

Performances et limitations de la corrélation diachronique d'images pour les ouvrages d'art

■ Julien COMTE - Michel KASSER

La corrélation diachronique d'images est une technique de mesure basée sur la recherche de différences géométriques, éventuellement minimes, entre les images d'un objet prises à différentes époques. Déjà utilisée pour des mesures de déformations tectoniques, ou aussi bien en laboratoire, elle permet généralement de déterminer des déplacements avec une précision de l'ordre du centième de pixel, voire mieux, avec un simple appareil photo.

Dans le domaine de la surveillance d'ouvrages, les besoins actuels en solutions d'auscultation très économiques sont grands. La corrélation diachronique d'images, permettant des mesures sans contact et sans pose de repères, est en mesure de répondre au moins en partie à cette demande. L'enjeu principal des recherches menées à la HEIG-VD a été d'évaluer quelles sont les possibilités d'adaptations de ces techniques au domaine de la surveillance d'ouvrages. Moyennant un équipement à faible coût et des conditions variables de travail en extérieur, la plupart des limites d'utilisation de la corrélation d'images ont été explorées. Pour ce faire, de nombreux essais ont été effectués sur des ouvrages existants. En se plaçant dans des conditions de travail réalistes, chaque cas a permis de mettre en avant certaines limites et d'évaluer le potentiel exact de cette technique de mesure.

Les résultats ont révélé que la précision recherchée du centième de pixel peut aussi être atteinte pour des mesures de déplacements relatifs sur des ouvrages d'art. Des essais de suivi dynamique sur un pont ont également permis d'atteindre cette précision pour la détection des déformations du tablier à l'aide de rafales d'images. La présente étude synthétise donc les performances et les limites actuellement identifiées de cette technique.

■ MOTS-CLÉS

corrélation diachronique, photogrammétrie, auscultation des ouvrages d'art

des études de déformations tectoniques co-sismiques, ou des mouvements de versants instables. Cette technique a l'avantage de permettre des mesures sur toute la surface, sans contact, et ce sur une très large gamme d'échelles de mesure. Il est ainsi possible d'analyser des déplacements sur une surface allant de quelques mm² jusqu'à plusieurs centaines de km² en fonction du type de matériel employé et de la configuration du système mis en place.

Dans le domaine de l'auscultation d'ouvrages, on travaille aujourd'hui généralement avec des capteurs permettant uniquement une surveillance localisée sur des points caractéristiques de l'ouvrage minutieusement choisis. Lors des campagnes de mesures par relevés géométriques traditionnels, il est systématiquement nécessaire d'intervenir sur l'ouvrage pour la matérialisation et la mesure des points de surveillance. Ces campagnes sont donc longues et coûteuses en raison des difficultés d'intervention et ne fournissent là encore qu'un ensemble de mesures ponctuelles réparties sur l'ouvrage.

Les avantages des techniques de corrélation diachronique appliquées à l'auscultation d'ouvrages sont importants. La possibilité de disposer d'un champ de vecteurs sur l'ensemble d'un ouvrage sans contact correspond entièrement aux besoins actuels où l'on cherche à limiter les coûts et réduire la durée des interventions. Aujourd'hui, de nombreux ouvrages d'art et constructions sont vieillissants et doivent faire l'objet d'auscultations régulières. Il en ressort donc une forte demande de surveillance et un intérêt grandissant pour des solutions d'auscultation à faible coût.

Introduction

La corrélation d'images a fait son apparition avec l'arrivée des premières images spatiales numériques destinées à être exploitées en stéréo, dans les années 1980 (Spot 1). En photogrammétrie, on a commencé à utiliser les techniques de corrélation numérique pour la recherche de points homologues lors de l'apparition des scanners et la possibilité de numériser les clichés argentiques. La puissance de calcul disponible actuellement, couplée à la disponibilité de

logiciels de corrélation très efficaces, en Open Source (nous avons utilisé intensivement MicMac dans cette étude), permettent enfin d'exploiter cet outil sans limitations majeures.

En corrélation diachronique, la mesure de correspondance entre des images issues de différentes époques permet la détermination d'un champ de déplacements. Son utilisation s'est largement développée dans les milieux de la recherche sur les matériaux pour la réalisation d'essais de contraintes en laboratoire, mais aussi et d'abord pour

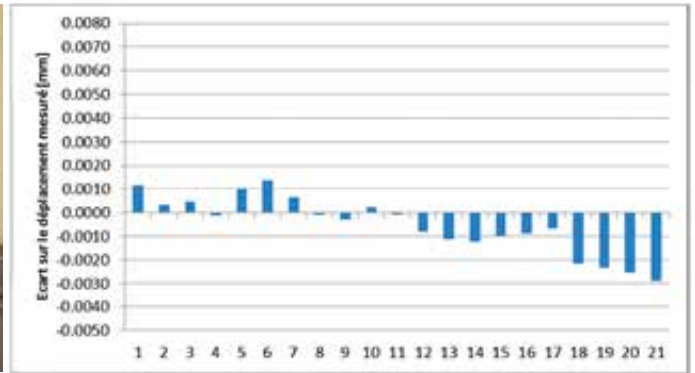
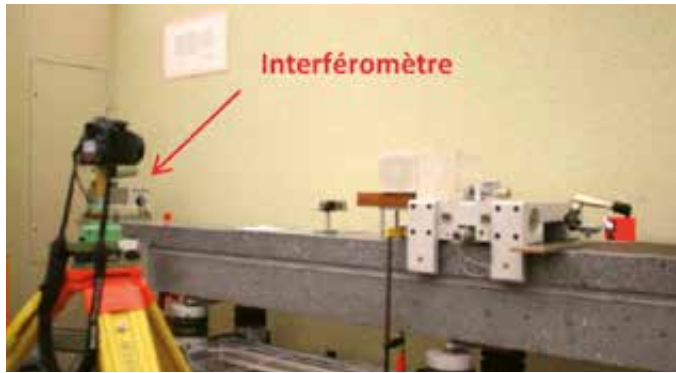


Figure 1. A gauche, l'expérience constituée par deux blocs de béton sur le banc de l'interféromètre, à droite les écarts mesurés entre l'interféromètre et la corrélation diachronique (1 pixel = 0.1 mm)(M. Prot, 2013).

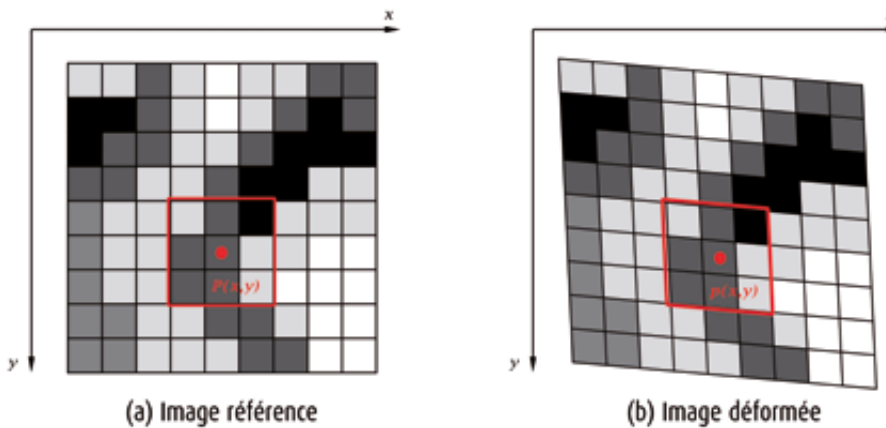


Figure 2

Pour la mise en correspondance, il existe plusieurs critères permettant de qualifier numériquement la ressemblance entre deux fenêtres. Ces critères se distinguent par leur faculté à supporter des variations d'intensité lumineuses entre les deux états. Seuls les plus robustes, appelés "normalisés centrés" permettent d'obtenir des résultats lorsque les conditions de luminosité sont variables. Ces derniers doivent impérativement être utilisés en corrélation diachronique.



Les essais menés en laboratoire sur des blocs de béton déplacés finement, mesurés avec un interféromètre laser et en parallèle par corrélation, montrent que sur ce type de matériau on atteint sans difficultés cette précision de mesure de l'ordre du centième de pixel (Figure 1).

L'enjeu principal de ces recherches est donc d'évaluer quelles sont les possibilités d'adaptations des techniques de corrélation à ce domaine précis de la surveillance d'ouvrages, moyennant des conditions d'environnement très variables. L'objectif est alors de définir quelles sont les limites d'utilisation dans les conditions courantes.

les changements intervenus entre les images. L'image "référence" correspond à l'état initial et les traitements mesurent les déplacements (disparités) par rapport à l'image "déformée" du second état (Figure 2).

Pour cela, les algorithmes de corrélation recherchent la correspondance maximale entre des petites portions d'images appelées imagettes ou *subset*. Lorsque le pic de corrélation est identifié, les déplacements entre les deux images sont obtenus. La taille de l'imagette utilisée pour le calcul a une grande influence sur les résultats. Le tableau suivant donne quelques critères de choix :

Critère	Formule	Type de robustesse	Modèle
C_{SSD}	$\sum (f_i - g_i)^2$	Aucun	$\Phi = G$
C_{ZSSD}	$\sum f_i - g_i $	Constante	$\Phi = G + b$
C_{NSSD}	$\sum \left(\frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2$	Échelle	$\Phi = aG$
C_{ZNSSD}	$\sum \left(\frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2$	Échelle + Constante	$\Phi = aG + b$

La qualité de la corrélation dépend également de la qualité des images. La présence de bruit a pour effet de réduire la qualité de la corrélation entre les images. Il convient donc de travailler avec des images ayant la meilleure dynamique possible, et de ce point de vue les appareils récents offrent souvent un excellent rapport signal/bruit.

Principes de la corrélation diachronique d'images

La corrélation diachronique d'images est une recherche des déformations entre deux images prises à différentes époques. En considérant un centrage et une orientation identique de la prise de vue aux deux époques, la corrélation permet de déterminer

Taille de l'imagette	Avantages (+)	Inconvénients (-)
Petite	Bonne description des mouvements à petite longueur d'onde.	Bruit dans la mesure.
	Calcul rapide.	
Grande	Minimisation des effets du bruit.	Lenteur de calcul.
	Filtrage des courtes longueurs d'onde.	Pas de détection des courtes longueurs d'onde.

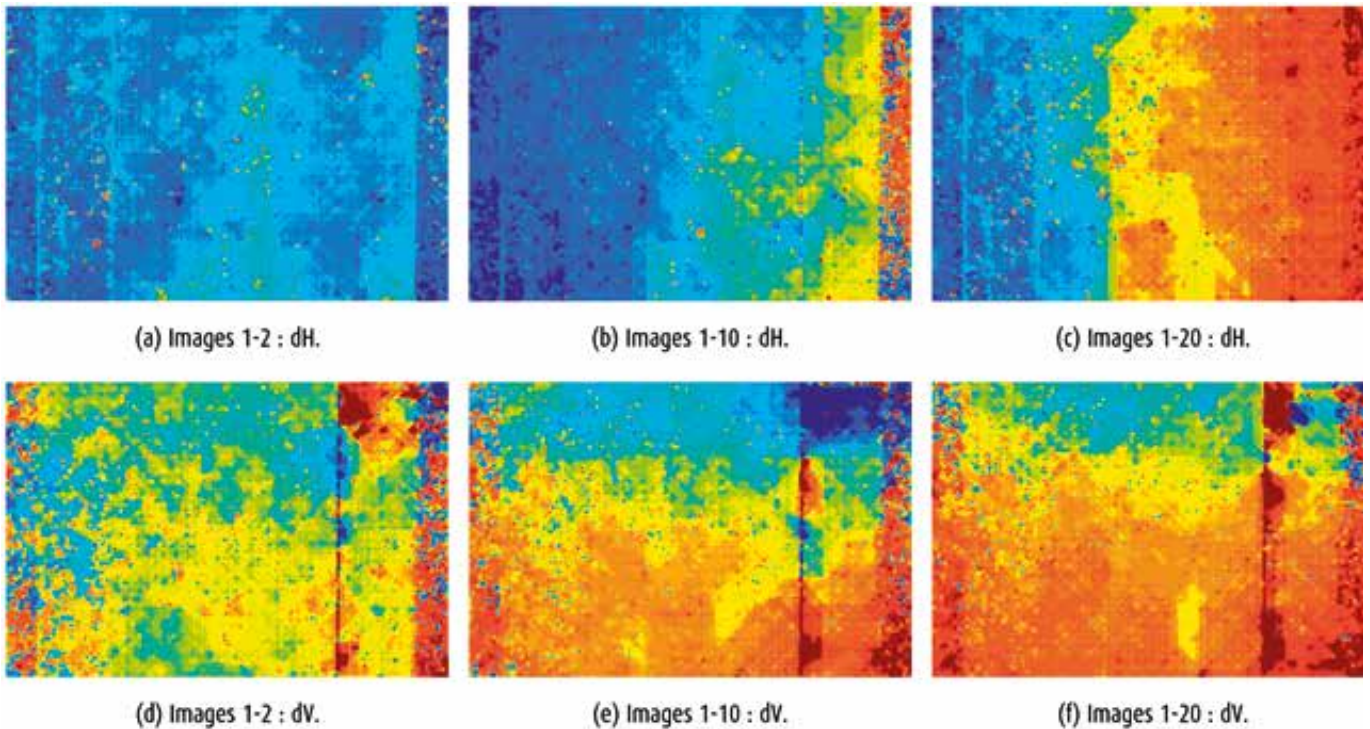


Figure 3. Disparités mesurées entre des images d'un mur supposé parfaitement immobile. Entre les 20 premiers clichés, les disparités horizontales (ligne supérieure) et verticales (inférieure) augmentent de façon régulière. Ces valeurs sont comprises entre -0.1 (bleu) et +0.1 pixel (rouge) et sont représentatives des déformations du système de prise de vue.

De la même manière, il faut que la texture de l'objet photographié soit adaptée, les structures périodiques posent ainsi toujours d'importants problèmes. Par contre, les surfaces anisotropes telles que le béton brut sont généralement satisfaisantes.

Contraintes et limites du système

■ Instabilité du capteur photographique

Lors d'une phase d'acquisition des images prévue pour être longue, il peut s'avérer utile de laisser le système de mesure dans un premier temps se mettre en température, en particulier si une série d'images doit être acquise. Le capteur CCD ainsi que le système optique peuvent subir des déformations thermiques entre les premières images. Les tests effectués montrent que l'ensemble a tendance à se stabiliser après moins de 10 minutes (*figure 3*).

Ce phénomène est l'un de ceux qui rendent impossible la détection de phénomènes ayant un effet isotrope sur l'image : on doit considérer que de

telles déformations ne sont pas mesurables avec cette technique. Dans ces conditions, une instabilité de la distance focale, qui engendrerait le même problème, n'a pas à être combattue, ce qui permet de travailler avec tous les appareils photo courants.

■ Effets de la distorsion

La distorsion présente dans tous les systèmes d'acquisition d'images est un phénomène bien connu des photographes, qu'ils corrigent en la mesurant au préalable. Pour un appareil courant non étalonné, lorsque le pointage de l'appareil n'est pas parfaitement identique entre les deux prises de vues, cela se traduit certes par une

translation entre les images, qui est corrigée lors du traitement, mais les effets dus à la distorsion non corrigée des images sont directement fonction du dépointage. Celui-ci implique que l'ouvrage ausculté n'est pas représenté par la même portion des deux images. La distorsion étant unique en chaque point de l'image, la mise en correspondance fait apparaître des différences de distorsion et non pas des déformations effectives. Nous avons cherché à savoir s'il était possible de se passer de mesurer cette distorsion dans un cas concret.

La *figure 4* montre les effets présents lorsque le point visé par l'appareil (Canon D400 focale 50 mm) est modifié de 280 pixels. Ces déplacements

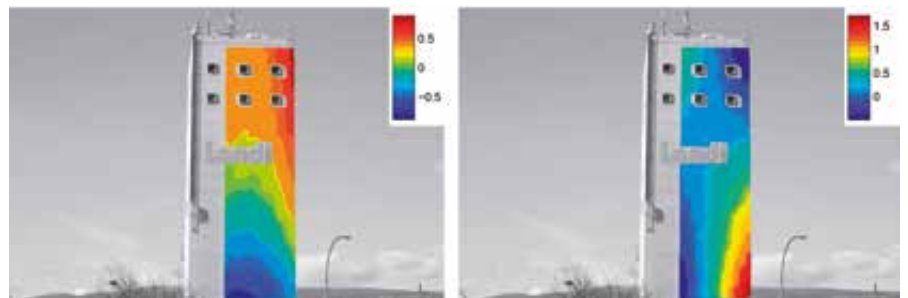


Figure 4. Effets sur la composante horizontale (à gauche) et verticale (droite) d'un dépointage de 280 pixels, qui engendre un fort effet dû à la distorsion de l'optique. Couleurs exprimées en pixels (1 pixel = 15 mm).

erronés atteignent près de 2 px aux extrémités de l'ouvrage. Les tests réalisés ont permis de définir qu'un dépointage de 15 pixels provoque encore des effets allant jusqu'à 0.1 pixel. Les moyens de mise en place du capteur permettent d'atteindre facilement un pointage inférieur à 5 px. Sachant que la distorsion augmente avec l'éloignement du centre de l'image, le centième de pixel peut être atteint en n'utilisant que leur partie centrale. Mais pour des cas où le pointage précis est difficile à reproduire, il faut donc mesurer puis corriger la distorsion, ce qui permet alors aussi de travailler avec des images issues d'appareils différents si besoin est.

■ Effets de rotation (mise en station)

En corrélation diachronique, l'appareil doit être centré de la même manière entre les deux états de mesure. En planimétrie, les embases permettent un centrage de l'appareil amplement suffisant pour ces applications. Par contre, pour la mise à l'horizontale, même une très légère inclinaison du capteur influence directement les mesures de disparités entre les images.

La figure 5 montre les résultats de corrélation d'une paire d'images acquises avec une mise à l'horizontale approximative (± 0.2 gons). L'interprétation des disparités de la tour indique une rotation du bâtiment dans le sens horaire. Le défaut d'horizontalité est très visible et, sans corrections, rend l'analyse des déformations impossible.

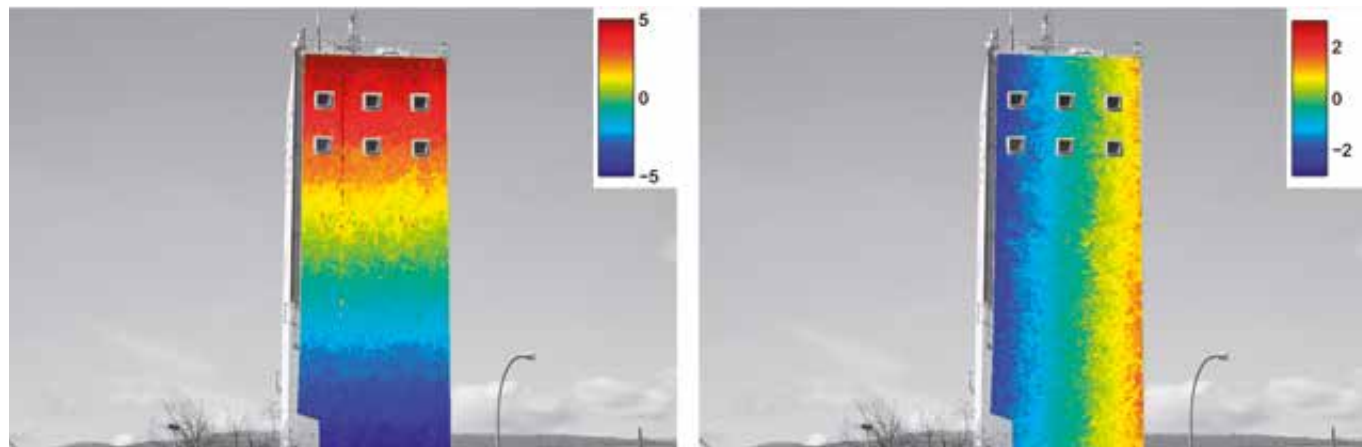


Figure 5. Composantes horizontale (à gauche) et verticale (droite) de la corrélation entre deux images, avec une rotation de l'appareil entre les deux acquisitions, les couleurs sont exprimées en pixels (1 pixel = 15 mm)

Pour éliminer cet effet de rotation, le recours au centrage forcé sur potence pourrait être envisagé. En effet, les embases habituelles ne permettent pas une précision d'horizontalité suffisante pour ces applications de corrélation. Dans des conditions similaires à l'exemple présenté, une inclinaison de 0.005 gons engendre des disparités proches du dixième de pixel. Un point important à noter est que l'on ne corrige que très imparfaitement cet artefact par un calcul *a posteriori*, car c'est directement la corrélation entre deux images dont l'une a subi une petite rotation qui est dégradée. La solution la plus efficace consiste donc à recalculer, par re-échantillonnage, une des images en supprimant la rotation d'ensemble, et seulement ensuite à appliquer la corrélation diachronique. Dans ces conditions, on parvient à atteindre la précision de 0.01 pixel.

■ Amélioration des images

La dynamique des images est un élément essentiel de la qualité de la corrélation. Il faut donc régler l'acquisition d'image pour que l'histogramme soit le plus proche possible de la saturation, sans l'atteindre bien entendu : c'est ainsi que l'image présente le meilleur rapport signal/bruit (Figure 6). Mais même ainsi, le coefficient de corrélation peut rester insuffisant sur certaines surfaces très unies. La notion de surface unie (radiométrie constante, donc corrélation impossible) est directement liée à la dynamique : avec 12 bits significatifs, on n'observe presque aucune surface unie, là où avec 7 bits on en trouve beaucoup. Cela signifie-t-il qu'on ne peut traiter des surfaces unies avec un appareil courant à faible dynamique ? Non, car il est souvent possible, lorsque l'objet ne se déforme que très

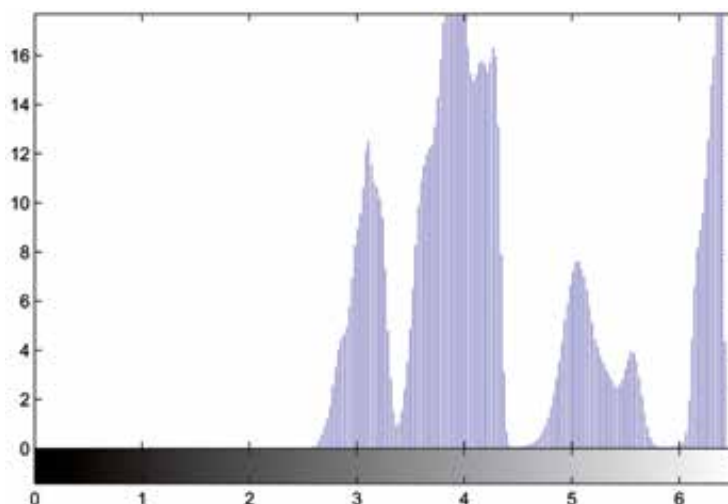


Figure 6. Un histogramme d'image optimal, s'approchant autant que possible de la saturation sans l'atteindre.

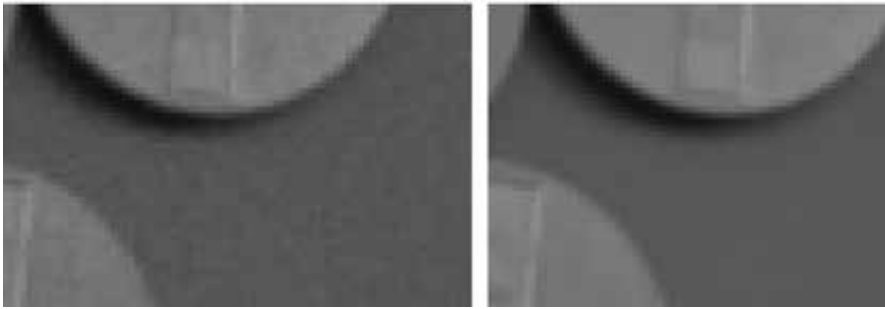


Figure 7. Exemple de sommation d'images : à gauche une image normale, à droite la somme de 16 images, montrant la réduction considérable du bruit.

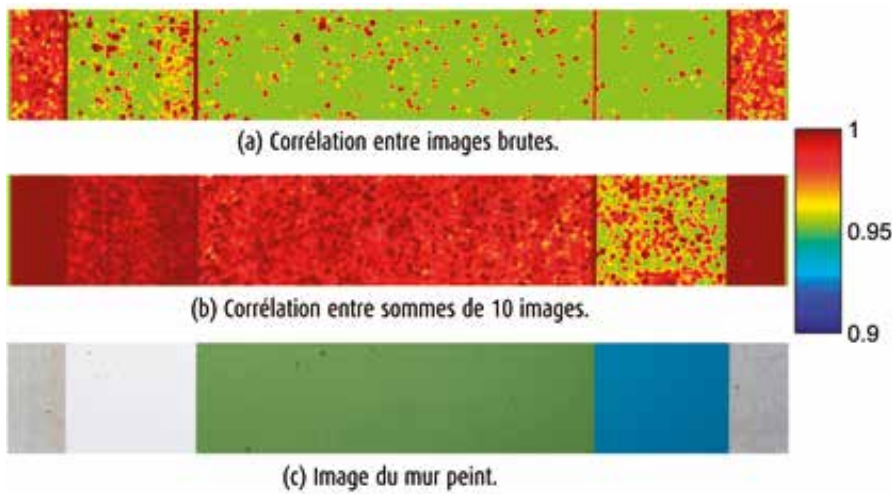


Figure 8. En (c), l'image du mur, en (a) est représenté le coefficient de corrélation entre deux images successives, avec de larges zones où ce coefficient est inférieur à 0,96, seuil qui correspond à des corrélations satisfaisantes. En (b), avec une sommation de 10 images, le coefficient devient satisfaisant à peu près partout.

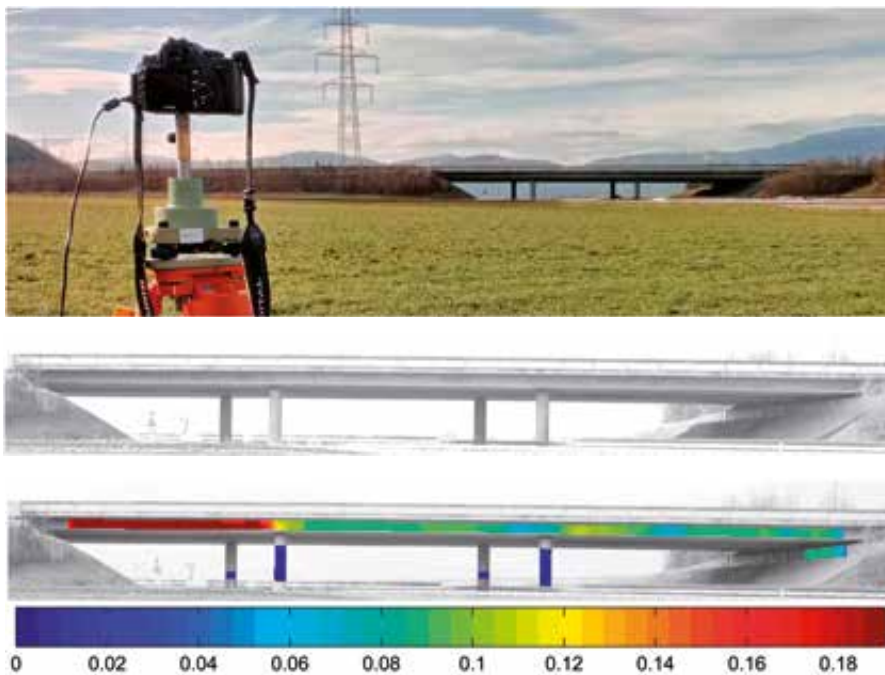


Figure 9. Pont autoroutier et les déplacements verticaux observés à l'occasion du passage d'un véhicule, les couleurs sont exprimées en pixels (1 pixel = 3 cm).

lentement, d'effectuer une sommation d'images acquises en rafale. En effet si rien ne bouge pendant les acquisitions successives, pour chaque pixel de l'image on va se permettre de sommer les valeurs obtenues dans les images successives, et pour 2 images, on augmente ainsi de 1 bit significatif la dynamique de l'image, ou encore pour 64 images sommées on l'augmente de 6 bits, ce qui permet de résoudre à peu près toutes les situations, sauf celles où l'objet est susceptible de bouger pendant les acquisitions (Figure 7).

Autre exemple, celui d'un mur en béton peint, avec certaines surfaces très unies (Figure 8).

Néanmoins, on observe généralement que, sur les surfaces en béton naturel, le coefficient de corrélation est satisfaisant avec une seule image pour des appareils photo récents, qui ont souvent plus de 10 bits significatifs. C'est ainsi que le pont ci-dessous a permis une corrélation satisfaisante pour des images uniques malgré un éclairage médiocre (contre-jour), ce qui permet de mesurer sa flexion en situation dynamique (Figure 9).

Conclusion

Les résultats obtenus permettent de bien définir les performances et les limitations de la corrélation diachronique pour le suivi d'ouvrages d'art. Au-delà de la finesse des déplacements identifiables, la possibilité de réaliser des mesures sans contact et sans pose de cibles est d'un grand intérêt. La génération d'un champ de vecteurs sur un ouvrage au complet permet l'analyse des cas de déformations les plus complexes.

Premier point : on ne sait finalement détecter, avec ce procédé, que des déformations dans le plan perpendiculaire à l'axe optique, et non isotropes à l'intérieur de ce plan. Mais ceci est pleinement satisfaisant pour la plupart des ouvrages d'art, où l'on va rechercher des flexions, des cisaillements, des ouvertures de fissures, etc., et où aucune déformation à caractère isotrope ne présente généralement d'intérêt. L'observation peut être



envisagée même à des distances très importantes de l'ouvrage surveillé, puisqu'on dispose aujourd'hui d'une gamme considérable de focales pour les appareils photo courants, y compris de très longues focales : dans ces conditions, la réfraction entraîne des mouvements d'ensemble rapides de l'image, mais peu de déformations internes à celle-ci, et donc *a priori* rien n'empêcherait d'ausculter un viaduc à 1 km de distance voire davantage, avec une précision inchangée. Néanmoins, ce point doit encore faire l'objet d'études complémentaires.

Par ailleurs, des problèmes liés aux changements d'éclairage peuvent apparaître, sans que ce point soit encore suffisamment exploré. Mais au pire, ces problèmes peuvent être réglés par l'utilisation de prises de vues nocturnes, puisqu'un éclairage artificiel constant permet d'éliminer toute variation d'intensité lumineuse d'une fois à l'autre.

Nous avons également noté que la partie étudiée ne devait pas être masquée partiellement par un élément aléatoire comme des arbres, sauf à compliquer beaucoup le traitement (en détournant manuellement ces éléments).

En outre, il est généralement recommandé de travailler avec des optiques dont la distorsion est étalonnée. Mais avec des protocoles de mesures assurant une bonne répétitivité du pointage, nous avons vu que cette requête pouvait être évitée. Ainsi, une simple webcam peut-elle devenir un instrument de mesure ultra-précis.

En s'approchant du centième de pixel, la précision des mesures peut atteindre le dixième de millimètre dans de bonnes conditions d'acquisition, et dans certains cas nous sommes parvenus au micron. La mise en place d'un système de mesure d'une telle précision, à haute vitesse (les appareils courants offrent des rafales allant jusqu'à 10 images/s en pleine résolution, ce qui est considérablement meilleur que l'exploitation d'une vidéo) et à faible coût devrait donc en faire sous peu un outil indispensable dans le monde de l'auscultation. ●

Contacts

Julien COMTE

julien.comte@mc-sa.ch

Michel KASSER

michel.kasser@heig-vd.ch
HEIG-VD

Bibliographie

M. BORNERT and F. HILD, *Mesure des champs cinématiques par corrélation d'images numériques*, Atelier Photomécanique, juillet 2004.

M. DEBELLA-GILO and A. KÄÄB, *Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation*, Remote Sensing of Environment, (2011), pp. 130-142.

M. P. DESEILLIGNY, *Micmac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique*, Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN n°77, (2007).

B. D. LUCAS and T. KANADETHOR, *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*, in Proceedings of Imaging Understanding Workshop, 1981, pp. 121-130.

B. PAN, *Recent progress in digital image correlation*, in Experimental Mechanics, 2011.

B. PAN, K. QUIAN, H. XIE, and A. ASUNDI, *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review*, in Measurement Science and Technology, I. Publishing, ed., 2009.

M. PROT, *Corrélation diachronique d'images pour l'auscultation d'ouvrages*, Master MIT, 2013.

L. ROBERT and B. WATTRISSE, *Evaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats*, 19^e Congrès Français de Mécanique, 2009.

H. W. SCHREIER and M. A. SUTTON, *Experimental Mechanics*, vol. 42, 2002, ch. Systematic Errors in Digital Image Correlation Due to Undermatched Subset Shape Functions, pp. 303-310.

M. A. SUTTON, J.-J. ORTEU, and H. W. SCHREIER, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, 2009.

S.-H. TUNG, M.-H. SHIH, and W.-P. SUNG, *Development of digital image correlation*

method to analyse crack variations of masonry wall, Sadhana, 33 Part 6 (2008), pp. 767-779.

S. YAOFENG and J. H. PANG, *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images, p. 967-974.

VAN PUymbROECK, N., MICHEL, R., BINET, R., AVOUAC, J.P. and J. TABOURY. *Measuring earthquakes from optical satellite images*, Applied Optics Information Processing, 39, 23, 1-14, 2000.

ABSTRACT

Diachronic image correlation is a measurement technique based on the search for geometric differences, possibly minimal, between images of an object taken at different times. Already used for measurements of tectonic deformation, or in laboratory as well, it usually determines displacements with an accuracy of one hundredth pixel or better, with a single camera. In the field of structural monitoring, current needs for very economic auscultation solutions are great. Diachronic correlation of images, allowing measurements without contact and without benchmarks, is able to answer at least to part of this demand. The main challenge of the research conducted at the HEIG-VD was to assess what are the possibilities of adaptation of these techniques to the field of structural monitoring. For a low-cost equipment and variable working outdoors conditions, most limits use of image correlation were explored. To do this, many tests have been performed on existing structures. Done in realistic working conditions, each case has put forward certain limits and allowed to evaluate the exact potential of this technique. The results showed that the desired accuracy of one hundredth of pixel can be reached for measuring relative displacements on structures. Dynamic tests on a bridge also achieved that this detection accuracy is possible by means of fast image acquisitions. The present study summarizes the performance and limitations of this technique.