

Recalage de séquences spatiales d'images en vue d'une évaluation dimensionnelle de surfaces libres

Registration of spatial image sequences for quantitative evaluation of free-form surfaces

par Ch. SCHOENENBERGER, P. GRAEBLING, E. HIRSCH

Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (UPRES-A CNRS 7005),
École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, Université Louis Pasteur,
Boulevard Sébastien Brant, F-67400 Illkirch, France. Tél : 03.88.65.50.52, Fax : 03.88.65.51.33,
{Christophe.Schoenenberger,Pierre.Graebling,Ernest.Hirsch}@ensps.u-strasbg.fr

résumé et mots clés

Cette contribution décrit une méthode itérative de recalage de séquences spatiales d'images en vue d'une mesure 3D précise et d'une reconstruction de surfaces gauches quelconques. Chaque image est représentée par une collection de points 3D caractérisant la surface à analyser, obtenue par une technique de projection de lumière structurée. La nouveauté de notre méthode de recalage réside dans l'interpolation des surfaces imagées pour l'étape d'appariement et dans la détermination automatique de la zone de recouvrement entre deux images consécutives de la séquence. L'utilisation d'un critère statistique permet d'éliminer les appariements de mauvaise qualité. Le déplacement effectif est calculé par une technique de moindres carrés reposant sur les quaternions unitaires en connaissant *a priori* et approximativement le déplacement entre deux positions du système de prise de vues. Le traitement de la séquence complète permet d'exprimer les points de toutes les images dans un même référentiel. Des résultats expérimentaux sur des données synthétiques et réelles montrent que cette méthode de recalage est robuste et précise.

Vision par ordinateur, séquences spatiales d'images, recalage, reconstruction 3D, métrologie.

abstract and key words

This contribution describes an iterative registration method of spatial image sequences in view of accurate measurements and 3D reconstruction of free-form surfaces. Each image is represented by a set of 3D points characterizing the surface to be analyzed, gained with a technique based on the use of a structured light. The novelty of our registration method lies in interpolation of the imaged surfaces for the matching step and in the automated determination of the overlap region between two consecutive images of the sequence. The use of a statistical criterion enables to discard the matchings of bad quality. The actual displacement is computed using a least-squares technique based on unit quaternions and knowing *a priori* and approximately the displacement between two positions of the sensor. Processing the whole sequence enables to express the points of all images in a common reference frame. Results on both synthetic and real sequences assess efficiency and robustness of this registration procedure.

Computer vision, spatial image sequence, registration, 3D reconstruction, metrology

1. introduction

Le recalage 3D est devenu, dans les dernières années, un des centres d'intérêt qui se développe le plus dans le domaine de la vision par ordinateur. Pour un large spectre d'applications (reconnaissance/reconstruction de formes, analyse quantitative, etc.) [2, 3, 25, 26], des descriptions 3D sont nécessaires et peuvent être obtenues par triangulation (stéréovision [39], lumière structurée [18], etc.). Cependant, pour des applications nécessitant une grande précision et compte tenu de la résolution limitée des caméras CCD standards généralement utilisées, une acquisition unique ne permet pas de couvrir en totalité la zone d'intérêt à analyser. Il est alors indispensable d'acquérir une collection d'images et de les combiner entre elles afin d'en déduire une description unique de la zone imagée. L'objectif de l'étude présentée est de recalibrer précisément et automatiquement toutes les images d'une séquence spatiale représentant la zone à évaluer. La méthode que nous avons développée repose sur un principe itératif minimisant la distance moyenne entre les points appariés dans la zone de recouvrement entre deux images consécutives à recalibrer. Les particularités de notre algorithme sont, d'une part, la détermination automatique de la zone de recouvrement entre deux images de manière à réduire l'espace de recherche pour la mise en correspondance sans altérer la précision finale sur le recalage et, d'autre part, une phase d'appariement reposant sur l'interpolation des nuages de points 3D par des surfaces pour obtenir une mise en correspondance précise. Deux approches ont été développées. La première méthode fait appel à l'utilisation de fonctions du type splines de lissage tandis que la deuxième approche est basée sur les NURBS. Ces deux approches ont été retenues car elles permettent de représenter aussi bien des surfaces géométriques simples (plan, cylindre, etc.) que des surfaces libres. Cet article s'articule autour de 4 parties. La section 2 fait un tour d'horizon non exhaustif des principales méthodes de recalage que l'on peut rencontrer dans la littérature et décrit le principe du système d'acquisition. Dans la section 3, l'algorithme de recalage développé est décrit. Les résultats expérimentaux, obtenus en utilisant l'algorithme de recalage, sont exposés dans la section 4 à partir de données synthétiques et réelles. Finalement, une brève conclusion termine la contribution.

2. recalage et système de mesure

2.1. description du système de mesure

Le système d'acquisition et de mesure utilisé pour ces travaux a été développé dans le cadre du projet ESPRIT P2091 VIMP

(« *Vision based on-line Inspection of Manufactured Parts* ») [18, 17], dont le but est l'analyse en temps réel et sans contact de pièces manufacturées quasi-polyédriques comportant partiellement des surfaces libres. Les images réelles sont obtenues après projection d'une lumière structurée sur l'objet. Les coordonnées 3D des points matérialisés par la projection sont obtenues avec une précision de l'ordre de $20 \mu\text{m}$ pour un champ de vue approximatif de $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$. L'analyse proprement dite repose sur une comparaison, en ligne et en temps réel production, entre les images réelles des pièces et des images conceptuelles obtenues à partir des données géométriques du modèle CAO associé incluant les tolérances. La précision et la vitesse d'analyse représentent deux points clés de ce système. En particulier, les images doivent être exploitées au fur et à mesure de leur acquisition, afin de ne pas pénaliser la vitesse d'analyse des pièces à inspecter.

De manière à couvrir en totalité la zone à analyser, il faut bien souvent acquérir une séquence d'images. Par ce mécanisme, la précision désirée n'est pas amoindrie contrairement aux solutions alternatives qui consistent à élargir par exemple le champ de vue. Afin de pouvoir ainsi évaluer/reconstruire la pièce dans sa totalité, il faut être capable de recalibrer les différentes images. La figure 1 illustre le principe du système d'acquisition et de mesure d'une séquence d'images.

La relation entre le projecteur et la caméra étant fixe et la pièce étant supposée être rigide pendant toute la durée de la phase d'acquisition, les points 3D reconstruits à partir des différentes images de la séquence correspondent à des positions différentes sur la surface de l'objet, même lorsque ces points font partie d'une zone de recouvrement commune à deux ou plusieurs images. De ce fait, il est impossible de recalibrer directement les images dans un espace 2D puisque les points matérialisés dans les deux images sont différents. Seules les méthodes de recalage 3D peuvent ainsi être envisagées pour notre application.

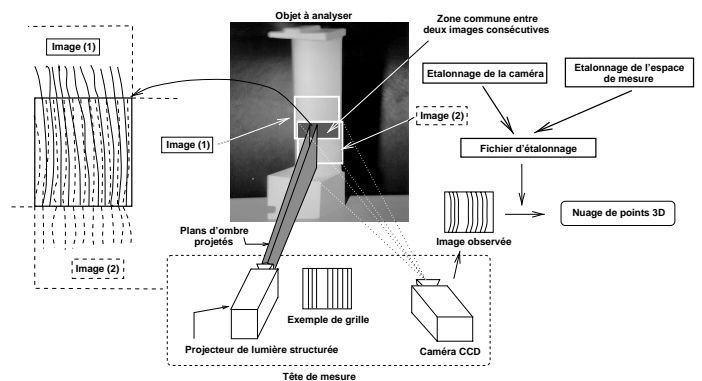


Figure 1. – Principes du système d'acquisition et de mesure d'une séquence spatiale d'images.

2.2. le recalage 3D : État de l'art

Recaler deux images consécutives d'une même séquence revient à déterminer la transformation qui existe entre les systèmes de coordonnées des deux images, puis à appliquer cette transformation à l'une des deux images afin d'exprimer les deux ensembles de données dans un même référentiel. La détermination de la transformation nécessite une mise en correspondance de caractéristiques communes aux images à recalage. De nombreuses méthodes de recalage ont été développées et trouvent des applications dans divers domaines tels que la médecine, la télédétection, la CAO ou encore la reconnaissance des formes [7, 33].

Une approche classique, pour ce genre de problème, consiste à mettre en correspondance des indices image particuliers. Parmi les indices les plus utilisés, on peut citer les segments de droite ([23]), les centres de gravité de régions homogènes ([16, 14]) ou encore des indices plus complexes tels que les lignes de niveau ([22]). Une telle approche nécessite la présence de ces caractéristiques dans l'image, ce qui n'est pas toujours vérifié, en particulier dans le cas de pièces manufacturées comportant des surfaces libres. D'autre part, ces techniques, plus adaptées à un recalage 2D, supposent un traitement préalable des données images bruitées pour les rendre plus compactes à traiter. Une alternative est d'utiliser directement les nuages de points 3D caractérisant les images ([4, 5, 6, 9, 39]) pour la mise en correspondance de primitives. Avec le système d'acquisition utilisé, les points 3D sont reconstruits avec une précision de l'ordre de $20 \mu m$ et sont directement disponibles après le traitement d'une image isolée (pouvant être effectué en temps réel vidéo). Ils ne nécessitent donc pas de traitement complémentaire comme c'est le cas pour d'autres primitives. Ces points, disponibles en grande quantité, vérifient en particulier les critères définis par Ton [37] pour de bons candidats pour une mise en correspondance (extractabilité, fréquence d'apparition, stabilité, etc.).

Ce type de méthodes suscite incontestablement un grand intérêt [7]. Un recalage reposant sur ce type d'appariements met généralement en œuvre des procédés itératifs basés, très fréquemment, sur l'algorithme ICP (**I**terative **C**losest **P**oint) ([5, 39]), qui minimise la distance moyenne entre les deux images à recalage. Schématiquement, ce type d'algorithme peut être vu, pour une itération, comme l'enchaînement des trois étapes suivantes : la sélection et mise en correspondance des primitives, la détermination de la transformation qui permet de recalage les deux images et l'application de cette transformation afin d'exprimer les deux images dans un référentiel commun.

Le calcul de la transformation, supposée rigide, implique la détermination des paramètres d'une rotation et d'une translation. Différentes méthodes de détermination de cette transformation ont été développées [1, 21, 38]. Elles se différencient essentiellement par le mode de représentation de la rotation (vecteur, quaternion unitaire, quaternion dual, etc.). La détermination de la transformation optimale revient à résoudre un problème de minimisation qui peut être énoncé de la manière suivante :

Etant donné un ensemble $E = \{(C, C')\}$ de paires (C, C') de primitives appariées et extraites respectivement de la première et de la seconde images, déterminer la fonction $\psi : C \mapsto C' = \psi(C)$ qui minimise la norme euclidienne donnée par l'expression

$$\sum_{(C, C') \in E} \|C' - \psi(C)\|^2 \quad (1)$$

Bien souvent, une itération unique ne permet pas de minimiser cette distance. De ce fait, les trois étapes énumérées ci-dessus sont itérées. Dans [5], Besl recalage ainsi une image par rapport à un modèle en supposant que l'image représente un sous-ensemble de celui-ci. Cette situation est cependant rarement vérifiée en pratique (en particulier dans notre cas). Dans [39], Zhang a développé un algorithme similaire pour recalage deux nuages de points 3D obtenus en utilisant la stéréovision par corrélation. Les points d'une vue (dans son cas, une carte de profondeur dense) sont itérativement appariés avec les points les plus proches de l'autre vue. La différence essentielle entre ces deux travaux réside dans l'utilisation du critère de minimisation (1). Contrairement à Besl, Zhang prend en compte le cas de figure où un point de la première vue peut être apparié raisonnablement ou non avec un point de l'autre vue. Ce type de processus itératif est très efficace et converge habituellement vers une solution lorsque les deux surfaces à recalage sont suffisamment proches l'une de l'autre. Cette condition est remplie dans notre application car l'acquisition peut être contrôlée. C'est pourquoi, nous avons décidé de développer une technique similaire pour le recalage.

3. algorithme de recalage

Comparé à des travaux similaires [5, 9, 39], notre algorithme (illustré par la figure 2), présente des nouveautés améliorant la mise en correspondance et réduisant l'espace de recherche pour la phase d'appariement. Il permet ainsi le traitement en ligne des images acquises, une condition imposée par les applications envisagées.

Plus précisément, les limites de la zone de recouvrement entre deux images à recalage sont déterminées automatiquement dès que deux images consécutives sont disponibles. Contrairement à l'approche similaire proposée par [35], la zone de recouvrement n'est pas déterminée après ajustement des données à un modèle de surface. L'avantage de notre approche est essentiellement de ne faire appel qu'aux mesures extraites des images sans approximation de celles-ci. Par ailleurs, la simplicité de notre technique permet un traitement « temps réel » des images, au fur et à mesure de leur acquisition. Plus précisément, pour mettre en

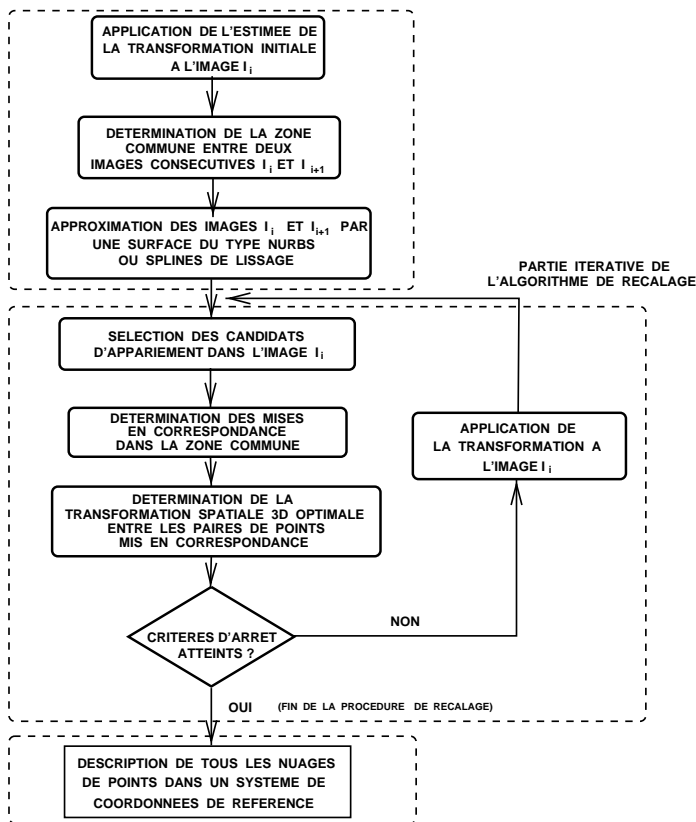


Figure 2. – Schéma-bloc de l'algorithme de recalage implémenté.

correspondance des indices images extraits des deux images (points 3D dans notre cas), plutôt que d'utiliser toutes les primitives disponibles dans celles-ci, nous avons choisi, pour des questions d'efficacité et contrairement à la majorité des applications nécessitant un recalage, de ne traiter que la zone commune aux images à recaler, ce recouvrement imageant dans les deux images la même partie de la surface de l'objet à évaluer. À cet effet, nous avons intégré dans la technique de recalage une procédure qui détermine de manière automatique la zone de recouvrement entre deux images consécutives. L'intérêt de la méthode développée est qu'elle allie à la fois précision et rapidité, tout en autorisant un traitement en ligne des images acquises. En effet, la zone de recouvrement est déterminée automatiquement dès que deux ensembles de points 3D sont disponibles. Elle ne nécessite pas de modélisation de ces ensembles, ni de connaissances supplémentaires comme, par exemple, le déplacement entre deux acquisitions successives. Elle peut donc être directement appliquée pour recaler deux images lors d'un traitement en ligne. Par ailleurs, grâce au seuillage automatique effectué sur l'histogramme des distances (voir figure 3.b), l'ensemble des points retenus représente avec précision l'ensemble des primitives permettant de caractériser sans erreur la zone de recouvrement. De ce fait, cela permet de réduire de façon considérable le temps d'exécution de la procédure de recalage sans alté-

rer notablement la précision finale du recalage. Enfin, la détermination automatique des zones de recouvrement a dans notre cas l'énorme avantage de permettre une automatisation complète de la procédure. Ceci était un des buts recherchés, compte tenu des applications envisagées.

Le second point clé de notre méthode est l'utilisation de modèles de surface pour la mise en correspondance des points 3D extraits de deux images consécutives. La nécessité, dans notre cas, d'une interpolation, préalablement au recalage proprement dit, peut être justifiée de la manière suivante. Un algorithme de recalage du type ICP repose, entre autres, sur une mise en correspondance d'indices image qui permet de déterminer la transformation optimale entre les images à recaler. Dans notre cas, les indices utilisés sont les points 3D fournis par le dispositif d'acquisition. La mise en correspondance entre les points d'une surface $S^{(1)}$ et les points d'une surface $S^{(2)}$ est habituellement réalisée en déterminant pour chaque point de $S^{(1)}$ le point correspondant le plus proche appartenant à $S^{(2)}$, de manière à former des couples de points appariés. Ceci suppose, en particulier, de pouvoir faire appel à des ensembles de points denses si l'on veut obtenir une bonne précision. Compte tenu de la nature de notre dispositif de mesure (voir section 2.1), ceci n'est pas notre cas. Par ailleurs, les points 3D obtenus à partir des différentes images d'une même séquence correspondent à des positions (matérialisations) différentes sur la surface de l'objet, même s'ils appartiennent à une zone de recouvrement commune à deux ou plusieurs images de la séquence. Établir une correspondance point à point ne faisant appel qu'aux mesures disponibles serait donc préjudiciable pour la précision du recalage. En effet, de telles approches ne sont efficaces que lorsque la densité de points disponibles est forte et homogène. Ces deux critères ne sont que rarement vérifiés pour notre dispositif d'acquisition qui privilégie la vitesse d'acquisition (quelques secondes pour une séquence complète, à comparer aux quelques heures nécessaire pour obtenir une image de profondeur dense comme cela est le cas par exemple dans [4] ou encore dans [35]). Pour pallier l'insuffisance de points et pour améliorer notablement la précision, nous avons donc choisi d'interpoler les points de la surface $S^{(2)}$ par un modèle de surface (TPS ou NURBS) et de mettre en correspondance chaque point P de $S^{(1)}$ avec le point de $S^{(2)}$ situé à l'intersection entre la droite normale issue de P et la surface $S^{(2)}$. L'interpolation permet ainsi de trouver un meilleur correspondant, sans être dans l'obligation de définir celui-ci comme étant un point de mesure. L'intérêt de l'interpolation réside donc principalement dans le fait qu'elle pallie de manière efficace la faible densité des points de mesure disponibles. Elle constitue ainsi une manière efficace d'utiliser les mesures (points 3D) disponibles. Enfin, on peut remarquer que notre approche, comme le suggère [11], ne fait pas d'hypothèses sur la connectivité des points : le point de $S^{(1)}$ à appairer est choisi « au hasard », les points de $S^{(1)}$ étant traités séquentiellement. L'interpolation des points de $S^{(2)}$ a pour seul but de décrire analytiquement le voisinage de la zone où se trouve le correspondant recherché et per-

met, par conséquent, de trouver une « meilleure mesure » de ce dernier. En résumé, comme paramètres d'entrée, l'algorithme utilise deux nuages de points 3D ainsi qu'une estimation du déplacement fournie par le scanner mécanique que nous utilisons. En sortie, nous récupérons la transformation rigide 3D optimale entre les deux ensembles de points. Nous allons d'abord décrire la procédure de recalage entre deux images pour ensuite généraliser cette opération à une séquences d'images.

3.1. phase d'initialisation

Dans la phase d'initialisation sont regroupés les traitements réduisant l'espace de recherche pour la phase de mise en correspondance tout en permettant d'améliorer celle-ci. Le processus de recalage repose sur l'hypothèse que deux images consécutives d'une séquence sont liées par une zone commune, de manière à garantir la continuité de la surface d'une image à l'autre de la séquence. La connaissance des limites de cette zone de recouvrement permet de réduire l'espace de recherche pour l'appariement car seuls les points 3D situés dans cette zone seront utilisés

3.1.1. détermination de la zone commune entre 2 nuages de points

Dans la grande majorité des applications nécessitant un recalage, toutes les primitives disponibles dans les images sont utilisées pour effectuer les mises en correspondance. Cependant, cette pratique est très coûteuse en temps de calcul et donc pénalisante pour des applications nécessitant des temps de traitement courts. Pour pallier cet inconvénient, une des solutions consiste à ne prendre, au départ, qu'un nombre limité de primitives. Ensuite, au fur et à mesure du déroulement du traitement, de plus en plus de primitives sont prises en compte pour obtenir une convergence rapide. Zhang [39] a utilisé cette stratégie, appelée « stratégie du plus grossier au plus fin » (*coarse-to-fine strategy*), pour recalculer deux nuages de points (avec une précision de l'ordre du centimètre) obtenus par stéréovision dans le but de contrôler la trajectoire d'un véhicule autonome.

Comme nous cherchons à obtenir un recalage très précis tout en minimisant le nombre d'itérations, en vue d'effectuer une analyse dimensionnelle de surfaces de forme libre, ce type de stratégie ne peut pas directement être employé car toutes les informations disponibles ne sont pas prises en compte. Comme seuls les points situés dans la zone de recouvrement sont intéressants pour la mise en correspondance, il est utile de connaître les limites de cette zone. Le principe de la détermination des limites de la zone de recouvrement repose sur le calcul de la distance minimale entre un point de la première vue et le nuage de points de l'autre vue. Ceci revient à trouver le point le plus proche de ce point dans le deuxième ensemble. L'utilisation d'un arbre

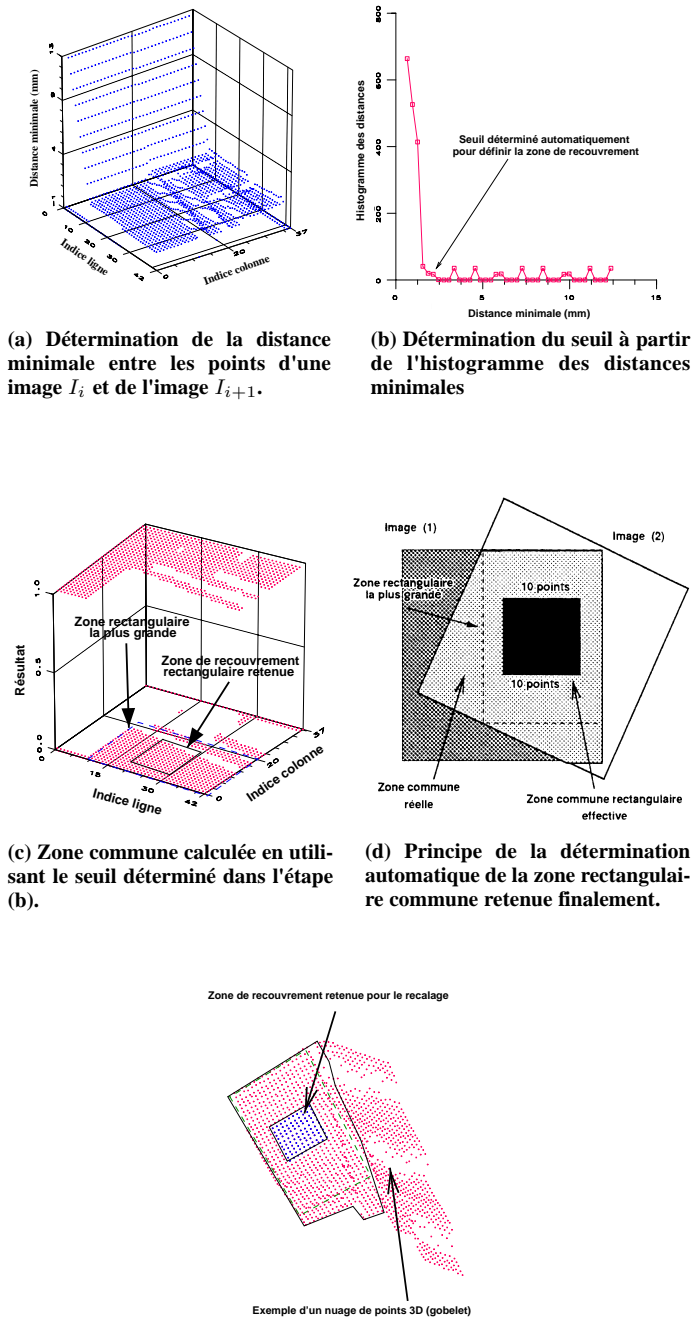
binaire tridimensionnel (*3-D-tree* pour *3-dimensional binary search tree*) permet d'accélérer considérablement le processus [31]. Une telle méthode a été implémentée dans notre système.

Traditionnellement, un arbre 3D binaire se construit en divisant successivement l'espace 3D par des plans de coupe ((xoy) , (yoz) et (zox)) en une collection de sous-ensembles de plus en plus petits. Ainsi, chaque feuille de l'arbre contient un point 3D et chaque nœud contient les informations relatives au plan de coupe. Dans notre application, nous utilisons une version modifiée de cette technique. Au lieu de déterminer le point Q qui coupe l'espace en deux sous-ensembles contenant chacun un même nombre de points, nous recherchons, dans la direction perpendiculaire au plan de coupe, les coordonnées extrêmes des points à répartir. Ensuite, le plan de coupe est positionné à la valeur moyenne des extrêmes obtenus. Cette modification de la conception standard de l'arbre est justifiée par le fait que nous disposons de points 3D à peu près régulièrement répartis. Dans ce cas, l'arbre est assez bien équilibré pour permettre une recherche indépendante par rapport au chemin à parcourir.

Pour chaque point de la première image, on obtient le point de la seconde image pour lequel la distance est minimale en parcourant l'arbre jusqu'à atteindre une feuille. Le résultat d'une telle recherche est illustré par la figure 3.a. Comparée à une technique basée sur l'utilisation d'histogrammes pour calculer les distances minimales, l'utilisation de l'arbre 3D binaire est 15 à 20 fois plus rapide. En fonction du déplacement imposé et de la forme de la surface à analyser, la taille et la forme de cette région peuvent varier considérablement. Ainsi, nous déterminons automatiquement la plus grande zone rectangulaire contenue dans la zone déterminée préalablement dans le but d'utiliser les deux variantes de la méthode de mise en correspondance décrites dans la section 3.1.2. Ensuite, la zone commune effectivement prise en compte est une sous-région rectangulaire de taille maximale 100 points (10×10 points) centrée dans la zone rectangulaire déterminée précédemment. Cette taille représente un bon compromis entre la précision de modélisation et le temps de calcul nécessaire à celle-ci. Cette taille a été déterminée expérimentalement. Au delà de 100 points, la procédure de recalage ne permet plus d'augmenter significativement la précision.

3.1.2. modélisation de points 3D par une surface

Pour obtenir une mise en correspondance précise, les nuages de points 3D sont modélisés dans la zone de recouvrement entre les deux images à recalculer et dont les limites ont été déterminées dans la section 3.1.1. Il s'agit donc de résoudre un problème d'approximation au sens général du terme qui consiste à trouver une surface $S(x, y)$ qui approche au mieux un ensemble de points 3D. Comme le souligne Greiner [19], la meilleure approche possible est l'interpolation car les points 3D sont généralement des points de mesure représentatifs de la surface. Cependant, lorsqu'un grand nombre de points de mesure est dis-



(a) Détermination de la distance minimale entre les points d'une image I_i et de l'image I_{i+1} .
 (b) Détermination du seuil à partir de l'histogramme des distances minimales
 (c) Zone commune calculée en utilisant le seuil déterminé dans l'étape (b).
 (d) Principe de la détermination automatique de la zone rectangulaire commune retenue finalement.
 (e) Illustration des étapes nécessaires pour déterminer la zone commune, c'est-à-dire la zone rectangulaire centrale contenant environ une centaine de points.

Figure 3. – Principe de la recherche automatique de la zone commune à deux images consécutives.

ponible et que ces points sont entachés d'erreur (en particulier, lorsque les points ont subi un traitement préalable), l'approche par approximation au sens des moindres carrés est plus judicieuse car les éventuels points de mesures entachés d'erreur sont soumis à une certaine forme de « lissage ». Mais, dès lors qu'une

mesure dimensionnelle doit être effectuée sur une pièce où les éventuelles imperfections d'une partie de la surface doivent être détectées, ce principe n'est plus applicable car les éventuels défauts à détecter pourraient être lissés de manière à devenir des valeurs acceptables, dans les tolérances associées aux caractéristiques dimensionnelles de la surface. Pour toutes ces raisons, nous avons retenu une approche reposant sur l'interpolation des nuages de points 3D par une surface.

Parmi les nombreux modèles de surface développés [15, 27], nous en avons retenu deux. Le premier repose sur l'utilisation de splines de lissage [20] tandis que le deuxième fait appel à une représentation paramétrique de la surface à l'aide de fonctions rationnelles B-spline à répartition non uniforme (NURBS) [13, 30]. Nous avons retenu ces deux techniques d'interpolation car elles sont capables de représenter aussi bien des surfaces telles que les coniques ou les quadriques, que des surfaces libres. Dans le cadre du recalage, ces deux techniques ont été mise en œuvre afin de pouvoir les comparer du point de vue de la précision et du temps d'exécution.

Ces deux techniques de modélisation ont aussi été comparées entre elles du point de vue du respect de la forme de la surface. À cet effet, des nuages de points ont été interpolés par des surfaces NURBS et des surfaces du type splines de lissage. Aux différents nœuds du maillage, les deux types de surfaces ont été comparés dans la direction Z . En moyenne, l'écart entre les deux surfaces ($D(mm) = Z_{NURBS} - Z_{TPS}$) est de $0.35 \mu m$ avec une déviation d'amplitude maximale de $30 \mu m$ (en valeur absolue). Des résultats tout à fait comparables ont été observés avec d'autres nuages de points matérialisant les divers objets réels utilisés dans la section 4, ce qui montre bien que les deux techniques de modélisation sont sensiblement équivalentes et conduisent à des précisions du recalage du même ordre de grandeur (voir section 4).

3.2. phase itérative

3.2.1. mise en correspondance des primitives

À chaque nouvelle acquisition, nous disposons d'une estimation initiale $T_0(R, t)$ du déplacement entre deux positions successives de prise de vue. Après application de T_0 à la première image, caractérisée par un nuage de points 3D $\{Q_{i,j}^{(1)}\}$, on peut raisonnablement supposer que les images à recaler sont proches l'une de l'autre. Dans la zone de recouvrement, le point $Q_{i,j}^{(2)}$ dans le deuxième nuage de points 3D $\{Q_{i,j}^{(2)}\}$, correspondant du point $Q_{i,j}^{(1)}$, est défini comme étant l'intersection entre la droite normale issue de $Q_{i,j}^{(1)}$ et la surface $S^{(2)}$, résultat de l'interpolation du nuage de points $\{Q_{i,j}^{(2)}\}$. En fonction du modèle de représentation utilisé (splines de lissage ou NURBS), nous avons développé deux approches de mise en correspondance qui se distinguent essentiellement par la manière dont l'intersection

entre une droite et une surface est calculée. Par ailleurs, de manière à déterminer précisément les droites normales aux points $Q_{i,j}^{(1)}$ dans la zone de recouvrement, ce nuage de points a également été interpolé par une des techniques décrites dans la section 3.1.2. La surface résultante est notée $S^{(1)}$.

Calcul des intersections entre une droite et une surface splines de lissage. Calculer l'intersection entre la droite normale au point $Q_{i,j}^{(1)}$ et la surface $S^{(2)}$ est un problème complexe car la résolution directe du système correspondant est non-linéaire. C'est pourquoi, nous avons développé une approche similaire à la méthode itérative de Newton qui permet de trouver les zéros d'une équation du type $y = f(x)$.

Calcul des intersections entre une droite et une surface NURBS. Les techniques développées pour résoudre ce problème reposent sur la détermination des intersections entre les droites et l'enveloppe convexe (polyèdre formé à partir des pôles qui définissent la surface). Dans le but de résoudre ce problème d'une manière aussi précise que possible, on décompose des surfaces du type NURBS en carreaux de Bézier. Cette transformation a un sens puisqu'une surface de Bézier est un cas particulier d'une surface B-Spline. Au lieu d'affiner progressivement le maillage de pôles de la surface du type NURBS, nous avons choisi de transformer celle-ci en surface de Bézier afin de pouvoir appliquer une méthode itérative efficace et simple, développée par Nishita et al. [28], pour déterminer l'intersection entre une droite et des carreaux de Bézier par une technique du type « Bézier Clipping » [8]

Validation des appariements. Pour obtenir une précision sur le recalage aussi grande que possible, les appariements trouvés précédemment doivent être de bonne qualité. C'est pourquoi, nous avons appliqué une méthode de tri sélectif comparable à celle utilisée par Zhang[39] pour éliminer les mises en correspondance de mauvaise qualité. En effet, comme nous cherchons à minimiser la distance entre deux images représentées par des nuages de points et correspondant à un même objet, nous pouvons raisonnablement supposer qu'au fur et à mesure du déroulement de la boucle itérative, la distance entre les appariements déterminés diminue progressivement. L'emploi de ce critère est entièrement justifié comme le montre l'histogramme des distances (figure 4(a)) obtenu au cours du recalage d'une séquence typique d'images. Compte tenu des expériences menées, un seuil raisonnable ε_a , pour notre application, peut être défini par la relation :

$$\varepsilon_a = d_a + \sigma_a$$

où d_a et σ_a représentent respectivement la distance moyenne entre les n appariements et l'écart-type associé à d_a . Ainsi, lorsque la distance entre une paire de points mis en correspondance est supérieure à ε_a , cet appariement est rejeté pour le calcul de la transformation optimale. Dans le cas contraire, la mise en correspondance est validée.

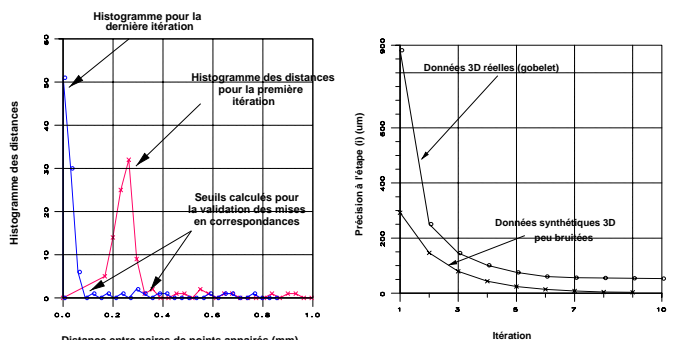
3.2.2. détermination de la transformation entre deux nuages de points

Nous avons obtenu dans la section 3.2.1. un certain nombre de mises en correspondance qui ne sont pas idéales. La transformation rigide \mathcal{F} recherchée peut être décomposée en une rotation, caractérisée par une matrice R , et une translation de vecteur t . Pour calculer cette transformation, il est nécessaire de minimiser la quantité $E(R, t)$ telle que :

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^{i=n} \| RP_i^{(1)} + t - P_i^{(2)} \|^2 \quad (2)$$

où $\{(P_i^{(1)}, P_i^{(2)})\}$ représentent les couples de points 3D appariés. Plusieurs approches efficaces ont été suggérées et mises en œuvre. En utilisant la robustesse comme critère majeur pour choisir une méthode, nous avons implanté et comparé quatre approches basées respectivement sur les quaternions unitaires [21], les quaternions duaux [38], la décomposition en valeurs singulières [1] et la résolution d'un système surdéterminé d'équations [24]. Une étude comparative des quatre implémentations correspondantes en fonction du temps d'exécution pour calculer les transformations et de la précision sur \mathcal{F} a conduit à la conclusion que l'approche faisant appel aux quaternions unitaires présente le meilleur compromis compte tenu des contraintes que nous nous sommes fixées.

Connaissant la transformation \mathcal{F} , la dernière étape du traitement de la partie itérative de la procédure de recalage consiste à appliquer cette transformation à tous les points d'une image (dans notre cas, celle n'ayant pas été utilisée comme référence) y compris à ceux qui n'ont pas été utilisés pour le recalage. Cette étape permet d'exprimer les données extraites des deux images recalées dans un référentiel commun. La précision observée (voir figure 4 (b)) est le critère d'arrêt principal de la procédure itérative de recalage. On peut observer que la précision en fonction de



(a) Exemple d'histogrammes des distances entre paires de points appariés pour la première et la dernière itération du processus de recalage. (b) Evolution de la précision sur le recalage (en μm) en fonction de l'itération (données synthétiques ou réelles).

Figure 4. – Exemple d'histogrammes des distances entre paires de points appariés et évolution de la précision sur le recalage en fonction de l'itération.

l'itération a un comportement asymptotique au-delà d'un certain nombre d'itérations. Nous avons donc estimé judicieux de définir des critères d'arrêt secondaires qui permettent d'arrêter le processus itératif (nombre de primitives appariées (points de mesure 3D), taille de la zone commune, différence relative entre deux estimations de la transformation \mathcal{F} pour deux itérations successives (dans notre cas, de l'ordre de 10^{-5})).

3.3. généralisation à une séquence spatiale d'images 3D

Bien souvent, deux images sont insuffisantes pour balayer la zone d'intérêt à analyser ou la pièce dans sa totalité. De nombreux travaux ont été effectués pour recalcr une séquence de N acquisitions [4, 6, 32, 10, 12, 34, 35], essentiellement dans le but de construire un modèle de l'objet imagé. Une approche consiste alors à recalcr séquentiellement les images par paires, de proche en proche ([9]). Cette façon de procéder présente un risque, dans la mesure où les erreurs ont tendance à s'accumuler et à se propager. Une alternative est d'utiliser une stratégie de recalcr plus global qui consiste à recalcr toutes les images simultanément entre elles de manière à minimiser globalement une expression (2) généralisée et, ainsi, éviter une propagation d'erreurs trop importante pour des séquences comportant un grand nombre d'images. Ce type de techniques remporte un vif succès, les erreurs de recalcr semblant être limitées.

Ce recalcr global présente cependant quelques contraintes non négligeables. En effet, cela nécessite que toutes les images aient une zone commune avec l'image de référence. Ceci n'est que très rarement vérifié dans la pratique, notamment pour une application où il est nécessaire de tourner autour d'une pièce à analyser. D'autre part, ce type de stratégie suppose que les acquisitions soient effectuées au préalable et que le traitement se fasse *a posteriori*. Cette façon de procéder n'est pas adaptée lorsqu'on désire intégrer cette procédure de recalcr à un système, plus général, de reconstruction et d'inspection dont une des contraintes est d'opérer en ligne. C'est pourquoi nous avons fait le choix d'appliquer une stratégie séquentielle qui présente l'avantage de combiner la phase d'acquisition d'images avec le processus de recalcr. En d'autres termes, on continue à acquérir des images, pour compléter la séquence d'acquisitions, pendant que les précédentes sont traitées.

L'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux stratégies pourrait, par exemple, être gérée par un système de planification en fonction du type d'analyse souhaité. Il pourrait également prendre en compte la stratégie de mesure à appliquer pour obtenir dans de bonnes conditions les points 3D dans chaque image et, ainsi, optimiser le nombre d'images à acquérir. L'intégration d'un tel système de planification est prévue dans notre système de mesure. Pour toutes les expériences que nous avons menées, nous avons utilisé une stratégie de recalcr classique qui consiste à

recalcr les images par paire et de proche en proche. Elle donne de bons résultats (précision de 15 à 50 μm). Ainsi, au bout de $(N - 1)$ opérations de recalcr, toutes les images de la séquence sont exprimées dans un même référentiel, c'est-à-dire, dans notre cas, le référentiel de la dernière image acquise. Contrairement aux travaux effectués par exemple par Soucy [35] qui élimine toutes les informations redondantes dans le but de construire un modèle à partir d'une séquence de N images de l'objet, notre approche consiste à conserver le maximum d'informations sur la surface de manière à pouvoir effectuer, le cas échéant, une analyse quantitative plus fine sur l'objet.

En supposant qu'une grande précision soit désirée, une première approche procède de façon incrémentale pour la reconstruction et l'analyse quantitative. Pour ce faire, la taille de la zone commune est ajustée de façon à permettre d'obtenir la précision voulue. Habituellement, ceci implique des régions communes relativement larges permettant seulement de compléter partiellement la description fournie par une image unique. Cependant, en prenant en compte la période de stabilisation du dispositif d'acquisition (après avoir déplacé la tête de mesure), le processus peut être exécuté automatiquement dans sa totalité, de façon continue, jusqu'à ce que tout l'objet soit balayé (d'où l'appellation de « reconstruction incrémentale ») et ceci, sans avoir à stocker la séquence d'images acquise. Dans les cas où la précision désirée sur le recalcr est plus faible, les variations de point de vue peuvent être plus importantes, ce qui conduit à des zones communes plus petites et à des séquences contenant peu d'images. Dans cette dernière situation, la séquence d'images peut être sauvegardée et traitée en différé dès que toutes les images sont acquises. Un recalcr global pourrait alors être appliqué.

4. résultats expérimentaux

Deux versions de notre méthode de recalcr ont été implantées. Elles diffèrent essentiellement par la manière dont la surface interpolant les ensembles de points sont représentés et elles ont été intensivement testées par application à divers objets de référence (modèles CAO et objets réels). Pour les deux types de données, des conditions d'acquisitions identiques ont été utilisées pour des objets de même nature, dans notre cas des objets quasi-polyédriques comportant partiellement des surfaces libres. Dans le cas des séquences synthétiques, le dispositif d'acquisition, décrit dans la section 2.1. et utilisé pour les séquences réelles, a été entièrement modélisé. Dans ce but, le logiciel de CAO CATIA de Dassault Systèmes a été utilisé pour cette simulation et plus particulièrement les bibliothèques CATGEO et CATMSP. Ainsi, des séquences représentatives de données réelles ont pu être construites. De manière à rendre ces données encore plus réalistes, un niveau variable de bruit blanc, d'écart-

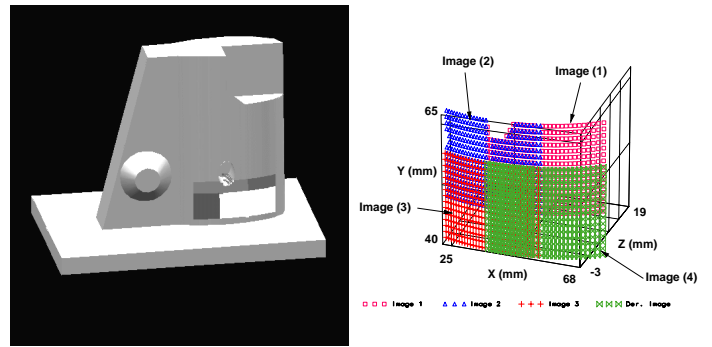
type σ , a été additionné. Par ailleurs, une chaîne complète de traitement de séquences d'images a été intégrée dans l'environnement logiciel de développement KHOROS et toutes les expériences décrites dans cette section ont été effectuées sur une station de travail SUN 4/470.

4.1. recalage de séquences d'images synthétiques

Nous avons étudié le comportement de notre algorithme, et en particulier celui des deux techniques de mise en correspondance développées, en l'appliquant à l'objet modèle de la figure 5(a). Nous montrons dans la figure 5(b) et les deux tableaux (1) et (2) des résultats représentatifs obtenus en utilisant une séquence composée de quatre images. Le déplacement imposé pour l'exemple présenté est une translation.

La figure 5(a) montre clairement la disposition des quatre nuages de points sur le modèle et la figure 5(b) le résultat du recalage de cette séquence. Les deux tableaux (1) et (2) indiquent la précision finale de recalage mesurée *Préc.*, le nombre d'appariements *n* effectivement utilisé ainsi que le nombre de

candidats présents dans la zone commune, le nombre d'itérations *Itér.* nécessaire pour recaler deux images consécutives et le temps de traitement *Tps* de la procédure de recalage. La précision finale *Préc.* est définie et calculée comme étant la distance moyenne entre les paires de points appariés dans la zone com-



(a) Visualisation des quatre nuages de points 3D générés à partir de l'objet modèle. (b) Résultats du recalage de la séquence spatiale de quatre images représentée en (a).

Figure 5. – Séquence de quatre images générées à partir du modèle de la figure 5(a) et résultats expérimentaux obtenus après application de la procédure de recalage.

Tableau 1. – Résultats obtenus pour la séquence de quatre images non bruitées de la figure 5(a) et décrivant une partie de l'objet modèle de la figure 5(b). Ce tableau indique, en particulier, le temps de traitement nécessaire pour recaler deux images consécutives. Comme les données 3D ne sont pas bruitées, le nombre d'itérations de l'algorithme de recalage est égal à 1.

Recalage de deux images	Recalage reposant sur les splines de lissage				Recalage reposant sur NURBS			
	Préc (μm)	n	Itér	Tps (s)	Préc (μm)	n	Itér	Tps (s)
(1) - (2)	0.035 ± 0.001	55/100	1	44	0.325 ± 0.001	63/100	1	13
(2) - (3)	0.165 ± 0.001	70/100	1	39	4.330 ± 0.020	36/100	1	9
(3) - (4)	0.021 ± 0.001	33/100	1	42	0.325 ± 0.200	63/100	1	13

Tableau 2. – Résultats obtenus pour la séquence de quatre images bruitées ($\sigma = 0.05 \text{ mm}$) de la figure 5(a) et décrivant la même partie de l'objet modèle de la figure 5(b). Ce tableau illustre le comportement des deux versions de l'algorithme avec des données synthétiques réalistes qui reflètent convenablement des conditions réelles d'acquisition.

Recalage de deux images	Recalage reposant sur les splines de lissage				Recalage reposant sur NURBS			
	Préc (μm)	n	Itér	Tps (s)	Préc (μm)	n	Itér	Tps (s)
(1) - (2)	45 ± 20	32/100	3	50	50 ± 16	21/100	3	41
(2) - (3)	11 ± 7	22/100	4	44	35 ± 14	10/100	2	21
(3) - (4)	46 ± 25	44/100	2	44	45 ± 27	40/100	3	44

mune. Les résultats du tableau 1 ont été obtenus en utilisant une séquence d'images non bruitées alors que le tableau 2 illustre le comportement de l'algorithme de recalage avec les mêmes données synthétiques altérées par un bruit gaussien d'écart-type $\sigma = 0.05$ mm et de moyenne nulle.

L'étude du tableau 1 montre que la précision finale est meilleure que $5 \mu\text{m}$ pour les deux techniques de mise en correspondance développées. Celle-ci est obtenue après la première itération (une précision de $5 \mu\text{m}$ a été choisie comme critère d'arrêt), ce qui est tout à fait logique puisque les données sont idéales et que l'estimation initiale de la transformation T_0 , entre deux images consécutives est la transformation réellement appliquée pour simuler les quatre nuages de points 3D synthétiques. Ceci permet de valider la méthode algorithmique développée. Ce tableau montre le temps de traitement nécessaire à la partie non itérative de l'algorithme de recalage qui est, dans ce cas, environ 2.5 fois plus important pour la méthode faisant appel aux fonctions splines de lissage que pour celle reposant sur les NURBS. En effet, en utilisant les fonctions splines de lissage, il faut résoudre deux systèmes linéaires afin de déterminer les coefficients de ces fonctions. Ceci conduit à des temps d'exécution directement proportionnels au nombre de points sélectionnés dans la zone commune. Pour la version basée sur les NURBS, les deux systèmes d'équations linéaires à résoudre pour interpoler les nuages de points par une surface peuvent être décomposés en une suite d'interpolations par des courbes plus facile à résoudre (voir section 3). Ceci conduit donc à des temps d'exécution plus courts.

Le tableau 2 illustre, quant à lui, le comportement des deux algorithmes de recalage pour des données synthétiques bruitées. Ce tableau montre que les deux versions convergent approximativement vers la même solution avec une précision finale comparable de l'ordre de 15 à $50 \mu\text{m}$, un temps de traitement équivalent et un nombre comparable d'itérations relativement faible. Cependant, en moyenne, un nombre plus grand d'appariements est déterminé et sélectionné en utilisant les fonctions splines de lissage. En effet, une étude expérimentale de la détermination des vecteurs normaux a montré que ces vecteurs sont beaucoup plus précis lorsque la position des points dont ils sont issus est proche du centre de la zone commune (les points localisés au centre, contrairement à ceux des bords, conduisent à de meilleures estimations, les voisins étant plus nombreux). C'est à notre avis la cause principale de la sélection d'un nombre d'appariements plus important pour l'approche reposant sur les splines de lissage. Dans le cas des NURBS, le calcul des normales conduit à des erreurs pratiquement indépendantes de la position du point utilisé.

Par ailleurs, même si notre dispositif matériel actuel ne permet pas de tourner autour d'un objet, nous avons reconstruit, à partir de la simulation d'une séquence bruitée, la partie basse de l'objet modèle de la figure 5(a). Le résultat du recalage de la séquence de neuf images générées est montré figure 6 et permet d'illustrer en particulier que la fermeture s'effectue correctement. L'erreur globale de recalage est de $50 \mu\text{m}$.

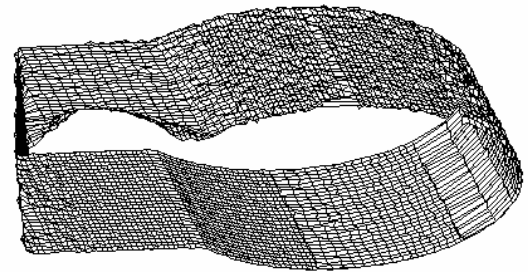
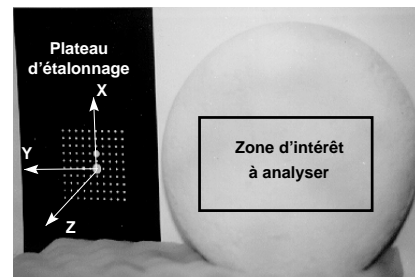


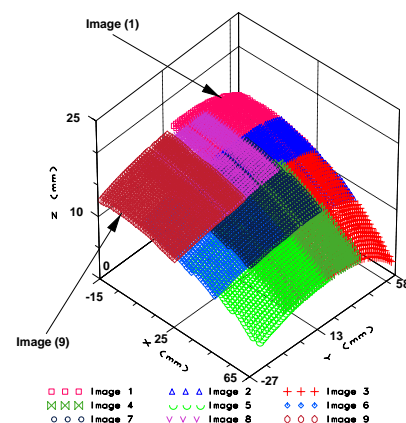
Figure 6. – Recalage d'une séquence de neuf images représentant la partie basse de l'objet modèle.

4.2. recalage de séquences spatiales d'images réelles

Pour valider la méthode de recalage pour des séquences spatiales d'images réelles, nous avons appliqué notre algorithme à une série d'objets réels, incluant des surfaces de forme libre comme ceux des figures 7, 8 et 9. Sur ces figures, ainsi que dans les tableaux 3 et 4, nous présentons des résultats expérimentaux

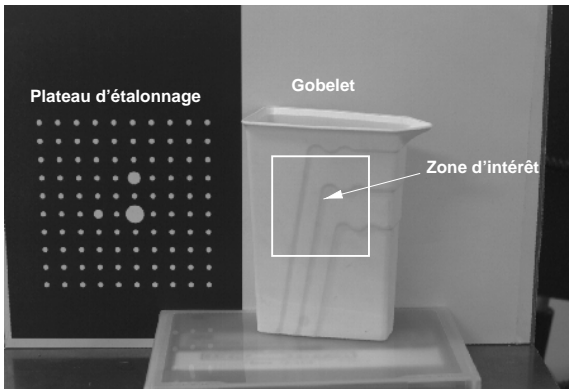


(a) Image du plateau d'étalonnage montrant la disposition des points coplanaires utilisés pour étalonner la caméra CCD et d'un exemple de pièce à analyser (caillou).

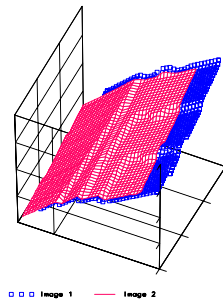


(b) Résultats du recalage de la séquence composée de neuf images soumises uniquement à des translations suivant les axes (Ox) et (Oy) de la table de translation.

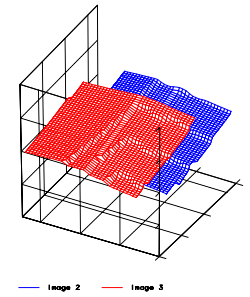
Figure 7. – Résultat du recalage de la séquence spatiale d'images acquises dans la zone d'intérêt du caillou.



(a) Objet réel (gobelet en plastique) et plateau d'étalonnage utilisé.

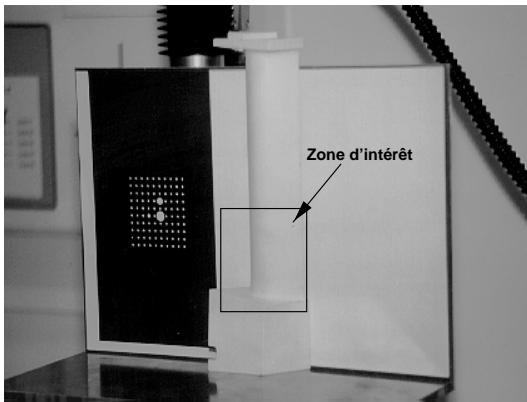


(b) Résultat du recalage de deux images consécutives d'une même séquence de cinq images.

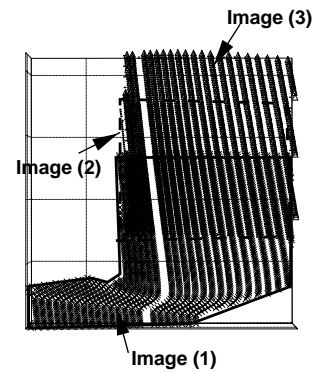


(b) Recalage de deux autres images de la même séquence.

Figure 8. – Recalage de séquences d'images d'un objet réel. Résultats expérimentaux.



(a) Pale de turbine analysée.



(b) Résultat du recalage de trois images d'une même séquence.

Figure 9. – Pale de turbine analysée et résultats du recalage de trois images consécutives de la même séquence.

Tableau 3. – Résultats expérimentaux obtenus pour une séquence réelle de neuf images portant sur le caillou de la figure 7(a). La transformation initiale T_0 est une série de translations.

Séquence de neuf images acquises avec le caillou de la figure 7(a)				
Recalage de deux images	Précision finale (μm)	Nombre d'appariements	Nombre d'itérations	Temps d'exécution (s)
(1) - (2)	15±8	40	3	73
(2) - (3)	16±8	31	6	66
(3) - (4)	26±18	64	3	58
(4) - (5)	35±19	45	3	52
(5) - (6)	40±22	60	4	65
(6) - (7)	36±17	52	4	73
(7) - (8)	14±8	51	3	75
(8) - (9)	20±12	49	3	80

Tableau 4. – Résultats expérimentaux obtenus sur une séquence réelle de cinq images portant sur un gobelet. La transformation initiale estimée T_0 est une série de translations.

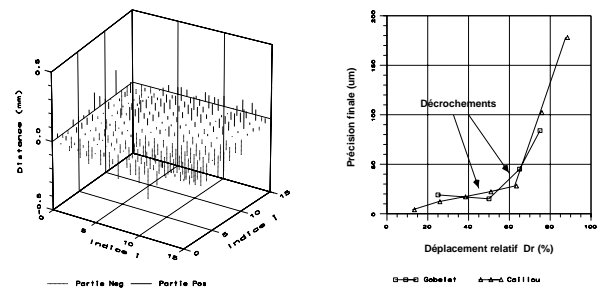
Séquence de cinq images acquises avec le gobelet de la figure 8(a)				
Recalage de deux images	Précision finale (μm)	Nombre d'appariements	Nombre d'itérations	Temps d'exécution (s)
(1) - (2)	28 ± 12	37	3	324
(2) - (3)	39 ± 13	58	4	334
(3) - (4)	15 ± 7	23	2	324
(4) - (5)	40 ± 12	49	7	374

obtenus pour plusieurs objets réels (utilisation des splines de lissage pour le tableau 3 et des NURBS pour le tableau 4).

Les deux tableaux 3 et 4 illustrent en particulier que la précision finale du recalage de deux images consécutives est de l'ordre de 15 à 50 μm pour un nombre d'itérations relativement faible. Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux obtenus avec l'objet CAO modèle et donc valide la méthode de recalage développée. Comme pour les séquences d'images synthétiques, la partie du traitement la plus coûteuse en temps de calcul est effectuée avant d'exécuter la boucle itérative de recalage et concerne principalement l'interpolation des nuages de points par une surface pour obtenir une description de la zone d'intérêt. La figure 10(a) illustre, dans un cas particulier, la répartition des distances pour deux images recalées du gobelet et où la précision du recalage est de 30 μm . Comme nous nous appuyons sur des points 3D reconstruits de manière robuste, la convergence de l'algorithme de recalage est rapide (typiquement, moins d'une dizaine d'itérations sont nécessaires). Comme nous utilisons un grand nombre de points significatifs dans la zone commune entre deux images à recalier et que seules les bonnes mises en correspondance sont retenues pour le calcul de la transformation optimale, la précision du recalage atteinte est comparable à la précision obtenue lors de la phase de reconstruction (typiquement 20 μm) et est indépendante de la précision avec laquelle est fournie l'estimation initiale de la transformation T_0 dans un large intervalle.

Par ailleurs, ces expériences ont montré que, d'une manière générale, la taille de la zone commune doit être suffisamment grande pour ne pas perturber le processus de recalage. Cette observation se traduit sur la courbe de la figure 10(b) par un décrochement à partir duquel la précision finale est altérée. Pour toute les pièces utilisées, ce décrochement apparaît lorsque la taille de la zone commune représente 30 % à 40 % de la taille totale de l'image (*i.e.* un déplacement relatif D_r de l'ordre de 60 à 70 %). La détermination du seuil de décrochement est très importante pour deux raisons :

- le décrochement permet de spécifier automatiquement le déplacement maximal autorisé entre deux acquisitions successives de



(a) Représentation en « aiguille » de la répartition des distances entre paires de points appariés dans la zone de recouvrement entre deux images recalées représentant une partie du gobelet en plastique de la Figure 8(a).

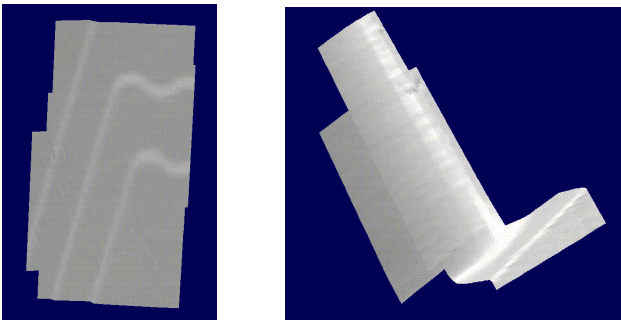
(b) Influence de la taille de la zone commune sur la précision finale du recalage. Résultats des expériences menées avec deux objets de nature et de forme différentes (gobelet, caillou). Illustration du décrochement observé.

Figure 10. – Représentation en « aiguille » de la répartition des distances pour deux images recalées et influence de la taille de la zone commune sur la précision finale du recalage.

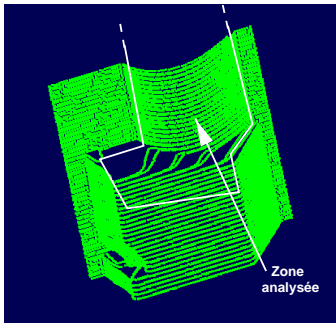
manière à ne pas altérer la précision finale du recalage. Ce paramètre pourrait, par exemple, être géré par un système de planification pour optimiser la façon dont les images sont acquises et permettre ainsi de couvrir de manière optimale la totalité de la zone d'intérêt.

- Il permet d'accroître la vitesse d'exécution de la chaîne de traitement globale en limitant, d'une part, le nombre d'acquisitions nécessaires et, d'autre part, en minimisant l'espace de recherche pour les mises en correspondance, la zone commune étant la plus petite possible.

Pour bien montrer l'efficacité de la méthode de recalage proposée, nous avons visualisé certaines séquences d'images recalées à l'aide du logiciel CATIA. Les figures 11(a) et 11(b) illustrent les résultats obtenus.



(a) Exemple de reconstruction d'une partie de la surface du gobelet de la Figure 8(a) avec le logiciel CAO CATIA, à partir d'un ensemble de quatre nuages de points 3D recalés. (b) Reconstruction d'une partie de la surface de la pale de turbine avec le logiciel CAO CATIA, à partir de trois nuages de points 3D recalés.



(c) Exemple de nuage de points 3D obtenus à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle et représentant une partie de la pale de turbine de la figure 9(a).

Figure 11. – Reconstructions de parties de surface libres avec le logiciel CAO CATIA, à partir de nuages de points recalés.

4.3. évaluation de la méthode de recalage

L'objectif du système d'analyse décrit dans la section 2.1. est la reconstruction et/ou l'analyse quantitative de surfaces. Dans ce deuxième cas, il s'agit de comparer les points 3D recalés et exprimés dans un même référentiel à des données de simulation incluant les tolérances. En général, ces données sont issues du modèle CAO correspondant à la pièce réelle. Une telle opération peut, par exemple, être effectuée interactivement à l'aide d'un logiciel de CAO (CATIA par exemple) de manière à positionner grossièrement le modèle CAO par rapport aux nuages de points recalés. Ensuite, en utilisant la procédure de recalage décrite dans la section 3, le modèle CAO et les nuages de points peuvent être exprimés dans le même référentiel (dans ce cas, il faut bien-sûr discrétiser le modèle CAO de manière à obtenir également un nuage de points de référence). Mais, bien souvent, un tel modèle n'est pas disponible et l'on est amené à le construire à partir des données fournies par une machine à mesurer tridi-

mensionnelle (MMT) utilisant un palpeur mécanique et qui discrétise la surface de l'objet réel à mesurer. Usuellement, une précision inférieure à $5 \mu\text{m}$ est atteinte pour les points 3D générés et, de ce fait, ces informations peuvent être utilisées comme valeurs de référence pour la comparaison. La figure 11(c) montre un nuage de points de référence caractérisant une partie de la pale de turbine de la figure 9(a) et obtenu avec une machine à mesurer tridimensionnelle MITUTOYO (visualisation à l'aide du logiciel CATIA).

Dans cette contribution, la comparaison n'est pas effectuée pour mesurer réellement la pièce mais pour mettre en évidence la justesse de la méthode de recalage proposée (validation). Cette étape supplémentaire, qui doit encore être automatisée, permet de valider aisément la méthode de recalage sur un plus grand échantillon de modèles CAO ou de pièces de référence.

Par ailleurs, la quantification des erreurs et la propagation de celles-ci d'un traitement à un autre restent à évaluer. En général, il est très difficile, voire impossible, de modéliser l'incertitude sur les données. Une approche possible pourrait faire appel à la méthode proposée par Pennec [29] (et généralisée par Stoddart [36] dans le cas des surfaces), dans le cas où aucune « vérité terrain » n'est disponible, pour déterminer l'incertitude sur la transformation $\mathcal{F}(R, t)$. Dans notre application, de proche en proche, il est ainsi possible de quantifier la propagation des erreurs sur une séquence complète d'images. Cette technique, en cours de développement, sera testée sur le prototype du nouveau système de mesure en cours de réalisation.

5. conclusion et perspectives

Dans cette contribution, nous avons présenté une approche pour le recalage de nuages de points 3D extraits d'une séquence spatiale d'images acquises par un système de vision utilisant une lumière structurée. Deux alternatives ont été conçues pour approximer les surfaces représentées par les nuages de points. La première version fait appel à une représentation basée sur les splines de lissage alors que la seconde repose sur l'utilisation des fonctions NURBS et de la technique du Bézier-Clipping. La sortie de la boucle de recalage est le déplacement optimal entre deux nuages de points. L'estimation initiale du déplacement est fournie par le système de mesure portant la tête d'acquisition. Ceci est, pour un large spectre d'applications (industrielles), une hypothèse raisonnable, un système de balayage étant souvent disponible pour des tâches autre que l'acquisition d'images. L'application de l'algorithme à des objets synthétiques (CAO) et à des pièces manufacturées réelles démontre l'efficacité de l'approche. La précision sur le recalage est de l'ordre de 15 à $50 \mu\text{m}$. L'algorithme proposé dispose de quelques propriétés intéressantes, parmi lesquelles on peut citer :

- *Simplicité d'utilisation.* La procédure a été entièrement automatisée. En particulier, la zone commune entre deux images-consécutives est déterminée automatiquement. De même, des paramètres de contrôle essentiels de la boucle itérative de recalage sont calculés dynamiquement en utilisant les données image disponibles et arrêtent le processus lorsque soit la précision finale souhaitée est atteinte, soit d'autres critères sont remplis. En utilisant ces mêmes paramètres, l'algorithme élimine facilement d'éventuels points aberrants et utilise ainsi de manière optimale une information plus significative pour l'interpolation et la mise en correspondance. Par ailleurs, des points de contrôles physiques (points d'ancrage ou amers) ne sont pas nécessaires.

- *Robustesse vis-à-vis du bruit, des erreurs de mesure et des appariements aberrants* (ceci est une conséquence directe de la remarque ci-dessus).

- *Précision finale observée.* Toute l'information significative disponible étant prise en compte, la précision est optimisée. De fait, la précision de recalage est du même ordre de grandeur que celle observée lorsqu'on reconstruit les points.

- *Temps de traitement limité.* Ceci est dû, en particulier, à la détermination automatique, en dehors de la boucle itérative, de la zone commune entre les deux images à mettre en correspondance.

- *Possibilité de balayer les surfaces* à évaluer dans leur intégralité afin de fournir, dans un système de référence unique, une description 3D de l'objet à reconstruire et/ou à inspecter. Les deux stratégies décrites dans la section 3.3 sont actuellement testées en fonction de la précision à atteindre.

Des extensions de la version courante de l'algorithme sont à l'étude pour inclure un mécanisme de propagation d'erreur, pour augmenter la précision de la mise en correspondance (*i.e.* du calcul de l'intersection entre une droite et une surface décrite par des NURBS) et pour résoudre le problème du référencement (voir section 4.3.). En outre, des travaux sont également en cours pour, d'une part, valider la procédure de recalage dans le cas de l'analyse de pièces entières et, d'autre part, pour appliquer ces méthodes à des objets non rigides tels que le corps humain. Des résultats encourageants ont déjà été obtenus pour la reconstruction de larges parties d'objets complexes naturels/manufacturés et du corps humain (partie de la tête, du tronc et du bras).

BIBLIOGRAPHIE

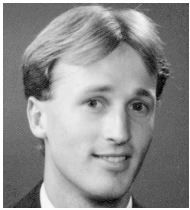
- [1] K.S. Arun, T.S. Huang, and S.D. Blostein. Least Squares Fitting of Two 3D Points Sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(5) : 698-700, 1987.
- [2] E. Bayro-Corrochano. A Review of Automated Visual Inspection, Part I : Conventional Approaches. In *Proceeding of the Spie : Intelligent Robots and Computer Vision XII*, 2055, pages 128-158, 1993.
- [3] E. Bayro-Corrochano. A Review of Automated Visual Inspection, Part II : Conventional Approaches. In *Proceeding of the Spie : Intelligent Robots and Computer Vision XII*, 2055, pages 159-172, 1993.
- [4] R. Benjema and F. Schmitt. Recalage global de plusieurs surfaces par une approche algébrique. *11ème Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. RFIA 98, 20-22 janvier 1998, Clermont-Ferrand, France*, 2 : 387-396, 1998.
- [5] P.J. Besl and N.D. MacKay. A Method for Registration of 3D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2) : 239-256, 1992.
- [6] G. Blais and M.D. Levine. Registering multireview Range Data to Create 3D Computer Objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(8) : 820-824, 1995.
- [7] L.G. Brown. A Survey of Image Registration Techniques. *ACM Computing Surveys*, 24(4) : 325-376, 1992.
- [8] S. Campagna. Vergleich und Erweiterung von Verfahren für die Schnittpunktberechnung von Strahlen mit Polynomflächen. Diplomarbeit im Fach Informatik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1995.
- [9] Y. Chen and G. Medioni. Object Modelling by Registration of Multiple Range Images. *International Journal of Image and Vision Computing*, 10(3) : 145-155, 1992.
- [10] D.H. Chung, I.D. Yun, and S.U. Lee. Registration of Multiple Range Views using the Reverse-Calibration Technique. *Pattern Recognition*, 31(4) : 457-464, 1998.
- [11] B. Curless and M. Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proceedings of SIGGRAPH'96, Aug. 4-9 1996, New-Orleans (USA)*, 303-312, 1996.
- [12] C. Doral, G. Wang, and A.K. Jain. Registration and Integration of Multiple Object Views for 3D Model Construction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(1) : 83-89, 1998.
- [13] G. Farin. *Curves and Surfaces for CAD : A Practical Guide*. Academic Press, INC, San Diego, 4th edition, 1996.
- [14] J. Flusser and T. Sak. A Moment-based Approach to Registration of Images with Affine Geometric Distorsions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(2) : 382-387, 1994.
- [15] R. Franke and G.M. Nielson. Scattered Data Interpolation and Applications : A Tutorial and Survey. In *H. Hagen and D. Roller, Editors. Geometric Modelling, Methods and Applications, Springer Verlag*, pages 131-160, 1991.
- [16] A. Goshtasby. Template Machine in Rotated Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(3) : 338-344, 1985.
- [17] P. Graebbling. *Modélisation, Simulation et Traitement d'images en vue d'une inspection dimensionnelle de pièces manufacturées : Comparaison d'images réelles et conceptuelles*. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1992.
- [18] P. Graebbling, C. Boucher, C. Daul, and E. Hirsch. 3D Sculptured Surface Analysis using a Structured Light Approach. *Proceedings of the SPIE : VIDEOMETRICS IV*, 13-26 october 1995, Philadelphia, USA, 2598 : 128-139, 1995.
- [19] G. Greiner. Least Square Fitting for B-Spline Curves. *Tutorial Notes : Splines in Computer Graphics, EUROGRAPHICS'94, Oslo, September 6-9, 1994*.
- [20] R.L. Harder and R.N. Desmarais. Interpolation using Surface Splines. *Journal of Aircraft*, 9(2) : 189-191, 1972.
- [21] B.K.P. Horn. Closed-form Solution of absolute Orientation using Unit Quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(4) : 629-642, 1994.
- [22] B. Kamgar-Parsi, J.L. Jones, and A. Rosenfeld. Registration of Multiple Overlapping Range Images : Scenes without Distinctive Features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(9) : 857-871, 1991.
- [23] G. Medioni and R. Nevatia. Matching Images using Linear Features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6(6) : 675-685, 1984.
- [24] M. Merickel. 3D Reconstruction : The Registration Problem. *Computer Vision. Graphics and Image Processing*, 42(2) : 206-219, 1988.
- [25] T.S. Newman and A.K. Jain. A Survey of Automated Visual Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(2) : 231-262, 1995.
- [26] T.S. Newman and A.K. Jain. A System for 3D CAD-based Inspection using Range Images. *Pattern Recognition*, 28(10) : 1555-1574, 1995.

- [27] G.M. Nielson. Scattering Data Modelling. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 13(1) : 60-70, 1993.
- [28] T. Nishita, T.W. Sederberg, and M. Kakimoto. Ray Tracing Trimmed Rational Surface Patches. *Computer Graphics*, 24(4) : 337-345, 1990.
- [29] X. Pennec and J.P. Thirion. A Framework for Uncertainty and Validation of 3D Registration Methods Based on Points and Frames. *International Journal of Computer Vision*, 25(3) : 203-229, 1997.
- [30] L. Piegl and W. Tiller. *The NURBS Book*. Monographs in Visual Communication, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Second edition, 1997.
- [31] F. Preparata and M. Shamos. *Computational Geometry. An Introduction*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1996.
- [32] D. Poussart, R. Bergevin, D. Laurendeau. Registering Range Views of Multipart Objects. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(1) : 1-16, 1995.
- [33] B. Sabata and J.K. Aggarwal. Estimation of Motion from a Pair of Range Images : A review. *Computer Vision, Graphics and Image Processing : Image Understanding*, 54(3) : 309-324, 1991.
- [34] W.B. Seales and O.D. Faugeras. Building Three-Dimensional Objects Models from Image Sequences. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(3) : 308-324, 1995.
- [35] M. Soucy and D. Laurendeau. A General Surface Approach to the Interdation of a Set of Range Views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(4) : 344-358, 1995.
- [36] A.J. Stoddart, S. Lemke, A. Hilton, and T. Renn. Estimating Pose Uncertainty for Surface Registration. *Image and Vision Computing*, 16 : 111-120, 1998.
- [37] J. Ton and A.K. Jain. Registering Landsat Images by Point Matching. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(5) : 642-651, 1989.
- [38] M.W. Walker, L. Shao, and R.A. Volz. Estimating 3D Location Parameters using Dual Number Quaternions. *Computer Vision, Graphics and Images Processing : Image Understanding*, 54(3) : 358-367, 1991.
- [39] Z. Zhang. Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13(2) : 119-152, 1994.

Manuscrit reçu le 29 juin 1998.

LES AUTEURS

Christophe Schoenenberger



Après des études de physique appliquée, Ch. Schoenenberger a soutenu sa thèse en janvier 1998 sur le sujet du recalage spatiale d'images 3D. Ses centres d'intérêt sont axés autour du développement de systèmes optiques de mesure 3D pour la reconstruction de surfaces. Il travaille actuellement en Allemagne chez BREUCKMANN GmbH à Meersburg dans le domaine du développement et de la programmation de systèmes optiques actifs appliqués à la numérisation (pièces manufacturées et corps humain) et au contrôle-qualité (secteurs automobile et dentaire).

Ernest Hirsch



Ernest Hirsch est professeur à l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg (Université Louis Pasteur) et responsable de l'axe « Analyse, interprétation et diffusion d'images » du Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (LSIIT - UPRESA CNRS 7005). Ses centres d'intérêt en recherche portent essentiellement sur le traitement en temps réel des images, la mise en œuvre de systèmes à base de connaissance pour l'extraction contrôlée d'indices images et la vision par ordinateur appliquée à la reconstruction 3D et à la métrologie.

Pierre Graebling



Pierre Graebling a obtenu un doctorat en Sciences à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg en 1992. Depuis 1993, il est Maître de Conférences à l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg de l'Université Louis Pasteur. Ses travaux de recherche, qu'il effectue au Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection de Strasbourg, concernent la vision par ordinateur et plus particulièrement la métrologie dimensionnelle et la reconstruction 3D.