

Mesure de déformations piézoélectriques par corrélation d'images numériques

V. Segouin^{a,b}, M. Domenjoud^{a,c}, Y. Bernard^{a,d}, L. Daniel^{a,e}

a. GeePs | Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, 3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France

b. valentin.segouin@centralesupelec.fr

c. mathieu.domenjoud@centralesupelec.fr

d. yves.bernard@centralesupelec.fr

e. laurent.daniel@centralesupelec.fr

Résumé

Les matériaux piézoélectriques sont de plus en plus utilisés au sein des systèmes mécatroniques pour leur couplage électromécanique. La caractérisation de ces matériaux piézoélectriques nécessite une parfaite maîtrise des conditions aux limites des essais. La Corrélation d'Images Numériques (CIN) s'avère pour cela prometteuse puisqu'elle permet d'accéder aux champs de déformations longitudinal et transversal, donnant donc une information sur les conditions d'essai.

Dans ces travaux, un banc de CIN 2D a été développé afin de maîtriser les conditions d'essai lors de la mesure du comportement piézoélectrique. Ce banc a été testé au travers d'un essai piézoélectrique sous champ électrique constant. Les résultats de cet essai montrent que l'erreur de mesure est encore très différente de l'erreur estimée par le programme de corrélation en déformation. Cependant, ces résultats révèlent aussi qu'il est possible de caractériser des conditions d'essai avec le banc développé.

Mots clés : champ de déformations ; piézoélectricité ; CIN ; conditions d'essai

1. Introduction

Les matériaux piézoélectriques présentent un couplage électromécanique qui permet de réaliser aussi bien des capteurs que des actionneurs ou encore des systèmes de récupérations d'énergie. Cependant, le comportement de ces matériaux est non linéaire lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions sévères (forte contrainte, champ électrique ou température). La caractérisation de ces matériaux est de ce fait un point essentiel pour la conception de systèmes piézoélectriques. Cependant, cette caractérisation doit prendre en compte plusieurs contraintes (dimensions des échantillons, fort champ électrique, homogénéité des essais,...). Dans cet article, nous verrons en quoi la Corrélation d'Images Numériques (CIN) est une méthode permettant la mesure de déformations piézoélectriques et en quoi elle permet de caractériser les essais. Pour cela, le banc de corrélation utilisé sera présenté. Un essai piézoélectrique visant à étudier les capacités de ce banc sera exposé. La texture réalisée pour l'essai et le protocole de calibration seront ensuite explicités. Enfin, les résultats de l'essai seront présentés et discutés dans une dernière partie.

2. Essai expérimental

Le banc de CIN développé est un banc haute résolution utilisant le microscope longue distance Questar QM100 et une caméra CCD 14 bits monochrome 3384x2708 px. Ce système permet d'observer l'échantillon à une échelle de $0,6 \mu\text{m}/\text{px}$ (à 14,5 cm de l'échantillon) et de $1,18 \mu\text{m}/\text{px}$ (à 37 cm). Cette optique haute résolution a été choisie pour pouvoir mesurer de faibles déformations (10^{-6} à 10^{-4}) sur des tailles millimétriques d'échantillon. Concernant la corrélation, le programme CorreliQ4 a été utilisé^[1].

Ce banc de corrélation a été testé suivant l'essai piézoélectrique dont le principe et l'application sont décrits en Figure 1. Le champ électrique (de 0 à 300 V/mm) est appliqué selon la direction de la polarisation, conduisant à une déformation positive uniforme à la surface de l'échantillon. Le moteur piézoélectrique présent sur le schéma (a) a pour but de positionner l'échantillon en rotation afin d'optimiser la perpendicularité entre la surface mesurée et l'axe optique (le système optique n'étant pas représenté ici).

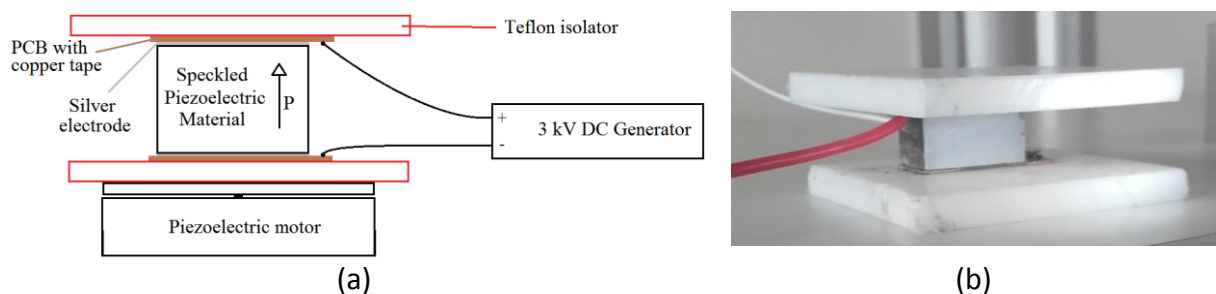


Figure 1. Matériau piézoélectrique sollicité selon son axe de polarisation par champ électrique constant (a) ; Échantillon Noliac NCE41 (20 x 10 x 10 mm) sous sollicitation (b)

3. Qualité de l'image en corrélation

3.1 Maîtrise de la texture

Afin d'optimiser la qualité de la texture pour la corrélation, une étude numérique a été menée. Plusieurs images numériques ont été simulées sur la base de disques noirs répartis aléatoirement sur une surface blanche. Les paramètres étudiés pour optimiser la texture étaient le rayon des disques, leur densité ainsi que la fréquence de coupure optique (représentative du filtrage optique). Afin de quantifier la qualité des images au regard de ces paramètres, le gradient quadratique moyen de ces images a été utilisé^[1-3].

Cette étude a permis de conclure que la texture optimale était dépendante de la fonction de transfert optique. Ainsi, pour notre optique, le rayon optimal des disques est situé entre 5 et 7 px. La densité des disques, en revanche, est toujours optimale pour une valeur de 0,5. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux similaires^[4], bien qu'ils n'aient pas relié le rayon optimal des disques à la fonction de transfert optique.

En pratique, le rayon de disque optimal est situé entre 3 et $8 \mu\text{m}$ du fait de l'échelle de mesure de notre application. Cette taille a été atteinte expérimentalement par projection de poudre de toner à l'aérographe (diamètre moyen des particules de $10 \mu\text{m}$). Le rendu de la texture (avec sous-couche de peinture blanche) est présenté en Figure 2.

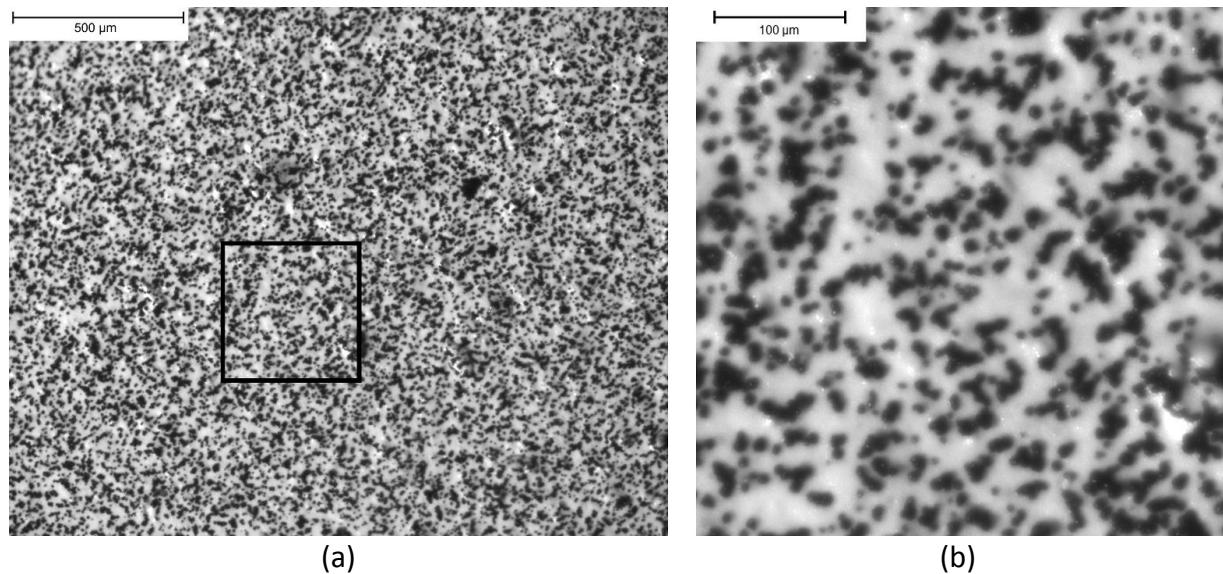


Figure 2. Photo d'une texture micrométrique à base de peinture blanche et de poudre de toner réalisée sur un matériau piézoélectrique (a) ; Vue agrandie de l'image a (carré noir) (b)

3.2 Calibration

Dans le but d'acquérir des images de qualité optimale, un protocole de calibration du banc optique a été mis en place. Ce protocole a pour but d'optimiser la focalisation, mais aussi de minimiser le défaut de perpendicularité entre l'objet photographié et l'axe optique. En effet, une mauvaise focalisation entraîne une baisse du gradient de l'image, ce qui augmente l'erreur lors de la corrélation. Le défaut de perpendicularité introduit quant à lui deux erreurs : une erreur géométrique liée à la projection des déplacements^[5] et une autre erreur liée à la baisse du gradient aux bords de l'image. Pour minimiser ces défauts, le gradient de l'image fournie par la caméra est calculé puis analysé. A partir de cette analyse, l'optique peut être calibrée avec une résolution de quelques microns sur le mouvement hors plan et avec une résolution de $0,2^\circ$ sur le défaut de perpendicularité.

4. Résultats

Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus via l'essai décrit en partie 2. L'échantillon (Figure 1b) a été soumis à un champ électrique constant, pour des valeurs variant de 0 à 3 kV/cm. L'essai a été mené à une échelle de $0,6 \mu\text{m}/\text{px}$ et la corrélation a été faite via des zones d'intérêt et un pas de 128 px chacun. Dans ces conditions, l'écart-type estimé (par le programme de corrélation) de l'erreur sur la déformation était de 3.10^{-5} .

Le champ de déformations longitudinal issu de la mesure à 1200 V/cm a été post-traité par un binning 2x2 et est présenté en Figure 3a. La loi de probabilité estimée à partir de ce champ est présentée en Figure 3b. L'écart-type du bruit observé est d'environ 10^{-4} et est donc trois fois plus important que l'erreur estimée. Cependant, ce bruit s'est avéré croissant avec le champ électrique. Par ailleurs, le champ de déformations comporte des pics locaux présents quel que soit la valeur de champ électrique. L'homogénéité du matériau, l'optique (poussières) ou les conditions environnementales (vibrations) seraient donc à mettre en cause. Enfin, une pente linéaire de variation $5,3.10^{-5}$ a été révélée dans le champ de déformations, ce qui pourrait trahir la présence d'une distorsion optique^[6].

En dehors des erreurs systématiques notées, les conditions d'essais (direction des déformations principales, absence de cisaillement ou rotation, homogénéité des déformations) ont pu être vérifiées à partir des champs de déformations mesurés à des niveaux de déformations supérieurs à 10^{-4} .

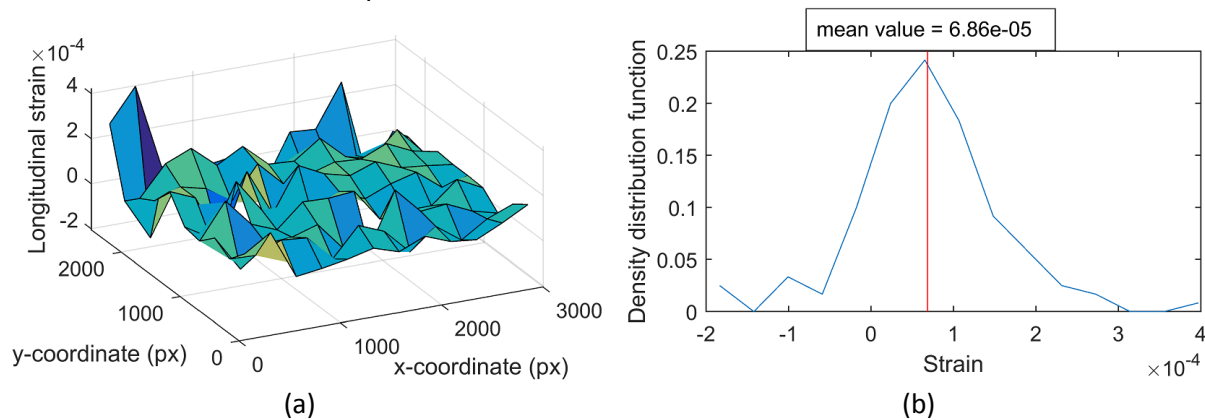


Figure 3. Champ de déformations longitudinal (a) et sa loi de probabilité estimée (b) – Echantillon piézoélectrique Noliac NCE41 à 1200 V/cm dans la direction de polarisation.

5. Conclusion

Ce travail expose la mise en place, et le développement d'un banc de CIN pour la mesure de déformations piézoélectriques. Celui-ci intègre une texture micrométrique contrôlée (particules de $10\ \mu\text{m}$ répartis aléatoirement selon une densité de 0,5) maximisant la qualité des images. Le banc développé a été testé via un essai piézoélectrique sous champ électrique. L'essai a révélé un bruit de mesure d'écart-type 10^{-4} , trois fois plus grand que l'erreur initialement estimée par l'outil de corrélation. Cependant, le champ de déformations montre que cette différence est en très grande partie due aux conditions d'essai. Par ailleurs, l'essai a montré que le niveau de bruit observé permet tout de même de vérifier les conditions d'essai.

Références

- [1] G. Besnard, F. Hild, and S. Roux, "'finite-element" displacement fields analysis from digital images: Application to portevin - le chatelier bands," *Experimental Mechanics*, 46 (2006) 789–803.
- [2] G. Crammond, S. Boyd, and J. Dulieu-Barton, "Speckle pattern quality assessment for digital image correlation," *Opt. and Lasers in Eng.*, 51 (2013) 1368-1378.
- [3] B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian, and Z. Wang, "Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns," *Optics express*, 16 (2008) 7037–7048.
- [4] T. Hua, H. Xie, S. Wang, Z. Hu, P. Chen, and Q. Zhang, "Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation," *Optics and Laser Technology*, 43 (2010) 9–13.
- [5] M. Sutton, J. Yan, V. Tiwari, H. Schreier, and J. Orteu, "The effect of out-of-plane motion on 2d and 3d digital image correlation measurements" *Opt. and Lasers in Eng.*, 46 (2008) 746–757.
- [6] B. Pan, L. Yu, and D. Wu, "High-accuracy 2d digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: Error analysis and experimental verification," *Experimental Mechanics*, 53 (2013) 1719–1733.