

MISURA AUTOMATICA DELL'APERTURA DI FESSURE MEDIANTE ALGORITMI IMAGE-BASED

Luigi BARAZZETTI, Marco SCAIONI

Politecnico di Milano – Dip. I.I.A.R., P.za Leonardo da Vinci 32, Milano
luigi@geomatica.como.polimi.it, marco.scaioni@polimi.it

Riassunto

La misura dell'apertura di fessure è un obiettivo di primaria importanza nell'identificazione dell'assetto strutturale di edifici, nel monitoraggio geologico e nelle prove su materiali.

Fino ad oggi le misurazioni sono state eseguite con strumenti di semplice utilizzo ed adatti ad un controllo frequente (fessurimetri, deformometri, estensimetri), con funzionamento principalmente di tipo meccanico. Il controllo, in questo caso, avviene mediante la misura della distanza tra due piastrine metalliche applicate in maniera stabile ai lati della lesione. Tale tecnica permette quindi solo la valutazione dell'apertura della fessura e non fornisce alcuna informazioni riguardo lo slittamento o la rotazione dei lembi della stessa.

L'algoritmo implementato permette invece la misura automatica degli spostamenti a partire da immagini periodicamente acquisite con camera digitale.

Considerando che una fessura può presentarsi su una superficie dove non è presente tessitura, prima dell'acquisizione delle immagini devono essere applicati ai lati della lesione due supporti artificiali su cui sono presenti dei target.

Il metodo permette di valutare sia l'apertura della singola fessura sia la presenza di traslazioni e rotazioni piane con una accuratezza pari a $\pm 0.01 \div 0.02$ mm in base al tipo di camera utilizzata, come dimostrato da successive prove di laboratorio.

Abstract

The measurement of crack deformation is an important task in structural and geological monitoring, either for the surveillance of existing structures and sites, and for laboratory testing.

Up today it has been accomplished by different kinds of instruments and sensors. In all cases, where only a periodic check is needed, measurements by analogue or digital deformometers are carried out. On the other hand, when a continuous monitoring is required, a permanent sensor is mounted in correspondence of the crack to control, and detected displacements send to an acquisition unit which performs data validation and archiving, and gives an alarm in case the deformation threshold for a crack is overcome.

The technique implemented is based on measurement performed by analyzing digital images periodically acquired on the area surrounding the crack.

The equipment needed to apply this procedure is made up of a pair of targeted supports to be placed in permanent way on both sides of the crack. The measurement process is carried out in an almost fully automatic way, fact that makes this technique highly operational also for unskilled people in engineering surveying or photogrammetry. The accuracy of the proposed method, evaluated in experimental tests adopting two very common digital cameras, is about $\pm 0.01 \div 0.02$ mm, like the accuracy of the most part of deformometers.

1 Il rilievo del quadro fessurativo

La misura dello stato fessurativo è uno dei metodi oggi utilizzati per valutare le condizioni di deterioramento e di stabilità di una struttura. L'interpretazione delle lesioni di una struttura può consentire, oltre alla comprensione dello stato del danno, di identificare le possibili cause che lo hanno generato. Il rilievo del quadro fessurativo diviene quindi di fondamentale importanza per l'identificazione dell'assetto strutturale. In alcuni casi, gli stati di danno possono essere studiati solo mediante il confronto del quadro con quello d'altri casi noti.

Indipendentemente dal tipo di materiale di cui è composto l'elemento strutturale, la limitazione delle fessure è uno degli aspetti centrali del comportamento in esercizio delle strutture, in quanto fessurazioni eccessive possono compromettere in maniera irreversibile non solo l'estetica degli elementi strutturali ma, a lungo termine, anche la funzione statica.

Gli strumenti oggi in uso per monitorare l'ampiezza delle fessure sono generalmente di semplice utilizzo e si prestano a controlli frequenti.

I dispositivi più economici sono i *fessurimetri* (fig. 1) che, con un costo di poche decine di euro e precisione dell'ordine di $\pm 0.5 \div 1$ mm, sono adatti a situazioni a basso rischio o quando le dimensioni della fessura sono considerevoli.



Figura 1 – I fessurimetri lineare ed angolare Fes-TT1 e Fes-TT2 TECNIX

Gli strumenti utilizzabili invece nei casi ove è necessario ottenere precisioni significative nell'ordine di $\pm 1/100$ di mm sono i *crepemetri* (fig. 2), oppure quando l'incertezza delle misurazioni risulta essere ancora maggiormente spinta si ricorre all'uso dei *deformometri*, con precisione del micrometro.



Figura 2 – Il crepometro TECNIX Cre-C1 e i deformometri EMME 100 e DEMEC

2 Il metodo proposto

Il metodo sviluppato consente il monitoraggio della variazioni dell'ampiezza di una fessura mediante una sequenza di immagini acquisite con camera digitale.

La ripresa del singolo fotogramma avviene ponendo la camera dinanzi alla fessura oggetto del controllo utilizzando un treppiede fotografico, per mantenerla quanto più possibile stabile ed evitare così l'effetto di trascinamento causato dal movimento della stessa (fig. 3). Laddove questo non

fosse disponibile si cercherà di utilizzare tempi di posa molto brevi col fine di conseguire lo stesso risultato.



Figura 3 – L’acquisizione di un fotogramma e i target dei supporti e della cornice

Il monitoraggio della fessurazione avviene tramite il posizionamento ai lembi della lesione di due supporti segnalizzati che risultano pressoché simmetrici rispetto alla direzione della fessura (fig. 3). Su di essi, come è possibile notare, sono stampati dei target a forma di corona circolare (tipo 1), che consentono la localizzazione automatica dei punti di riferimento sulle immagini; i rimanenti, aventi una forma circolare (tipo 2), permettono di misurare con precisione le variazioni della fessura.

Le immagini che compongono una sequenza possono essere riprese con angoli di assetto della camera e con distanze di volta in volta variabili, in quanto l’algoritmo è predisposto per accettare immagini indipendentemente dalla loro geometria.

Una delle immagini della sequenza, generalmente quella iniziale, dovrà contenere anche un’apposita “cornice di calibrazione”, ossia un supporto riportante dei punti di coordinate note, mediante i quali è possibile inquadrare le misure successive in un sistema di riferimento esterno.

I 3 elementi necessari per l’applicazione del metodo sono: le immagini della fessura, le immagini modello delle differenti marche (*template*) ed i parametri di calibrazione della camera.

L’algoritmo di calcolo è in grado in modo del tutto automatico di valutare l’entità degli spostamenti dei supporti posti in ciascuna immagine rispetto a quella iniziale, in modo da non cumulare errori nell’elaborazione dei dati da una immagine a quella successiva. Note le coordinate immagine di tutti i target dell’immagine iniziale, è possibile determinare le corrispondenti coordinate oggetto grazie alla cornice di calibrazione.

L’ultima operazione riguarda il calcolo dell’apertura della fessura che avviene mediante la valutazione delle distanze tra le marche corrispondenti sui due lembi.

A partire dalle coordinate della seconda immagine della sequenza la procedura è applicata allo stesso modo, salvo l’inutilità di impiegare la cornice di calibrazione. Infatti, l’inquadratura in un sistema di riferimento stabile è eseguito basandosi sui soli target di tipo 2, che nella immagine iniziale sono stati usati come riferimento.

A questo punto, confrontando le coordinate dei target di tipo 2 misurati all’epoca t con quelli all’epoca t_0 , vengono determinate le variazioni della fessura.

3 L’algoritmo implementato

In generale il metodo che consente di valutare la variazione dell’apertura della fessura opera in due fasi distinte: dapprima vengono misurate le coordinate immagine dei target su ogni singola immagine e successivamente saranno eseguite le necessarie trasformazioni al fine di determinare le corrispondenti coordinate oggetto.

In questo paragrafo verranno sinteticamente descritte le suddette operazioni.

3.1 La misura delle coordinate immagine dei target

La procedura prende avvio dalla misura dei target della cornice di calibrazione sulla prima immagine della sequenza. In tal caso è l'utente a individuare manualmente la posizione approssimata dei 4 target estremi, mentre le posizioni dei restanti verrà valutata in modo automatico. Questa operazione è l'unica che l'utente dovrà eseguire e, indipendentemente dal numero di immagini che compongono la sequenza, il numero di misure risulta sempre pari a 4.

I target di tipo 1 dei supporti posti ai lembi della lesione vengono invece localizzati in modo automatico mediante l'applicazione della trasformata di Hough (Davies, 1988) previa segmentazione dell'immagine mediante l'algoritmo di Canny (Canny, 1986).

Partendo dalla posizione approssimate dei target di tipo 1, essendo nota la geometria dei supporti e dei relativi target sarà possibile individuare anche la posizione dei target di tipo 2.

Successivamente, potendo disporre di una posizione approssimata per ogni target, occorrerà valutarne il centro con precisione sub-pixel.

A tal scopo verranno applicati in sequenza un metodo di cross-correlazione da *template*, che permette di individuare su una immagine digitale delle forme prestabilite e di determinare il centro del target con precisione del pixel, fornendo contemporaneamente un giudizio di qualità.

Infine verrà valutato il baricentro in una finestra centrata attorno alla posizione fornita con il metodo della correlazione, dopo aver convertito l'immagine in formato binario. Tale metodo consente di raggiungere una precisione nella misura delle coordinate immagine sino a $\pm 1/20$ di pixel.

3.2 Il calcolo dell'apertura della fessura

Le coordinate oggetto dei target di deformazione della prima immagine risultano misurate rispetto al sistema di riferimento (X, Y) definito dalla cornice di calibrazione, con l'asse X passante per i punti 25-17 e l'asse Y ruotato di 90° in senso antiorario rispetto al precedente (fig. 4). Il nuovo sistema di riferimento che si intende istituire avrà invece origine in corrispondenza del target numero 102, con l'asse delle x passante per il punto 106 e l'asse delle y , ortogonale rispetto al precedente in senso antiorario, in modo da risultare coincidente con gli spostamenti che si intendono misurare.

L'operazione da eseguire per trasformare in punti da XY a xy è data da una rototraslazione nel piano. Dopo aver determinato l'angolo α tra gli assi X ed x si possono trasformare tutti i punti applicando le formule seguenti:

$$\begin{aligned} x_{T2}^i &= (X_{T2,0}^i - X_{T2,0}^{102}) \cos \alpha + (Y_{T2,0}^i - Y_{T2,0}^{102}) \sin \alpha \\ y_{T2}^i &= -(Y_{T2,0}^i - Y_{T2,0}^{102}) \sin \alpha + (X_{T2,0}^i - X_{T2,0}^{102}) \cos \alpha \end{aligned} \quad i = \{101, 102, \dots, 112\} \quad [1]$$

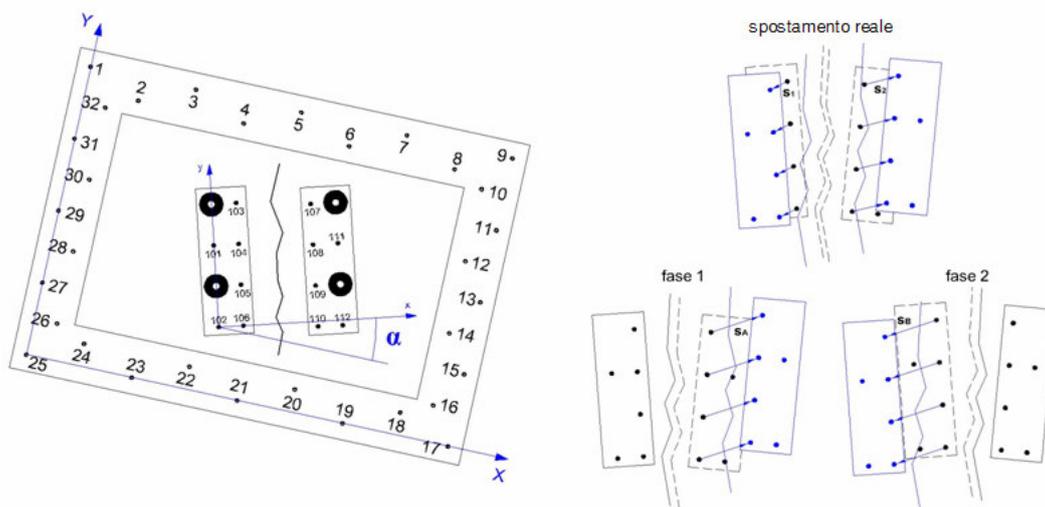


Figura 4 – La numerazione dei target e le fasi per valutare l'apertura della fessura

Infine note le coordinate rispetto al nuovo sistema di riferimento sarà possibile il calcolo dell'apertura della fessura.

I dati utilizzati a tal scopo sono le coordinate oggetto iniziali dei target di deformazione x_0, y_0 e le coordinate immagine misurate con il metodo del baricentro dei target di deformazione sulle n immagini successive: u_i, v_i , con $i = 1, 2, \dots, n$. L'idea alla base dell'algoritmo implementato è la stima dei parametri di una trasformazione piana mediante le precedenti coordinate, supponendo indeformabili i due supporti ai lati della fessura in modo tale che le posizioni reciproche tra i target su uno stesso supporto non subiscano variazioni nel tempo.

In generale, l'apertura della fessura provoca uno spostamento rigido di entrambi i supporti. Questo fatto introduce un problema nella scelta del sistema di riferimento, che nella immagine iniziale della sequenza è stato vincolato al supporto di sinistra. In realtà, nel caso dell'apertura della fessura, anche questo può spostarsi.

Il metodo utilizzato consente di valutare lo spostamento supponendo dapprima che il supporto posto a sinistra della fessura rimanga fermo ed ipotizzando solo uno spostamento di quello di destra (fase 1, vettore $\vec{s}_{A,i}$). Nel passo successivo si procederà esattamente nella maniera opposta, ovvero si assumerà un movimento relativo del supporto di sinistra rispetto a quello di destra (fase 2, vettore $\vec{s}_{B,i}$), considerato bloccato. Come si può notare nella figura 4, i vettori che individuano gli spostamenti relativi tra i supporti devono verificare la condizione $\vec{s}_{2,i} - \vec{s}_{1,i} = \vec{s}_{A,i} = -\vec{s}_{B,i}$. Il vantaggio di stimare i due vettori relativi di spostamento, che dovranno risultare come visto opposti, risiede nella possibilità di eseguire un controllo.

Lo spostamento potrà dunque essere valutato con le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \frac{1}{8} \left\{ \sum_{j=0}^3 \left[(x_{A,i}^{7+j} - x_{A,i}^{3+j}) - (x_{A,0}^{7+j} - x_{A,0}^{3+j}) \right] + \sum_{j=0}^3 \left[(x_{B,i}^{7+j} - x_{B,i}^{3+j}) - (x_{B,0}^{7+j} - x_{B,0}^{3+j}) \right] \right\} \\ \Delta y_i &= \frac{1}{8} \left\{ \sum_{j=0}^3 \left[(y_{A,i}^{7+j} - y_{A,i}^{3+j}) - (y_{A,0}^{7+j} - y_{A,0}^{3+j}) \right] + \sum_{j=0}^3 \left[(y_{B,i}^{7+j} - y_{B,i}^{3+j}) - (y_{B,0}^{7+j} - y_{B,0}^{3+j}) \right] \right\} \end{aligned} \quad [2]$$

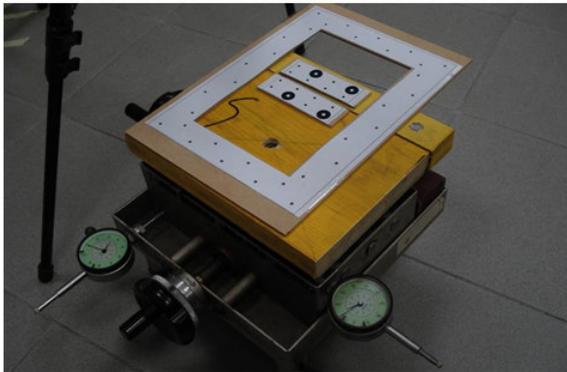
4 Applicazioni sperimentali

Delle varie prove condotte per verificare la precisione del metodo proposto, la più significativa è quella con la slitta micrometrica bidirezionale (fig. 5). Tale strumentazione, realizzata dalla sezione Rilevamento del D.I.I.A.R. del Politecnico di Milano, viene utilizzata per controllare la verticalità di elementi strutturali con sviluppo in quota rilevante ed è costituita da una piastra mobile in un piano orizzontale attraverso due viti di regolazione micrometriche, che permettono di spostarla, e da una coppia di comparatori analogici posti lungo direzioni tra loro ortogonali in grado di rilevare l'entità del movimento con precisione dell'ordine di ± 0.01 mm.

La slitta è stata adattata per simulare l'apertura di una fessura mediante l'applicazione di una base collegata al piano scorrevole e di una base fissa, sulle quali sono stati incollati i due supporti per i target di tipo 1 e 2. La cornice dei punti di appoggio, essendo la slitta posizionata su un piano orizzontale, è stata semplicemente appoggiata per l'acquisizione dell'immagine iniziale. Successivamente è stata rimossa non essendo più necessaria per le restanti immagini.

Le prove sono state realizzate riprendendo le immagini e contemporaneamente appuntando l'entità degli spostamenti forniti dai comparatori, in modo da poter elaborare le immagini e confrontare le deformazioni misurate con valori di riferimento. Le prove sono state eseguite con la compatta Sony DSC-W30 e la Nikon D70s, sulla quale sono stati montati i due obiettivi a disposizione (Sigma 20 mm e Tamron 90 mm). L'acquisizione delle immagini è avvenuta inizialmente ponendo le camere sul treppiede fotografico, poi tenendo la camera manualmente per verificare la possibilità di operare secondo questa altra modalità. Le grandezze misurate sono quindi gli spostamenti dei supporti misurati con i comparatori e gli spostamenti dei supporti misurati per via fotogrammetrica tramite

l'algoritmo implementato. I controlli sono stati eseguiti calcolando la differenza tra i precedenti valori e analizzando statisticamente i risultati.



	<i>con treppiede</i>		<i>senza treppiede</i>	
	RMS Δx (mm)	RMS Δy (mm)	RMS Δx (mm)	RMS Δy (mm)
<i>Sony DSC-W30</i> focale = 16 mm pixel count = 2816×2112 pixel size = 5 μm	0.017	0.016	0.018	0.016
<i>Nikon D70s Sigma</i> focale = 20 mm pixel count = 3000×2008 pixel size = 7.9 μm	0.012	0.013	0.019	0.019
<i>Nikon D70s Tamron</i> focale = 90 mm pixel count = 3000×2008 pixel size = 7.9 μm	0.010	0.008	-	-

Figura 5 – La slitta micrometrica ed i risultati delle prove condotte

La media delle differenze delle misurazioni ai generici istanti di tempo t_i e t_{i+1} è risultata pressoché nulla in tutte le prove, dimostrando la presenza di un errore sistematico che per differenza viene rimosso. Come si può notare in figura 5, la precisione del metodo risulta $\pm 0.01 \div 0.02$ mm in base al tipo di camera utilizzata, pressoché pari all'accuratezza dei crepimetri meccanici.

Conclusioni

Nell'articolo è stato presentato un metodo innovativo per la misura delle deformazioni di una fessura situata su una struttura. Considerando che la camera, unitamente ad una coppia di target codificati da fissare ai lati della lesione, costituisce l'unica strumentazione necessaria e che la precisione raggiungibile è dell'ordine di $\pm 10 \div 100$ μm in base proprio alla tipologia di camera impiegata, questo metodo è senza dubbio vantaggioso se rapportato ai costi delle altre strumentazioni oggi in commercio.

Inoltre, a differenza di quanto avvenuto sinora, in tal modo è possibile analizzare le variazioni di una fessura sia lungo la direzione trasversale alla stessa che in quella longitudinale, evidenziando la presenza di eventuali rotazioni e scorrimenti. In generale è dunque possibile studiare il moto piano della lesione.

Ringraziamenti

Gli autori intendono ringraziare il personale del Laboratorio IC&T sez. Rilevamento del Politecnico di Milano ed in particolar modo l'Ing. Fabio Roncoroni che ha fornito strumentazione e supporto tecnico nella verifica sperimentale del metodo.

Bibliografia

Barazzetti L. (2006), "Sviluppo e sperimentazione di un algoritmo per la misura automatica dell'apertura di fessure con tecniche di fotogrammetria digitale". Tesi di laurea in Ingegneria Civile, indirizzo Rilevamento e Controllo, presso il Politecnico di Milano, Milano.

Barazzetti L., Scaioni M. (2007), "Automatic image-based crack deformation measurement". 8° 3D Optical Measurement, Vol. 2, p. 287-294, Zurigo.

Canny J. (1986), "A computational approach to edge detection". IEEE Trans. PAMI, 8(6), p. 679-698.

Davies E.R., (1988), "A modified Hough scheme for general circle location". Pattern Recognition Letter, 7(1), p. 37-43.