

Institut Farman FR 3311 : appel à projets AAP 2016

Proposition de projet Farman – Volet scientifique

<MOSTRA : Vers une approche MOdale pour la mesure de défaut de forme par STéréo
coRrélation >

<LMT - LURPA>

Intitulé du projet (acronyme ou autre) : <MOSTRA>

Titre explicite : Vers une approche modale pour la mesure de défaut de forme par stéréo corrélation

Version : Standard

Responsables scientifiques :

QUINSAT, Yann, 01 47 40 22 13, quinsat@lurpa.ens-cachan.fr

HILD, François, 01 47 40 21 92, hild@lmt.ens-cachan.fr

Durée du projet : 24 mois

Membres pressentis de l'équipe-projet :

- F. Hild - DR CNRS – LMT – 10%
- C. Lartigue – Pr – LURPA - 10%
- J. Neggers – post-doc – LMT – 20%
- Y. Quinsat – Prag Docteur – LURPA - 20%
- F. Thiébaud – Mcf – LURPA - 20%

Résumé du projet :

La mesure de pièce mécanique à l'aide de système sans contact impose souvent des opérations de post traitement longues et difficiles afin de pouvoir identifier correctement les défauts présents sur les pièces. Ce projet à pour objectif de mettre au point un système de mesure permettant de délivrer une description de la géométrie acquise dans une base de défauts prédéfinie. Pour ceci il est envisagé d'associer une modélisation de la géométrie réelle sous la forme d'une base modale avec une mesure par stéréocorrélation. Cette approche permettrait d'étudier un problème de corrélation d'image avec un nombre de degrés de liberté du problème étudié relativement restreint et délivrerait directement l'influence de chacun des modes.

Description scientifique du projet (3 à 8 pages)

Dans le cadre de la mesure de la géométrie des pièces mécaniques, les méthodes optiques sont de plus en plus utilisées car elles permettent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure. La complémentarité des différentes technologies des systèmes de mesure disponibles associée aux différentes contraintes liées au produit (échelle de défauts mesurés, complexité de la géométrie, matériaux mis en jeu, environnement de mesure) permet d'augmenter le degré d'automatisation, la rapidité et la qualité de la numérisation. Néanmoins une des limites majeures à l'utilisation des moyens optiques pour la mesure de géométrie concerne les difficultés liées au post-traitement nécessaire sur les données issues de la numérisation. En effet, les données acquises par moyens optiques sont souvent hétérogènes, bruitées et peuvent comporter des lacunes en fonction de la complexité de la géométrie à numériser. Ainsi, les analyses des mesures réalisées peuvent devenir complexes et l'identification des défauts présents sur la pièce une réelle difficulté.

Des travaux précédents réalisés au LURPA ont permis de mettre en place des outils de sélection des moyens de mesure en fonction de l'échelle du défaut à mesurer [Dubreuil 2014, Charyar 2016]. Bien que cette démarche garantisse l'adéquation entre la qualité des données acquises et l'identification du défaut recherché, le traitement de ces données reste une étape relativement longue. Une autre difficulté concerne la mise en correspondance des mesures avec la surface nominale définie en CAO. Les méthodes les plus courantes s'appuient sur un algorithme de type Iterative Closest Point (ICP) [Besl 92] et sont source d'écarts supplémentaires.

Afin de réduire le temps de post-traitement et améliorer la qualité des données, il est envisagé de mettre au point un système de mesure permettant de délivrer une description de la géométrie acquise dans une base de défauts prédéfinie. Cette technique aurait l'avantage de fournir des mesures directement exploitables pour la qualification de la pièce mesurée.

Dans le cadre de la description de défaut de forme, différentes approches ont été proposées, le plus souvent basées sur une description sous forme de maillage de la pièce à étudier. Huang et Ceglarek [2002] utilisent une décomposition sur la base de cosinus pour exprimer le défaut de forme de la pièce. Cette technique oblige à avoir un maillage structuré de la pièce. Or ceci n'est pas toujours possible. Franciosa *et al.* [2010] proposent d'utiliser des techniques de morphing de maillage issues de la communauté d'infographie pour exprimer ces écarts de forme. Même si cette technique permet de décrire des formes complexes sans aucune hypothèse sur la géométrie nominale des pièces considérées, l'identification d'un ensemble correct d'opérateurs de morphing pour décrire correctement le défaut de forme à évaluer peut s'avérer difficile. Samper et Formosa [2007] proposent d'exprimer le défaut de forme d'une pièce grâce à une décomposition modale basée sur les modes propres de celle-ci. Cette technique est applicable quelle que soit la forme de la pièce et il existe des stratégies bien établies pour identifier un ensemble fini de paramètres décrivant le défaut de forme. Ainsi les modes propres de la pièce sont donnés par la solution de l'équation dynamique linéaire

$$M. \ddot{u} + K. u = 0 \quad (1)$$

avec :

- u le déplacement de chacun des nœuds pour l'ensemble des degrés de liberté du maillage de la pièce,
- K la matrice de rigidité modélisant le comportement élastique de la pièce mesurée,
- M la matrice de masse modélisant la distribution de masse de la pièce.

Les solutions de l'équation (1) sont de la forme $u_i(t) = q_i \cos(\omega_i \cdot t)$ avec ω_i la pulsation propre du mode i et q_i son vecteur amplitude. Une des propriétés de ces vecteurs est de respecter la relation d'orthogonalité suivante :

$$q_i^t M \cdot q_j = \delta_{ij} \quad (2)$$

avec δ_{ij} est le symbole de Kronecker. Les vecteurs q_i associés au produit scalaire $\langle a, b \rangle = a^t \cdot M \cdot b$ forment ainsi une base de l'espace des déplacements. Samper et Formosa [2007] utilisent ce produit pour identifier les coordonnées modales $\{\lambda_i\}$ en projetant le déplacement u de chacun des nœuds :

$$\lambda_i = q_i^t M \cdot u \quad (3)$$

Comme la longueur d'onde du mode diminue avec la fréquence, l'ensemble de la base n'est généralement pas nécessaire pour représenter le défaut de forme.

En parallèle de ces travaux permettant de proposer une base de défauts prédéfinie, d'autres travaux portent sur l'amélioration des systèmes de mesure par vision. En effet, la plupart des systèmes de mesure sans contact nécessitent une procédure d'étalonnage. Pour un système stéréoscopique (stéréovision, photogrammétrie, stéréocorrélation), les paramètres intrinsèques et extrinsèques doivent être déterminés [Faugeras 1987, Sutton 2009]. Une mire est généralement utilisée et plusieurs paires d'images de la mire dans différentes orientations sont nécessaires. Dans le cadre de la stéréocorrélation, une autre possibilité consiste à utiliser la pièce observée comme cible d'étalonnage. Par conséquent, aucun objet d'étalonnage n'est nécessaire [Faugeras 1992]. Cet auto-étalonnage vise à trouver les paramètres intrinsèques et extrinsèques du système de stéréovision directement à partir des images de l'objet lui-même.

Pour effectuer cet étalonnage, la description mathématique de la surface analysée est nécessaire. Cette modélisation de la surface peut être basée sur des facettes obtenues par exemple par une triangulation de Delaunay mais peut également être réalisée par des modèles NURBS [Beaubier 2014]. Dans ce qui suit, une description sous forme d'éléments triangulaires à 3 nœuds (T3) est utilisée. Il est à noter que d'autres types d'éléments (par exemple, des quadrilatères 4 nœuds [Dufour 2014]) peuvent également être considérés. Un avantage de cette description est qu'elle fournit des liens directs et continus avec des simulations par éléments finis [Sutton 2015].

Les matrices de projection ($[M]^l, [M]^r$) sont déterminées en supposant que la surface observée correspond à sa définition nominale (par exemple, le maillage T3 généré par le modelleur CAO). La procédure d'étalonnage [Beaubier 2014] est basée sur une approche par corrélation d'images globale. Le principe de minimisation sous-jacent est basé sur la conservation du niveau de gris des images f^l, f^r prises par les caméras gauche et droite, c'est-à-dire pour deux points x^l et x^r

dans les deux images :

$$f^l(x^l) = f^r(x^r) \quad (4)$$

Pour la zone correspondant à la pièce mesurée sur les images (ROI), une minimisation globale peut ainsi être réalisée pour déterminer les matrices de projection :

$$([M^l], [M^r]) = \underset{[\mu^l], [\mu^r]}{\operatorname{argmin}} \sum_{ROI} (f^l(x^l(u, v, [\mu^l])) - f^r(x^r(u, v, [\mu^r])))^2 \quad (5)$$

Le principe de mesure consiste ensuite à déformer le maillage T3 nominal de façon à le faire correspondre à la pièce réelle. La déformation consiste à déplacer les nœuds du maillage de façon à minimiser les résidus de corrélation. Dans ce cas, les maillages initial et déformé ont exactement la même structure. Par conséquent, les coordonnées des nœuds deviennent les nouvelles inconnues de la procédure de corrélation. Leur position est mise à jour en utilisant le même type de minimisation que précédemment. Ainsi, les coordonnées x^l et x^r dans les caméras droite et gauche sont écrites, en tant que fonction des coordonnées du nœud N_i du maillage pour chaque point d'évaluation de l'espace paramétrique u, v .

$$x^l = (u, v, N_i) ; x^r = (u, v, N_i) \quad (6)$$

La position des nœuds est déterminée par une minimisation globale sur la région d'intérêt (ROI) :

$$(N_i) = \underset{v_i}{\operatorname{argmin}} \sum_{ROI} (f^l(x^l(u, v, v_i)) - f^r(x^r(u, v, v_i)))^2 \quad (7)$$

Ce principe de mesure permet donc d'obtenir une représentation de la géométrie de la pièce réelle directement dans le repère CAO et avec une structure correspondante avec celle de la pièce nominale. Néanmoins le nombre de degrés de liberté élevé de ce problème d'optimisation (3 inconnues par nœud) peut être préjudiciable. Même s'il est possible de contraindre le déplacement des nœuds selon la normale locale afin de limiter la taille du problème, il est souvent nécessaire d'ajouter des techniques de régularisation pour améliorer la convergence.

L'idée originale du projet présenté consiste donc à intégrer la description des défauts de forme à l'aide d'une base prédéfinie dans la procédure de stéréocorrélation précédemment présentée. Une première approche consiste en l'utilisation d'une base modale. Ceci présenterait deux avantages principaux. Premièrement, le nombre de degrés de liberté du problème étudié serait relativement restreint étant donné qu'un nombre limité de modes est nécessaire pour décrire correctement les défauts de forme. Deuxièmement, le résultat de l'optimisation et donc de la mesure délivrerait directement l'influence de chacun des modes. Le travail envisagé s'articule autour de quatre étapes :

1. Écriture du problème de corrélation d'images
2. Implémentation sous matlab
3. Définition d'un cas de test
4. Comparaison avec d'autres techniques de mesure sans contact

Références bibliographique

- [Beaubier 2014] B. Beaubier, J.E. Dufour, F. Hild, S. Roux, S. Lavernhe, K. Lavernhe-Taillard. CAD-based calibration of a 3D-DIC system: Principle and application on test and industrial parts. *Exp. Mech.*, 54(3):329–341, 2014.
- [Besl 1992] P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 14(2):239–256, 1992.
- [Charyar 2016] C. Mehdi-Souzani, Y. Quinsat, C. Lartigue, P. Bourdet. A knowledge database of qualified digitizing systems for the selection of the best system according to the application. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, A paraître 2016.
- [Dubreuil 2014] L. Dubreuil, Y. Quinsat, C. Lartigue Multi-sensor approach for multi-scale machining defect detection Joint Conference On Mechanical Research in Interactive Design, Jun 2014.
- [Dubreuil 2013] L. Dubreuil, Comparaison de protocoles de mesure sans contact pour l'évaluation de défauts d'usinage Mémoire de Master, ENS Cachan, 42 p., juin 2013
- [Dufour 2014] J.E. Dufour, B. Beaubier, S. Roux, and F. Hild. Displacement measurement using cad-based stereo-correlation with meshes. In *ICEM conference*, 2014.
- [Faugeras 1987] O Faugeras and G Toscani. Camera calibration for 3d computer vision. *International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, pages 240–247, 1987.
- [Faugeras 1992] O. Faugeras, Q.T. Luong, and S.J. Maybank. Camera self-calibration: Theory and experiments. In *Proc. 2nd ECCV*, pages 321–334. Springer-Verlag, 1992.
- [Franciosa2010] P. Franciosa, S. Gerbino, S. Patalano, Simulation of variational compliant assemblies with shape errors based on morphing mesh approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-15, 2010
- [Huang2002] W. Huang, D. Ceglarek, Mode-based Decomposition of Part Form Error by Discrete-Cosine-Transform with Implementation to Assembly and Stamping System with Compliant Parts *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1) :21-26, 2002
- [Samper2007] S. Samper, F. Formosa, Form Defects Tolerancing by Natural Modes Analysis, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(1) :44-51, 2007.
- [Sutton2009] M.A. Sutton, J.-J. Orteu, H. Schreier, Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications, Springer Science & Business Media, 2009.
- [Sutton2015] M.A. Sutton and F. Hild. Recent advances and perspectives in digital image correlation. *Exp. Mech.*, 55(1):1–8, 2015.

Originalité du projet

L'utilisation d'une approche modale pour la description de la géométrie réelle permet d'obtenir un résultat de mesure directement lié à une base de défaut et supprime ainsi les opérations de post traitement. La mise au point d'un tel système est une réelle avancée par rapport aux autres systèmes de mesure. De plus les approches globales de stéréocorrélation sont très récentes. A la connaissance des auteurs, la première publication à base de modèles NURBS date de 2014 [Beaubier 2014]. La version basée sur les éléments finis de peau, dont une toute première faisabilité a été montrée par Dufour et al. [2014] sur des quadrilatères, est encore plus récente. Un article commun entre le LMT et le LURPA a été soumis en 2015. Il traite de l'utilisation d'éléments triangulaires qui sert de base à la présentation ci-dessus. Ce projet est donc une proposition de régularisation de la stéréocorrélation d'images globale qui n'a pas d'équivalent connu dans la littérature. Il permettra aux deux équipes impliquées dans le projet de collaborer afin d'analyser ce type de technique en vue de son utilisation pour la détection de défauts de forme.

Valeur ajoutée des différents partenaires à la réalisation du projet (1/2p)

LURPA : Approche modale, qualification de capteur, corrélation d'images

LMT : Stéréocorrélation, approches globales, approches intégrées

Publication du projet scientifique sur site web Farman

Acceptez-vous la publication de ce projet scientifique sur le site web Farman ? O