pour lesquelles le capteur a été calibré ; la précision décroît quand on rapproche trop l'objet du capteur.



FIG. 14 – Objet utilisé pour les expériences

Une fois que les paramètres de calibrage ont été déterminés, il faut d'acquérir plusieurs images de profondeur d'un même objet dans le but de construire un modèle complet (figure 16). Dans ce cas, le capteur est fixe et l'objet est lentement déplacé. Quand toutes les vues sont acquises, l'étape de reconstruction est appliquée. Les reconstructions partielles sont présentées sur la figure 15.

Quand toutes les vues sont reconstruites et interpolées, l'étape de recalage est appliquée. Le procédé consiste à calculer le déplacement entre toutes les vues consécutives par la méthode ICP et d'appliquer la méthode de minimisation de l'erreur que nous avons développée. Le résultat final est présenté dans la figure 16.



FIG. 16 – Modèle final obtenu par le recalage de dix vues consécutives

## 7 Conclusion

Cet article présente une méthode originale de reconstruction de modèles 3D complets. Un capteur à triangulation composé d'une caméra et d'une source laser multi-lignes est utilisé pour l'acquisition de la surface à reconstruire. Un recalage des surfaces partielles est effectué pour obtenir le modèle complet. Ce système a l'avantage de fournir un morceau de surface à chaque acquisition, ce qui permet d'appliquer les techniques de recalage même dans le cas de mouvements non contrôlés ou en présence de vibrations. Le calibrage du capteur tire avantage de l'utilisation du quadrangle complet et le traitement des images, d'un détecteur de pics efficace et élégant donnant une précision sous-pixel.

L'utilisation d'un graphe de connectivité et, plus généralement, la méthode de minimisation de l'erreur de recalage, permet d'obtenir un modèle global sans désalignements provoqués par propagation de l'erreur. Les résultats expérimentaux montrent que la précision obtenue dans l'étape de reconstruction est tout à fait correcte (moins de 0.5 mm d'erreur dans l'aire de calibrage) et la reconstruction d'objets réels donne de bons résultats visuels.

De plus, nous avons présenté un algorithme de fusion de vues partielles d'un même objet. Les travaux présentés ici ne montrent que les résultats obtenus à partir de dix vues ; pour nos travaux futurs, notre objectif sera de fusionner un nombre suffisant de vues pour reconstruire le modèle complet de l'objet.

## Références

- [1] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *PAMI*, 14(2) :239–256, February 1992.
- [2] C. Chen and A. Kak. Modelling and calibration of a structured light scanner for 3d robot vision. In *IEEE conference on robotics and automation*, pages 807–815, 1987.
- [3] B. Curless and M. Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Computer Graphics*, pages 303–312, August 1996.
- [4] J. Forest. *New methods for triangulation-based shaped acquisition using laser scanners*. PhD thesis, University of Girona, 2004.
- [5] J. Forest and J. Salvi. An overview of laser slit 3d digitasers. In *International Conference on Robots and Systems*, pages 73–78, Lausanne, October 2002.
- [6] J. Forest, J. Salvi, and C. ; Cabruja, E. and Pous. Laser stripe peak detector for 3d scanners. a fir filter approach. In *International Conference on Pattern Recognition*, volume 3, pages 646 – 649, Cambridge, United Kingdom, August 2004.
- [7] C. Matabosch, J. Salvi, D. Fofi, and F. Meriaudeau F. Range image registration for industrial inspection. In *Machine Vision Applications in Industrial Inspection*, San Jose, California, USA, January 2005.



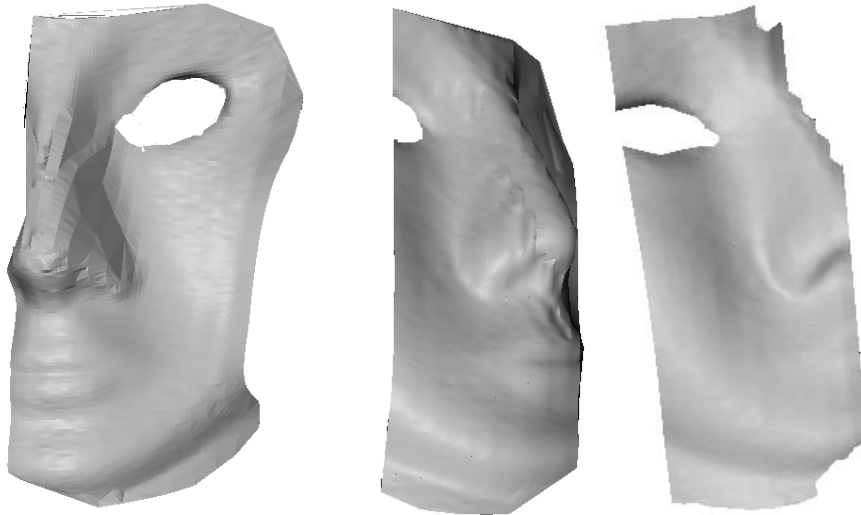


FIG. 15 – Trois vues partielles de l'objet

- [8] J. Pagès and J. Salvi. A new optimised de bruijn coding strategy for structured light patterns. In *17th International Conference on Pattern Recognition*, volume 4, pages 284 – 287, Cambridge, United Kingdom, August 2004.
- [9] X. Peng, Z. Zhang, and H.J. Tiziani. 3-d imaging and modeling - part ii : integration and duplication. *Optik-International Journal for Light and Electron*, 113(110) :203–231, November 2002.
- [10] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, 37(4) :827–849, April 2004.
- [11] E. Trucco, A. Fusiello, and V. Roberto. Robust motion and correspondences of noisy 3-d point sets with missing data. *Pattern Recognition Letters*, 20(9) :889–898, September 1999.