

INSPECTION DE PIÈCES AÉRONAUTIQUES POUR LA DÉTECTION DE DÉFAUTS DE FORME À PARTIR D'UN SYSTÈME MULTI-CAMÉRAS

INSPECTION OF AERONAUTICS PARTS FOR SHAPE DEFECT DETECTION USING A MULTI-CAMERA SYSTEM

J. Harvent (1,2), F. Bugarin (1), J.-J. Orteu (1), M. Devy (2), P. Barbeau (3), G. Marin (3)

(1) Ecole Mines Albi - CROMeP, Campus Jarlard, 81013 ALBI, France

(2) LAAS, 7 Avenue du Colonel Roche, F-31077 TOULOUSE, France

Université de Toulouse; UPS, INSA, INP, ISAE; LAAS-CNRS, Toulouse, France

(3) AIRBUS France - ESWNT, TOULOUSE, FRANCE

Résumé

L'École des Mines d'Albi et le LAAS-CNRS ont engagé en 2006 une collaboration avec AIRBUS Toulouse pour le développement d'un système de vision artificielle destiné à l'inspection de pièces aéronautiques (panneaux de fuselage ou de voilure, métalliques ou composites) en vue de la détection de défauts de forme (écarts à la forme nominale souhaitée). Le système est constitué de plusieurs caméras (au moins quatre) pour pouvoir inspecter des pièces de grande taille : les caméras sont fixées sur une structure rigide statique et les pièces à inspecter sont positionnées devant cette structure. Le système fonctionne suivant 2 étapes principales : (1) l'acquisition de la forme de la pièce (nuage de points 3D) par corrélation multi-images et (2) l'analyse du nuage de points pour la détection de défauts de forme par comparaison avec le modèle de la pièce souhaitée. Nous présenterons l'état d'avancement du projet et en particulier les travaux qui ont porté sur le calibrage du système multi-caméras (détermination automatique des paramètres intrinsèques de chacune des caméras et de la position/orientation relative des caméras, à partir d'images acquises sur une mire déplacée dans le champ de vue des caméras) et sur la reconstruction 3D par corrélation multi-images.

Abstract

The Ecole des Mines d'Albi and the LAAS-CNRS initiated in 2006 a collaboration with AIRBUS Toulouse for the development of a computer-vision-based system for the inspection of aeronautics parts (fuselage parts, metallic or composite aeronautical panels, etc.) in order to detect shape defects (shape deviation with regard to the desired overall shape). The system is composed of several cameras (at least four) giving the capacity to inspect large parts. The cameras are fixed on a rigid structure and the parts to be inspected are positioned in front of the system. The inspection system works in two main stages: (1) the shape measurement (giving a cloud of 3D points) using a multiple-image DIC method and (2) the analysis of the cloud of 3D points for the detection of shape defects by comparing the measured shape with the CAD model of the part. We will present the project's state of progress and in particular the multi-camera system calibration (computation of the cameras' intrinsic parameters and the relative position/orientation of the cameras) and the 3D reconstruction using a multiple-image DIC method.

INTRODUCTION

Nous décrivons dans cet article, les méthodes de vision 3D que nous développons dans le cadre d'un projet commun entre le laboratoire CROMeP¹ de l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux (EMAC), le groupe RAP² du LAAS du CNRS et AIRBUS-France.

Ce projet est dédié à l'inspection de grandes pièces aéronautiques de type panneaux de fuselage ou de voilure de 15 à 20m² environ. Le but est de détecter des défauts de forme par rapport au modèle CAO ayant servi à la fabrication de ces pièces. Une précision inférieure au mm sera nécessaire. L'approche choisie est de disposer devant le panneau un ensemble de N caméras fixes (N=4 dans notre banc d'évaluation en laboratoire, destiné à analyser des pièces de taille réduite, environ 3m²; cf. Figure 1), de calibrer leurs paramètres, dans une phase préalable, sur des images de mires, puis de reconstruire un modèle 3D des pièces à inspecter à partir des N images, et enfin d'analyser ce modèle 3D. L'appariement des N images est réalisé par une technique de corrélation. Pour éviter les problèmes liés au manque de texture sur les pièces, plusieurs illuminateurs permettent de projeter un mouchetis (texture aléatoire) sur les pièces.

Cet article décrit uniquement les étapes de calibrage d'un système multi-caméras et de reconstruction d'un modèle 3D à partir de N images. Généralement une méthode de modélisation d'un objet 3D comporte 4 étapes principales: (1) hors-ligne, le calibrage du capteur 3D (télémètre, profilomètre, stéréovision...); (2) l'acquisition des données 3D, par exemple en déplaçant ce capteur autour de l'objet: les données sont généralement des images de points 3D exprimées dans le repère capteur; (3) le recalage de ces données pour qu'elles soient toutes exprimées dans un même repère de référence, typiquement le repère capteur dans sa première position, et enfin (4) la fusion dans une représentation adéquate pour la tâche à réaliser avec ce modèle: un maillage triangulaire, une surface NURBS...

Dans notre configuration, les images sont acquises au même instant par les N caméras; les données 3D sont obtenues par corrélation fine multi-images (N pixels sont appariés); la reconstruction 3D se fait par ajustement des faisceaux associés aux pixels appariés. De ce fait, la phase de recalage n'est pas nécessaire. Dans les sections suivantes, nous décrivons successivement, les méthodes de calibrage, de corrélation fine et de reconstruction 3D, avant d'évoquer rapidement le développement d'un logiciel de synthèse d'images permettant la génération d'images de mouchetis synthétique (pour la vidéo-projection sur la pièce) et la génération d'images synthétiques multi-vues d'une pièce donnée par son modèle CAO. Ce logiciel permettra d'étudier divers problèmes par une approche « simulation » (type de mouchetis nécessaire, configuration des caméras et du vidéo-projecteur...). Enfin, dans une dernière section, nous résumons notre contribution et évoquons les travaux en cours.

¹ Centre de Recherche Outillages, Matériaux et Procédés. Contact: jean-jose.orteu@enstimac.fr

² Groupe Robotique, Action et Perception du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes. Contact: michel.devynck@laas.fr



Figure 1 : pièces aéronautiques utilisées pour les tests préliminaires

CALIBRAGE DU SYSTEME MULTI-CAMERAS

L'étape de calibrage a pour objectif de déterminer la position et l'orientation relative de chacune des caméras (définies par les paramètres dits extrinsèques, composés de rotations et translations) ainsi que les paramètres internes de chacune des caméras (paramètres dits intrinsèques, tels que la focale, la taille des pixels, ou les paramètres permettant de prendre en compte la distorsion géométrique induite par l'objectif) [1]. Ces paramètres sont nécessaires à l'obtention d'un point 3D par triangulation à partir de points appariés dans les différentes images (cf. section « Appariement par corrélation multi-images »).

Modélisation du problème de calibrage d'une caméra

Une caméra se modélise à l'aide de la composée de trois transformations :

1. Une transformation rigide L du repère du monde \mathfrak{R}_w vers celui de la caméra \mathfrak{R}_c
2. Une projection perspective P du repère de la caméra \mathfrak{R}_c vers le plan rétinien
3. Une transformation f non linéaire du plan rétinien dans l'image

La composition de ces trois transformations donne le modèle non linéaire d'une caméra qui permet d'associer tout point 3-D, M , de l'espace du monde \mathfrak{R}_w à un point 2-D, m de l'image:

$$\mathfrak{R}_w \rightarrow I$$

$$m \rightarrow f(k, d, PLM) = f(k, d, L, M) \quad (1)$$

Avec $k=(c_x, c_y, f_x, f_y, s)$ le vecteur de paramètres intrinsèques, et d le vecteur représentant les distorsions de la caméra.

Le problème de calibrage d'une caméra peut alors être vu comme un problème d'estimation, au sens des moindres carrés, des paramètres extrinsèques (paramètres de la transformation (1.)) et intrinsèques ((2.) et (3.)) de la fonction f . D'un point de vue pratique, le calibrage d'une caméra est effectué à partir de plusieurs images d'une mire de calibrage déplacée dans le champ de vue de la caméra, comme l'illustre l'image de la figure 2. Ainsi on réalise n images de mire qui contiennent chacune p points. On dispose donc d'un vecteur mesure $\tilde{m} \in R^{n \times p}$ de points 2-D issus des images et d'un vecteur de mesure $\tilde{M} \in R^{n \times p}$ de points 3-D de l'espace du monde \mathfrak{R}_w . Chaque coordonnée \tilde{m}_i^j de \tilde{m} est fournie via l'extraction du $i^{\text{ème}}$ point 2-D de la $j^{\text{ème}}$ image de la mire. Ensuite, via l'introduction d'une

famille de matrices de localisation, $(L^j)_{j=1..n} \in M_{3 \times 3}(R)$ qui représentent la position du repère de la $j^{\text{ème}}$ mire dans le repère de la caméra \mathfrak{R}_c , on peut ramener le nombre de mesures de points 3-D nécessaire de $R^{n \times p}$ à R^p . Le problème d'estimation devient alors surdéterminé et on peut considérer le vecteur de mesures 3-D, $\tilde{M} \in R^p$ comme une inconnue du système. De manière standard, on cherche alors à résoudre :

$$\min_{k, d, (L^j)_j, \tilde{M}} \left\| \tilde{m} - f(k, d, (L^j)_j, \tilde{M}) \right\|_2^2 \quad (2)$$

où $\| \cdot \|_2$ est la norme 2 de $R^{n \times p}$. Ce qui s'écrit pour la norme 2 dans R^2 :

$$\min_{k, d, (L^j)_j, \tilde{M}} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p \left\| \tilde{m}_i^j - f(k, d, L^j, \tilde{M}_i) \right\|_2^2 \quad (3)$$

Ainsi la solution $k^s, d^s, T^s, L^s, \tilde{M}^s$ permet de calibrer de manière forte une caméra. Nous allons voir dans la sous section suivante comment étendre ce modèle à la problématique du calibrage multi-caméras.

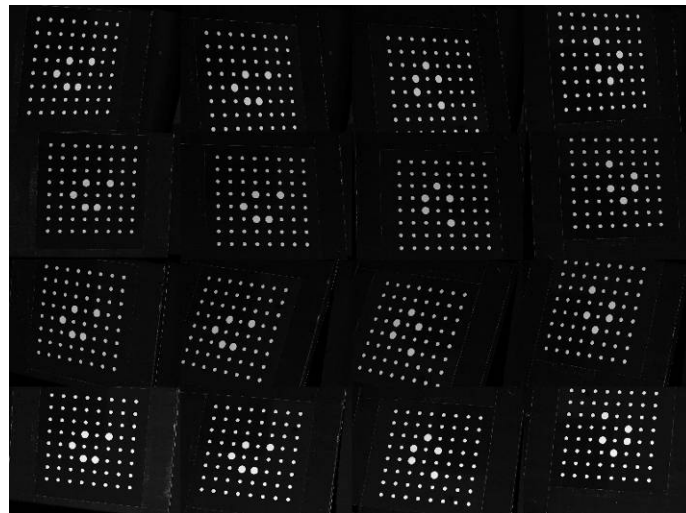


Figure 2 : Mire utilisée pour le calibrage, vue par 4 caméras

Extension au problème de calibrage du système multi-caméras.

Par analogie à la modélisation précédente, nous devons ici déterminer la fonction qui à tout point $M \in \mathfrak{R}_w$ associe le point $\tilde{m} = (\tilde{m}^1, \tilde{m}^2, \dots, \tilde{m}^k) \in R^{k \times n \times p}$ qui représente l'image de M dans chacune des k caméras du système. Afin de définir les paramètres de cette transformation, nous supposons que l'une des caméras (choisie de façon arbitraire) est la caméra « maître ». Cette caméra est dite « maître » car les transformations rigides que nous chercherons à déterminer sont les transformations entre le repère de la caméra maître \mathfrak{R}_{c_0} et le repère des autres caméras. Avec les paramètres intrinsèques de chacune des k caméras, notés $({}^l k, {}^l d)$ pour $l=1..k$, les paramètres de ces transformations forment les paramètres intrinsèques du banc multi-caméras que nous noterons :

$$(k, d, T) = (({}^l k)_{l=1..k}, ({}^l d)_{l=1..k}, (T^r)_{r=1..k-1}) \quad (4)$$

Par conséquent, en appliquant un raisonnement similaire que pour le calibrage d'une caméra, on peut écrire la modélisation suivante :

$$\mathfrak{R}_w \rightarrow I_1 \times I_2 \times \dots \times I_k$$

$$m \rightarrow f(k, d, T, L, M) = \begin{pmatrix} f_1({}^1 k, {}^1 d, L, M) \\ f_2({}^2 k, {}^2 d, T^{02}, L, M) \\ \vdots \\ f_k({}^k k, {}^k d, T^{0k}, L, M) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Où $f_l({}^l k, {}^l d, T^{0l}, M)$ est la fonction qui projette le point M dans l'image l depuis le repère de la caméra « maître » \mathfrak{R}_{c_0} , et $L = (L_j)_{j=1..n} \in M_{3 \times 3}(R)$ la famille de matrice de localisation permettant de passer du repère des mires au repère de la caméra « maître » \mathfrak{R}_{c_0} . Par suite le problème d'estimation pour le banc multi-caméras s'écrit dans $R^{k \times n \times p}$:

$$\min_{k, d, T, (L^j)_j, \tilde{M}} \left\| \tilde{m} - f(k, d, T, (L^j)_j, \tilde{M}) \right\|_2^2 \quad (6)$$

qui se reformule dans R^2 :

$$\min_{k, d, T, (L^j)_j, \tilde{M}} \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p \left\| \tilde{m}_j - f_l({}^l k, {}^l d, T^{0l}, L^j, \tilde{M}_i) \right\|_2^2 \quad (7)$$

On résout ce problème par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Sur le cas présenté dans cet article, qui vise à reconstruire une pièce aéronautique d'une dimension approximative de 1m par 60cm, nous obtenons une erreur moyenne de reprojection (i.e. la somme des erreurs de reprojection divisée par le nombre de points) de 0.063 avec 8 positions de mires.

En outre afin d'évaluer au mieux notre calibrage, nous introduisons la notion de distance à la droite épipolaire. Cette distance est définie comme suit : pour un point d'une mire m_0 , nous calculons la distance des ses correspondants m_1, m_2, m_3 dans les autres images aux droites épipolaires issues de m_0 et calculées via les résultats de notre calibrage. Ceci effectué pour tous les points d'une mire et moyenné par le nombre total de points nous donne la distance épipolaire moyenne d'une mire. Dans notre cas, pour quatre séries d'images de mire n'ayant pas servies au calibrage, cette distance est de 0.057.

APPARIEMENT PAR CORRELATION MULTI-IMAGES

L'appariement consiste à trouver les pixels correspondants dans chaque image. Pour accomplir cette tâche, nous utilisons la corrélation fine par propagation de germe.

Corrélation fine

La corrélation fine [2] a pour objectif d'obtenir à partir de la position d'un pixel dans une image et de son intensité, la position précise des pixels correspondants dans les autres images. Pour mettre en correspondance les pixels ou plutôt les zones (fenêtres de corrélation N) centrées autour de ces pixels, nous utilisons les fonctions de vraisemblances classiques basées sur SSD . Etant donné la nature même des images qui sont des projections de l'espace sur un plan, les fenêtres de corrélation subissent, elles aussi, une distorsion projective. Il est donc nécessaire de déformer ces fenêtres afin d'apparier au mieux les pixels dans chaque image (appariement subpixel). La déformation de fenêtre est exprimée par un développement de Taylor à l'ordre n (1 ou 2 dans notre cas) autour du centre de la fenêtre, et implique l'optimisation (par le biais de l'algorithme de Levenberg-Marquardt) d'un jeu de paramètres p .

$$SSD(x, y, p) = \sum_{x,y \in N(x_0, y_0)} (I_1(x, y) - I_2(\theta(x, y, p)))^2 \quad (8)$$

avec

$$\theta(x, y, p) = \begin{pmatrix} x + d_x + \frac{\partial d_x}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial d_x}{\partial y}(y - y_0) \\ y + d_y + \frac{\partial d_y}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial d_y}{\partial y}(y - y_0) \end{pmatrix} \quad (9)$$

et

$$p = \left[d_x \quad d_y \quad \frac{\partial d_x}{\partial x} \quad \frac{\partial d_x}{\partial y} \quad \frac{\partial d_y}{\partial x} \quad \frac{\partial d_y}{\partial y} \right] \quad (10)$$

Les pièces numérisées sont relativement réfléchissantes, et engendrent parfois des reflets spéculaires sur les images. Afin d'être plus robuste aux changements d'illumination lors de la phase d'appariement, deux paramètres photométriques a et b peuvent être ajoutés à la fonction de corrélation.

$$SSD(x, y, p) = \sum_{x,y \in N(x_0, y_0)} (a * I_1(x, y) + b - I_2(\theta(x, y, p)))^2 \quad (11)$$

Pour minimiser ces fonctions, il est nécessaire de donner à l'algorithme d'optimisation une estimée initiale de leurs paramètres. Celle-ci est apportée par la propagation de germe.

Propagation de germe

Cette étape doit apporter une estimée initiale correcte afin que l'optimisation puisse converger vers un bon appariement. Elle se décompose ainsi :

Un pixel est choisi dans une image, et la position de ses correspondants est déterminée par corrélation classique dans les autres images.

La forme de la fenêtre de ses correspondants est alors calculée par minimisation de la fonction de corrélation, on étiquette alors le pixel comme « pouvant propager ».

Un pixel voisin, généralement distant d'un « pas » de dimension inférieure à la taille des fenêtres est choisi. L'estimée initiale de sa position dans les autres images peut être déduite à l'aide des paramètres trouvés précédemment en utilisant l'équation (9). La forme de la fenêtre de ses correspondants est alors calculée, et le pixel est alors étiqueté comme

« pouvant propager » (l'appariement est considéré comme bon) ou « ne pouvant pas propager » (l'appariement est mauvais).

On choisit à nouveau un pixel voisin d'un pixel « pouvant propager », que l'on apparie. La propagation s'arrête lorsque toute l'image est corrélée ou bien lorsque tous les pixels portent l'étiquette « ne pouvant pas propager ».

Un pixel peut parfois ne pas être apparié correctement (présence d'occultations, de problèmes d'illumination...). Il est donc impératif de détecter ce mauvais appariement pour ne pas le propager. Pour cela, on introduit diverses contraintes :

La distance à la droite épipolaire issue de la géométrie projective [3] qui implique que pour le pixel d'une image donnée, son correspondant se trouve sur une droite dans les autres images.

Le calcul inverse, à partir des paramètres trouvés, de la position du pixel qui avait permis d'obtenir une estimée initiale. Si l'on suppose que la surface est relativement lisse, sa position doit être assez proche de celle que l'on avait trouvée précédemment.

RECONSTRUCTION 3D PAR AJUSTEMENT DE FAISCEAUX

Le but de cette étape est d'obtenir, à partir de n images issues de k caméras du banc de numérisation un unique nuage de point 3D [4]. Cette phase de numérisation peut être vue comme un cas particulier de l'étape de calibrage. En effet, si on considère la modélisation de l'étape de calibrage, la phase de numérisation se ramène à l'estimation des seuls points 3D en fixant l'ensemble des autres paramètres (intrinsèques et extrinsèques), comme l'indique la formule suivante :

$$\min_{\tilde{M}} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^p \left\| {}^i \tilde{m}_{i,j} - f_i \left({}^i k_i, {}^i d_i, T^{0i}, L^j, \tilde{M}_i \right) \right\|_2^2 \quad (12)$$

La seule contrainte que nous apportons est l'introduction d'une caméra dite « maître » afin d'éliminer les redondances. En effet, nous imposons que la corrélation fournisse des appariements par rapport à la caméra « maître », ainsi nous pouvons déterminer les correspondants des points vus dans la caméra « maître » dans les autres caméras et par conséquent « trier » les points.

La première expérience ci-après a été effectuée sur une pièce emboutie (cf. Figure 3). La pièce a été peinte de manière à disposer d'une texture adaptée à la corrélation. Le but de cette expérience est de mettre en avant la robustesse de notre moteur de corrélation face aux différences de luminosité et de tester la capacité de notre moteur de reconstruction à gérer les occultations.

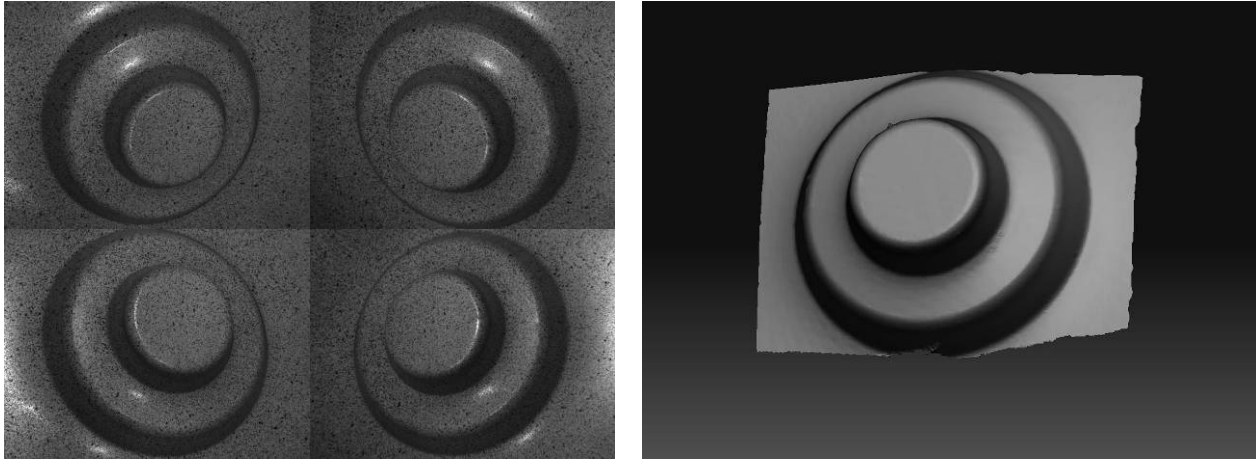


Figure 3 : Embouti vu par 4 caméras et reconstruction 3D

La deuxième expérience a consisté à reconstruire une des pièces aéronautiques, sujet de notre étude (cf. Figure 4). Dans ce cas, le mouchetis est projeté à l'aide d'un vidéo projecteur.

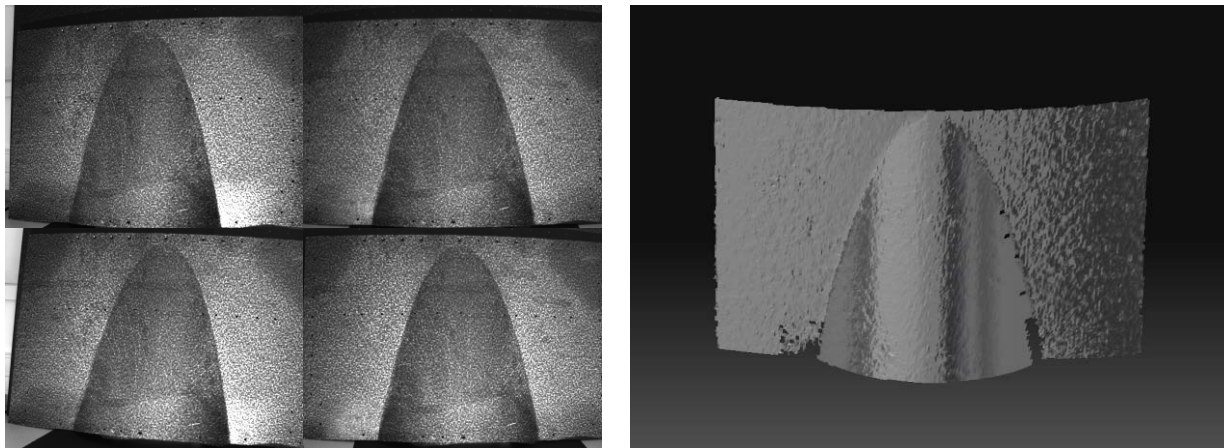


Figure 4 : Pièce aéronautique vue par 4 caméras et reconstruction 3D

ANALYSE DES DEFAUTS DE FORME

Après reconstruction 3D de la forme complète de la pièce (nuage de points 3D), l'étape suivante consistera à analyser la présence éventuelle de défauts de forme par rapport à la forme nominale.

De nombreux logiciels permettant la comparaison « nuage de points 3D/nuage de points 3D » ou « nuage de points 3D/modèle CAO » existent déjà (Geomagic Qualify [5], Rapidform XOR/XOV [6]...). Nous sommes en train de les évaluer.

SIMULATEUR MULTI-IMAGES

Afin de valider de façon théorique la précision des algorithmes mis en oeuvre, nous avons développé un simulateur d'images (logiciel de génération d'images synthétiques). Celui-ci permet le rendu de scènes composées d'objets simples (sphères) ou d'objets issus d'un

modèle CAO. Pour simuler le mouchetis [7], les objets sont texturés à l'aide de la fonction bruit de Perlin 3D [8,9]. La scène est quant à elle rendue par lancer de rayon.

Les images ainsi formées permettent d'obtenir une vérité terrain pour la reconstruction 3D ainsi que pour la corrélation d'image. Elles permettront aussi de mener des recherches sur la disposition optimale des caméras et du vidéo projecteur vis à vis de l'objet à numériser. La simulation du mouchetis sur les pièces CAO apportera une aide au choix de sa taille de grain.

CONCLUSION – PERSPECTIVES

Nous avons développé un système multi-caméras pour pouvoir inspecter des pièces de grande taille avec une résolution suffisante. La finalité de ces travaux est de numériser la forme d'une pièce et de la comparer à la forme nominale souhaitée (modèle CAO) pour détecter des défauts, tels que des écarts de forme (voire des impacts).

Au stade actuel des développements, le calibrage du système multi-caméras par une méthode d'ajustement de faisceaux a été validé. Les premiers algorithmes d'appariement par corrélation multi-images ont été développés et testés. Ils ont permis d'obtenir des formes de pièces qualitativement acceptables. La qualité métrologique de ces formes est en cours d'évaluation.

Pour l'instant, la connaissance du modèle CAO de la pièce inspectée n'a pas été utilisée dans la phase d'appariement des images. Pourtant, c'est une information importante qui devrait permettre de rendre encore plus robuste l'appariement des images (élimination des faux appariements) et le traitement des problèmes d'occultations. Nous travaillons actuellement suivant cette piste : comment adapter le mouchetis et/ou l'algorithme de corrélation si l'on dispose de connaissances a priori sur le modèle qu'on veut construire ?

Pour pouvoir inspecter des pièces de grande taille, il a été décidé de développer un système multi-caméras statique permettant de couvrir l'ensemble de la pièce. Une autre approche aurait pu être développée : utiliser une seule caméra (ou une paire de caméras) portée par un dispositif robotique pour inspecter la pièce en déplaçant le capteur autour de la pièce. Cette approche est en cours de discussion et devrait faire l'objet de développements futurs, en parallèle et en complément des développements en cours.

REFERENCES

- [1] Tsai, R.Y. , A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, IEEE J. Robotics Automation, Vol. 3, 1987, pp. 323-344.
- [2] Bruck, H.A. , McNeill, S.R. , Sutton, M.A. , Peters III W.H. , Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction, Experimental Mechanics, Vol. 29, 1989, pp. 261-267.
- [3] Hartley, R.I. , Zisserman, A. , Multiple View Geometry, Cambridge University Press, 2004.
- [4] Triggs, B. , McLauchlan, P.H. , Hartley, R.I. , Fitzgibbon, A. , Bundle Adjustment: A Modern Synthesis, Vision Algorithms: Theory and Practices, Vol. 1883, 2000, pp. 298-372.
- [5] Geomagic Qualify, <http://www.geomagic.com>.
- [6] Rapidform XOR/XOV, <http://www.rapidform.com>.
- [7] Orteu, J.J. , Garcia, D. , Robert, L. , Bugarin, F., A Speckle-Texture Image Generator, Proceedings of Speckle06 "From Grains To Flowers", 2006.
- [8] Perlin, K. , An Image Synthesizer, SIGGRAPH, 1985, pp. 287-296.
- [9] Perlin, K. , Improving Noise, Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2003, pp. 681-682.