HAL
open science

Corrélation d'images volumiques : quelles limites à la résolution spatiale?

Hugo Leclerc, Jean-Noël Périé, François Hild, Stéphane Roux

To cite this version:

Hugo Leclerc, Jean-Noël Périé, François Hild, Stéphane Roux. Corrélation d'images volumiques : quelles limites à la résolution spatiale?. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592898

HAL Id: hal-00592898

https://hal.science/hal-00592898v1

Submitted on 3 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CSMA 2011
10e Colloque National en Calcul des Structures
9-13 Mai 2011, Presqu'île de Giens (Var)

Corrélation d'images volumiques : Quelles limites à la résolution spatiale?

H. Leclerc[1], J.-N. Périé[2], F. Hild[1], S. Roux[1]

[1] *Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT-Cachan)*
ENS de Cachan / CNRS / UPMC / PRES UniverSud Paris
61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex, France
{hugo.leclerc,francois.hild,stephane.roux}@lmt.ens-cachan.fr
[2] *Institut Clément Ader (ICA)*
Université de Toulouse; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE
133 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France
jean-noel.perie@iut-tlse3.fr

Résumé — La corrélation d'images possède une limite intrinséque entre résolution spatiale et incertitude sur l'évaluation du déplacement [1]. Il est proposé de dépasser cette limite en exploitant une régularisation basée sur le comportement mécanique du solide imagé. Cette procédure demande des schémas numériques performants qui permettent de traiter cette corrélation avec un très grand nombre de degrés de liberté (jusqu'à plusieurs centaines de millions).
Mots clés — Corrélation d'images volumiques, Régularisation, Résolution spatiale.

1 Introduction

La Corrélation d'Images (CI) nécessite une régularisation pour pouvoir fournir un champ de déplacement. Cette régularisation est souvent implicite dans le choix de la base cinématique choisie pour rendre compte du champ de déplacement. Or la "qualité" de cette régularisation conditionne grandement les performances de la CI. Par exemple, imposer une continuité du champ de déplacement au travers d'une décomposition sur une base de type éléments finis à deux [1] ou trois [3] dimensions, permet de diminuer l'incertitude de mesure par rapport à une approche locale où le déplacement est généralement approché par une déformation homogène zone à zone.

Cette contribution vise à introduire une régularisation plus proche de la mécanique sous-jacente du solide analysé pour réduire de manière significative l'incertitude de mesure cinématique, ou alternativement pour une même incertitude, d'augmenter le nombre de degrés de liberté permettant cette description.

2 Une régularisation élastique de la CI

2.1 Principe de la CI

La CI consiste à apparier deux images en niveaux de gris, l'une dans la configuration de référence, $f(\boldsymbol{x})$, et l'autre dans la configuration déformée, $g(\boldsymbol{x})$. Le champ de déplacement, $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})$, qui relie ces deux images au travers de la conservation des niveaux de gris

$$g(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) = f(\boldsymbol{x}) \tag{1}$$

est recherché en minimisant la forme faible de cette loi de conservation,

$$\mathcal{T}_{CI}[\boldsymbol{v}] = \int \left(g(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) - f(\boldsymbol{x})\right)^2 \, \mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{2}$$

sur un sous-espace de fonctions test $\boldsymbol{v} \in \mathcal{S}$. Dans la suite, cet espace sera choisi comme composé des fonctions de forme d'éléments finis de type Q4 (élément quadrangle à quatre nœuds, et fonction polynomiale de degré 1 dans chaque coordonnée) ou C8 (élément cubique à huit nœuds, et fonction polynomiale

de degré 1 dans chaque coordonnée). De plus, nous nous restreignons à des maillages homogènes et réguliers. La taille des éléments ℓ en pixels (ou voxels) sera donc le seul paramètre ajustable pour définir le maillage. La limite ultime de taille considérée dans le suite est de $\ell = 1$ pixel (ou voxel), et donc la discrétisation support de la cinématique aura la même finesse que l'image elle-même.

2.2 Régularisation élastique

Si l'on suppose que le solide support du champ de déplacement peut être décrit comme élastique, de propriétés locales données par un champ de tenseur de Hooke, $\mathbf{C}(\boldsymbol{x})$, et dépourvu de forces de volume, alors la régularisation proposée consiste à sommer la fonctionnelle d'écart à l'équilibre [2]

$$\mathcal{T}_{Mech}[\boldsymbol{v}] = \int \left(\mathrm{div}(\mathbf{C}(\boldsymbol{x}) : \boldsymbol{\nabla} \otimes \boldsymbol{v})\right)^2 \, \mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{3}$$

à $\mathcal{T}_{CI}[\boldsymbol{v}]$ assortie d'une pondération,

$$\mathcal{T}_{Tot}[\boldsymbol{v}] = \alpha \mathcal{T}_{CI}[\boldsymbol{v}] + (1-\alpha)\mathcal{T}_{Mech}[\boldsymbol{v}]$$

Le choix de α conditionne une échelle de longueur ξ telle que l'une ou l'autre fonctionnelle domine selon l'échelle de variation du champ de déplacement. Cette longueur, ξ, joue ainsi le rôle d'une taille de maille, ℓ, lorsque c'est ce seul choix qui dicte la régularisation (c.-à-d. $\alpha = 1$).

Cette formulation peut être appliquée avec des propriétés élastiques homogènes sur tout le domaine, ou bien différenciées, mais une faible sensibilité au contraste de propriétés élastiques a été observée.

3 Application

Cette approche a été appliquée à l'analyse de champs cinématiques tridimensionnels estimés à partir d'images de tomographie X. Une convergence vers un résultat stable et dépendant peu de ξ a été obtenue [4] pour une taille d'élément $\ell = 1$. On notera que le nombre de degrés de liberté cinématiques devient rapidement considérable (proportionnel à ℓ^{-3} pour une même région d'analyse). Une stratégie multigrilles de minimisation de $\mathcal{T}_{tot}$ a permis de traiter des cinématiques comptant jusqu'à plusieurs 10^8 degrés de liberté.

3.1 Sensibilité au bruit

La figure 1 a été réalisée sur une tomographie de fonte à graphite sphéroïdal. Le volume de référence f est entaché d'un bruit blanc gaussien pour former la configuration bruitée g. On mesure l'écart type du déplacement en fonction de la longueur d'onde de coupure (pour la méthode proposée) ou de la taille d'élément (pour une méthode de type CI-C8). Le but est d'obtenir le plus faible écart type possible, signe que l'influence du bruit sur déplacement mesuré reste faible.

La méthode proposée conduit à des incertitudes inférieures à la méthode CI-C8, qui permettait déjà de diminuer l'influence du bruit par rapport à des méthodes locales. Ce résultat pourrait paraître étonnant compte-tenu du nombre beaucoup plus important de degrés de liberté, mais la régularisation compense largement, en filtrant directement sur des longueurs d'onde suffisament grandes le bruit qui n'a pas de contenu mécanique.

3.2 Évolution des résidus de corrélation

La figure 2 a été réalisée sur une paire de volumes représentant le même matériau dans deux états différents de déformation. On trace ici le résidu adimensionné de corrélation qui décrit la distance entre $f(\boldsymbol{x})$ et $g(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}))$ à convergence, divisée par la dynamique de f.

Plus la longueur diminue, moins le système de corrélation est contraint, conduisant à un plus faible résidu. Néanmoins, et il s'agit d'un résultat notable, les résidus démarrent à des niveaux très bas, même avec de grandes longueurs de corrélation. Si la régularisation mécanique peut, pour la compréhension, être assimilé à un filtre passe-bas, en réalité seules les composantes non mécaniques du déplacement sont éliminées et tout ce qui vérifie la loi de comportement proposée est gardé, y compris les hautes fréquences spatiales qui sont impliquées. Pour de faibles longueurs, les résidus deviennent ensuite très bas, preuve de la robustesse de l'algorithme.

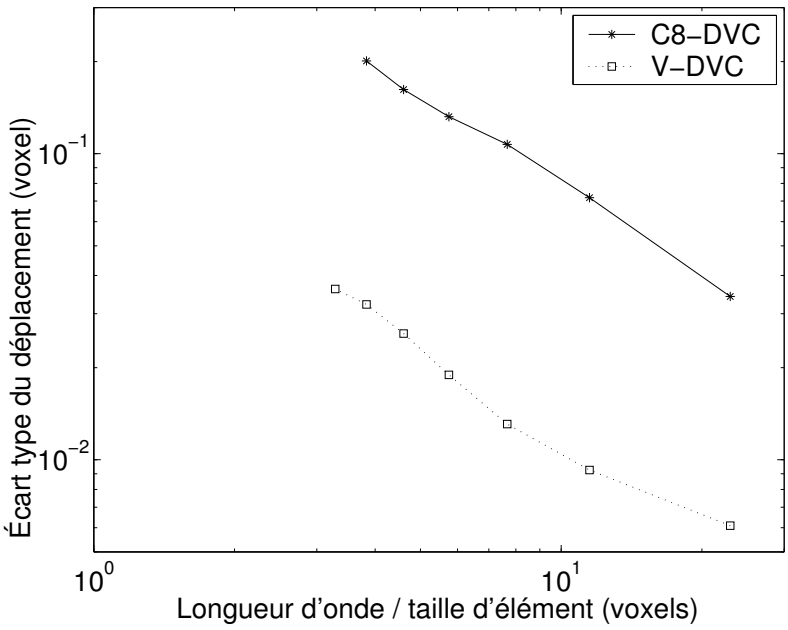

FIGURE 1 – Écart type du déplacement fonction de la longueur d'onde de coupure pour la méthode proposée, et de la taille d'élément pour une discrétisation éléments finis de type C8. Le niveau de bruit est tel que $\sqrt{2}\sigma = 1$ niveau de gris.

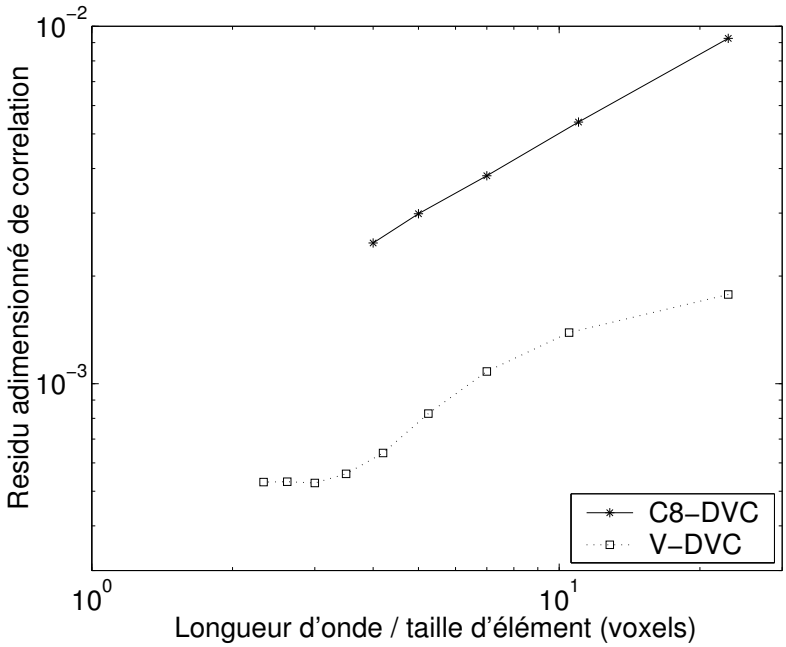

FIGURE 2 – Évolution du résidu de corrélation adimensionné pour des images d'une même pièce en fonte à graphite sphéroïdal dans deux états de sollicitation différents.

4 Stratégies de calcul

La méthode proposée conduit dans bon nombre de cas à des systèmes dont le nombre de degrés de liberté est beaucoup trop grand pour être résolus de façon directe. De plus, même la matrice non factorisée ne pourrait pas tenir en mémoire à l'aide de stockages conventionnels (CSR, etc.). Néanmoins, le problème se prête bien à la résolution par des algorithmes de type multigrilles, les solutions aux petites échelles étant clairement des raffinements de solutions aux plus grandes échelles. Si les préconditionneurs choisis sont de type Jacobi ou Gauss-Seidel, il est possible de procéder à la minimisation des résidus de corrélation en ne stockant jamais les matrices complètes. C'est cette stratégie qui a été implémentée. La génération automatique de code assistée par le calcul symbolique a permis par ailleurs

d'obtenir du code compatible CUDA (pour GPU), compact et rapide. Le code tourne donc indifféremment sur CPU et sur GPU.

À titre d'illustration, il faut actuellement compter à peu près 10 ms par itération sur une station GeForce GTX280 (gradient conjugué avec Jacobi) sur une image 2D dont la définition est 1000×1000 pixels (soit un problème à 2 millions de degrés de liberté). La figure 3 montre, en termes de déplacement, un exemple de résultat obtenu sur des images 2D.

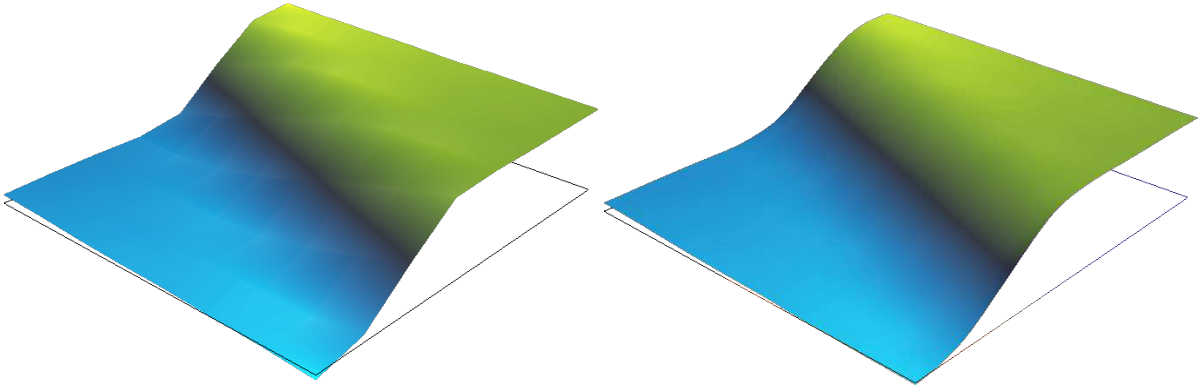

FIGURE 3 – Déplacement en y d'une éprouvette en traction présentant une bande de Portevin-Le Chatelier. L'image de gauche a été obtenue avec la méthode CI-Q4 et l'image de droite avec la méthode proposée. La taille de la zone d'étude est égale à 1000x1000 pixels. Le déplacement en y sur cet exemple varie entre -0,05 et 2,16 pixels.

5 Conclusions

Comme montré dans cet article, la méthode proposée permet à la fois d'obtenir des résidus de corrélation très bas tout en diminuant l'influence du bruit et en gardant une robustesse confortable. Ceci permet en outre de répondre directement au problème des textures localement pauvres en information, la mécanique prenant automatiquement le relais.

Des solutions ont par ailleurs été proposées pour résoudre efficacement la formulation choisie. L'utilisation de GPUs a notamment permis d'obtenir des temps de calcul compétitifs par rapport à des méthodes supposant des cinématiques plus pauvres.

Des applications d'identification de propriétés matérielles et géométriques sont en cours d'exploitation. Les résultats préliminaires sont encourageants.

Références

[1] G. Besnard, F. Hild, S. Roux, *Finite-element displacement fields analysis from digital images : Application to Portevin-Le Chatelier bands*, Experimental Mechanics **46**, 789-803, (2006)

[2] D. Claire, F. Hild, S. Roux, *A Finite element formulation to identify damage fields : The equilibrium gap method*, Int. J. Numer. Meth. Engng. **61**, 189-208, (2004)

[3] S. Roux, F. Hild, P. Viot, D. Bernard, *Three dimensional image correlation from X-Ray computed tomography of solid foam*, Comp. Part A **39**, 1253-1265, (2008)

[4] H. Leclerc, J.-N. Périé, S. Roux, F. Hild, *Voxel-Scale Digital Volume Correlation*, Experimental Mechanics, *sous presse* (2010) DOI : 10.1007/s11340-010-9407-6.