

Proposition d'un étalonnage pixel à pixel compensé pour caméras infrarouges et comparaison avec des procédures classiques d'étalonnage: cas de l'analyse des contraintes par l'étude du couplage thermoélastique

C. DOUDARD^a, V. LE SAUX^a,

a. Institut de Recherche Dupuy de Lôme (FRE 3744) - 2 rue François Verny, 29200 BREST

Résumé :

Dans cette communication, nous proposons une calibration pixel à pixel compensée qui intègre les effets de la température du boîtier de la caméra. Les résultats de cet étalonnage sont comparés à une calibration classique à deux points, non uniforme, compensée. L'approche proposée conduit à une amélioration significative de la résolution thermique avec une réduction de l'erreur moyenne ainsi que de l'écart-type. Ce gain est illustré sur une mesure de cas réel axée sur la thermoélasticité. Le gain en termes de mesure de précision est mis en évidence en comparant l'étalonnage proposé à l'étalonnage classique.

Abstract:

In this paper, we propose a compensated pixelwise calibration that integrates the effects of the camera housing temperature. The results of this calibration are compared to a classic two points compensated Non Uniformity Correction based calibrations. This proposed approach leads to a significant improvement in the thermal resolution with a reduction in the mean error as well as the standard deviation. This approach is challenged on a real case measurement focusing on thermoelasticity. The gain in terms of accuracy measurement is highlighted by comparing the proposed calibration to classic calibration.

Mots clefs : correction de non uniformité, caméra infrarouge, analyse des contraintes, couplage thermoélastique

1 Introduction

En raison de leur accessibilité, les caméras infrarouges sont devenues de plus en plus répandues dans les communautés industrielles et scientifiques depuis la fin des années 1970. La plus grande partie de ces caméras utilisent une matrice de plan focal infrarouge (infrared focal plane array IRFPA), qui se compose d'une multitude de photodétecteurs placés au niveau du plan focal des systèmes d'imagerie. La technologie IRFPA a énormément progressé au cours des dernières années, ce qui a permis le développement d'une matrice de plan focal (focal plane array FPA) avec un pitch plus petit (meilleure résolution spatiale). Cependant, plusieurs problèmes ont également accompagné ces avancées majeures, dont la plus gênante est la non-uniformité des capteurs [1]. Les causes de ces non uniformités sont nombreuses, citons par exemple la variabilité des détecteurs dans le procédé de fabrication FPA, la température de fonctionnement non homogène dans le FPA et le bruit de lecture électronique...

Différentes méthodes ont été proposées pour résoudre ce problème. Parmi celles-ci, on peut citer les techniques utilisant une Correction de Non-Uniformité (Non Uniformity Correction _ NUC) basée sur l'utilisation de cartes de température uniforme. L'objectif est d'avoir une réponse similaire pour tous les éléments du FPA en effectuant une normalisation de la réponse. Dans cette communication, nous proposons un calibrage pixel à pixel compensé au sens où il intègre les effets de la température du boîtier de la caméra. Les résultats de cet étalonnage sont comparés à une correction de non uniformité deux points classique compensée (i.e., qui intègre les effets de la température du boîtier de la caméra).

Cette comparaison est réalisée sur une mesure de cas réelle centrée sur l'analyse des contraintes par l'étude du couplage thermoélastique. Le gain en termes de précision de mesure est mis en évidence en comparant la calibration proposée à l'étalonnage classique. Il est démontré que cette approche conduit à une amélioration significative de la résolution thermique.

2 IRFPA calibration

La camera IRFPA utilisée est une MWIR SC7600BB de la société FLIR System. Elle est équipée d'un capteur Indium-Antimonide (InSb) refroidi par un moteur stirling. Le capteur est une matrice de 512*640 pixels avec un pitch de 15 µm. La caméra est équipée d'un objectif 50 mm.

2.1 NUC 2 points compensée : CNUC₂

La première calibration est appelée abusivement NUC 2 points et est appliquée en deux étapes. Elle a l'avantage d'être simple à implanter et peut donc être utilisée en temps réel. Cette calibration est basée sur l'hypothèse que tous les détecteurs ont une réponse linéaire et stable au cours du temps. La réponse en Digital Level (DL) de chacun des détecteurs peut donc s'écrire

$$DL = k \cdot \varphi + q, \quad (1)$$

où φ représente le flux incident, k et q les matrices des gains et offsets respectivement. L'origine du bruit non uniforme spatial est due à une non uniformité de ces matrices pour chaque détecteur du capteur. L'idée simple de cette calibration consiste à appliquer une correction linéaire de sorte que tous les éléments donnent la même réponse. Deux températures uniformes (obtenues à l'aide d'un corps noir) sont donc nécessaires pour effectuer cette correction. Le nouveau niveau de DL s'écrit donc

$$\widetilde{DL}^{NUC_2} = \alpha^{NUC_2} \cdot DL + \beta^{NUC_2}, \quad (2)$$

où α^{NUC_2} et β^{NUC_2} sont les matrices des gains et offsets de correction respectivement. Une des limites de cette correction provient de la dépendance à la température du boîtier de la caméra, T_{cam} , des matrices de correction. Une manière simple de tenir compte de cette influence est de proposer une dépendance linéaire de la matrice offset de correction avec la température de la caméra. On a ainsi

$$\widetilde{DL}^{CNUC_2} = \alpha^{CNUC_2} \cdot DL + \beta^{CNUC_2} + \gamma^{CNUC_2} (T_{cam} - T_{cam}^{ref}), \quad (3)$$

avec T_{cam}^{ref} une température de référence de la caméra.

La seconde étape de cette calibration consiste à relier le niveau de DL corrigé à la température, T . Cela devrait être basé sur la loi de Planck. Néanmoins généralement il est d'usage d'utiliser plutôt un polynôme du quatrième ordre

$$T = \sum_{n=0}^4 a_n (\widetilde{DL}^{CNUC_2})^n. \quad (4)$$

Les coefficients a_n sont identifiés à l'aide d'une procédure des moindres carrés utilisant des données expérimentales de référence.

2.2 Calibration pixel à pixel compensée

La principale faiblesse de la calibration précédente réside dans l'hypothèse de linéarité des capteurs. Actuellement la réponse des détecteurs est légèrement non linéaire [2-4], de sorte que la réponse est seulement exacte pour les deux températures utilisées pour la NUC deux points. Un moyen de contourner ce problème réside dans l'utilisation d'une calibration pixel à pixel reliant le niveau de DL à la température directement. Ainsi on réalise les deux étapes de la calibration précédente en une seule. On a alors

$$T = \sum_{n=0}^4 \left[\sum_{m=0}^2 a_{nm} (T_{cam} - T_{cam}^{ref})^m \right] (DL)^n. \quad (5)$$

Par rapport à l'équation (4), les coefficients sont différents pour chaque pixel (il s'agit de matrices) et dépendent de la température du boîtier de la caméra. Les matrices coefficients a_{nm} sont identifiées à l'aide d'une procédure des moindres carrés utilisant des données expérimentales de référence. Par rapport à la première calibration, on compense certaines non linéarités, mais le calcul de la correction est plus complexe. Comme on le verra dans la suite ce surcoût s'avèrera payant quand même.

3 Cas d'étude : analyse des contraintes par l'étude du couplage thermoélastique

Afin de montrer l'intérêt de la calibration proposée par rapport à la calibration plus classique ($CNUC_2$), nous proposons dans la suite de comparer les réponses obtenues à l'aide de ces calibrations lors de l'analyse des contraintes par l'étude du couplage thermoélastique. Le cas d'étude est une plaque trouée qui présente l'avantage d'être une configuration bien maîtrisée et d'être un problème de contrainte plane.

3.1 Cadre théorique du couplage thermoélastique sous chargements cycliques

La théorie de la thermoélasticité sous chargements cycliques d'amplitude constante montre que l'amplitude des variations de température, ΔT , est proportionnelle à celle des contraintes [5]

$$\Delta T = \frac{\alpha}{\rho c} T_0 \Delta I_1 = \delta_m \Delta I_1, \quad (6)$$

où α est le coefficient de dilatation thermique, ρ la densité, c la chaleur spécifique, T_0 la température de référence, δ_m le coefficient thermoélastique, ΔI_1 est l'amplitude du premier invariant des contraintes pour le cycle considéré. Lors de l'étude d'une éprouvette présentant un champ de contrainte non homogène (présence de gradient), l'équation précédente n'est pas totalement vérifiée à cause de la conductivité. Néanmoins si la fréquence de sollicitation est suffisamment élevée (ici 10.02 Hz) et si l'épaisseur de peinture utilisée pour améliorer l'émissivité de l'éprouvette est suffisamment faible (ici 30 μm), l'hypothèse que le problème est adiabatique, peut être considérée [6, 7, 8, 9].

3.2 Matériau, éprouvette et conditions d'essai

La géométrie de la plaque trouée considérée est représentée sur la figure 1. Elle est en acier de construction navale. Le chargement cyclique purement alterné a été appliqué à l'aide d'une machine servo-hydraulique.

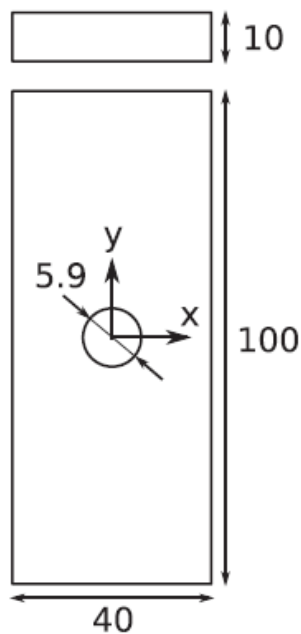


Figure 1 : Géométrie de l'éprouvette (dimension en mm).

3.3 Résultats

Les résultats sont présentés dans les figures 2-3. La figure 2 montre une comparaison entre les profils théoriques et expérimentaux pour la calibration CNUC₂. Les profils théoriques ont été obtenus à l'aide d'une simulation élément-finis. Plus précisément, la figure 2a montre le profil suivant x pour $y = 0$ (cf. Fig. 1 pour la définition de l'origine), la figure 2b montre le profil suivant y pour $x = 0$, alors que la figure 2c, resp. la figure 2d, montre l'erreur pour le profil x , resp. le profil y . La figure 3 montre les mêmes résultats pour la calibration pixel à pixel compensée. Il apparaît clairement que la calibration proposée présente moins de « bruit » que la calibration CNUC₂. L'erreur relative est réduite en moyenne d'un facteur 3.

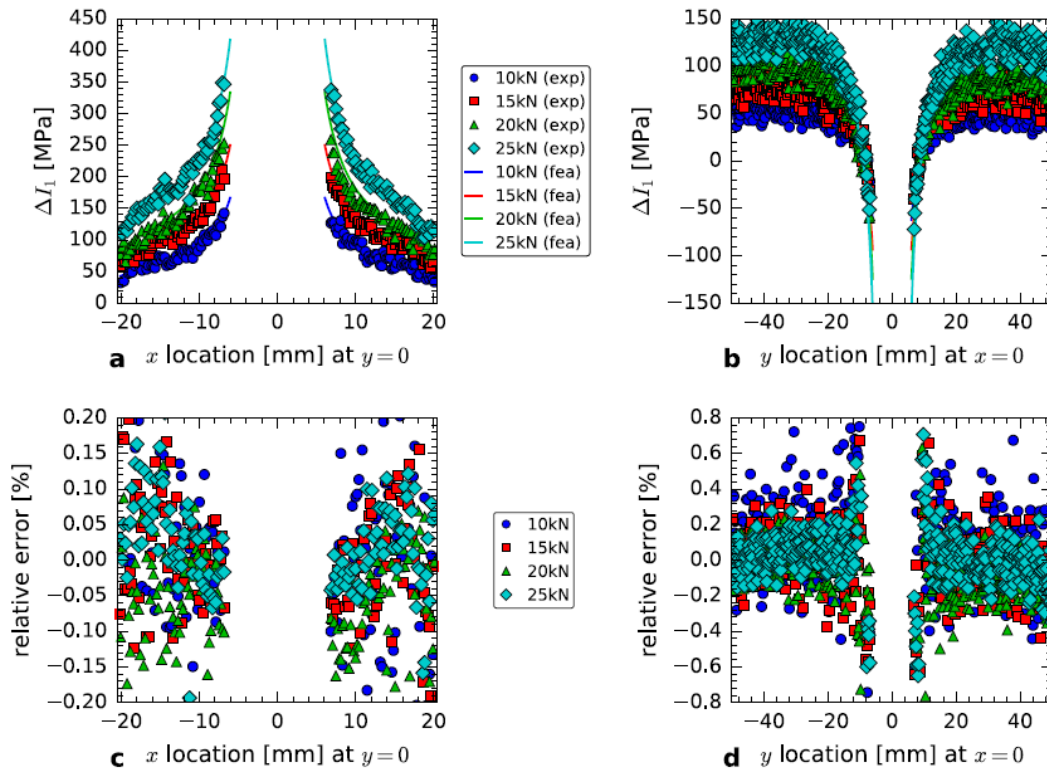


Figure 2 : Comparaison entre les profils numériques (traits continus) et expérimentaux (points) pour la calibration CNUC2. La figure (a) montre les profils obtenus suivant l'axe x (au niveau de l'équateur du trou), la figure (b) les profils obtenus suivant l'axe y et la figure (c), resp. (d), l'erreur relative entre les profils numériques et expérimentaux associés à la figure (a), resp. (b).

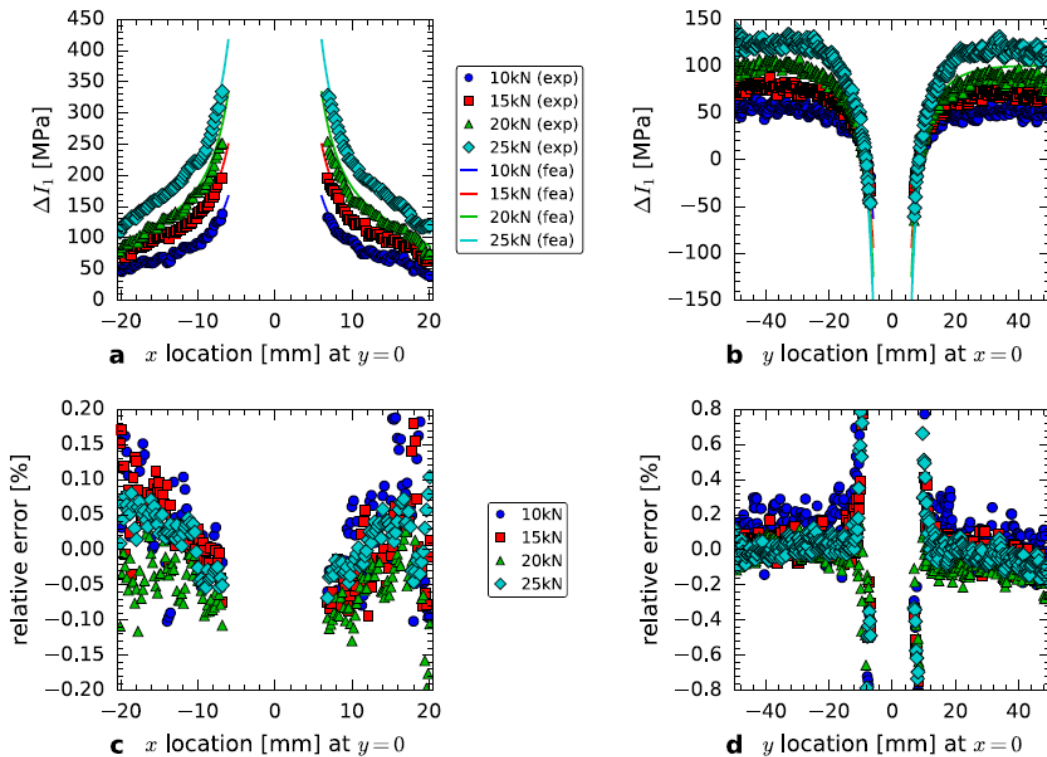


Figure 3 : Comparaison entre les profils numériques (traits continus) et expérimentaux (points) pour la calibration pixel à pixel compensée. La figure (a) montre les profils obtenus suivant l'axe x (au niveau de l'équateur du trou), la figure (b) les profils obtenus suivant l'axe y et la figure (c), resp. (d), l'erreur relative entre les profils numériques et expérimentaux associés à la figure (a), resp. (b).

4 Conclusion

Une calibration pixel à pixel compensée a été proposée et comparée à une calibration plus classique, appelée CNUC₂. Cette comparaison a été effectuée en mesurant le champ de couplage thermoélastique d'une plaque trouée. Il a été montré que lors de l'étude de champ de température 2D, le bruit inhérent à l'utilisation d'une caméra IR était divisé par 3 en moyenne.

Références

- [1] J. Mooney, F. Shepherd, Characterizing IR FPA nonuniformity and IR camera spatial noise, *Infrared Phys. Technol.* 37 (5) (1996) 595–606.
- [2] M. Poncelet, Multiaxialité, hétérogénéités intrinsèques et structurales des essais d'auto-échauffement et de fatigue à grand nombre de cycles, Ph.D. thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [3] M. Vollmer, K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Wiley, 2010.
- [4] V. Honorat, S. Moreau, J.-M. Muracciole, B. Wattrisse, A. Chrysochoos, Calorimetric analysis of polymer behaviour using a pixel calibration of an IRFPA camera, *Quantitative InfraRed Thermogr. J.* 2 (2) (2005) 153–171.
- [5] P. Stanley, Beginnings and early development of thermoelastic stress analysis, *Strain* 44 (4) (2008) 285–297.
- [6] J. Dulieu Barton, Introduction to thermoelastic stress analysis, *Strain* 35 (1999) 35–39.
- [7] S. Dunn, On the effects of through-thickness thermal conduction on stress measurements by thermoelastic techniques, *Exp. Mech.* 33 (1993) 32–36.
- [8] J. Dulieu Barton, S. Quinn, Thermoelastic stress analysis of oblique holes in flat plates, *Int. J. Mech. Sci.* 41 (1999) 527–546.
- [9] P. Florin, C. Doudard, M. Fachinetti, S. Calloch, Determination of the first stress tensor invariant of a complex steel sheet structure from thermoelastic stress analysis, *Proc. Eng.* 133 (2015) 736–745.