

METODI FOTOGRAMMETRICI PER LA MISURA DELLE DEFORMAZIONI NELLE PROVE SUI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Luigi BARAZZETTI, Marco SCAIONI

Politecnico di Milano, Dip.I.I.A.R., P.za Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano
luigi.barazzetti@mail.polimi.it, marco.scaioni@polimi.it

Riassunto

Durante le prove di laboratorio sui materiali da costruzione la misura delle deformazioni avviene principalmente con strumentazioni di tipo elettrico o meccanico, che forniscono informazioni con precisioni notevoli ($1\div 100\text{ }\mu\text{m}$) ma solo lungo alcune direzioni prefissate. In generale non sono quindi adatte per la valutazione del campo di deformazione dell'intero oggetto. La fotogrammetria consente invece un rilievo completo dello stato deformativo del corpo, con precisioni dello stesso ordine di grandezza delle tecniche classiche oggi utilizzate. L'uso di camere (o videocamere) sincronizzate e l'implementazione di opportuni algoritmi automatici permette l'immediata elaborazione dei dati, fornendo l'entità delle deformazioni in "quasi real-time".

Vengono di seguito proposte alcune metodologie appositamente sviluppate per alcuni casi reali, per i quali la misura delle deformazioni è avvenuta sia mediante sensori tradizionali, sia per mezzo di tecniche fotogrammetriche. In altri casi, invece, data la particolare natura dell'oggetto da rilevare, l'uso di immagini si è dimostrato essere l'unica alternativa perseguibile.

Abstract

Instruments adopted to measure deformation of construction materials during laboratory tests are generally mechanical or electrical sensors. These tools can measure displacements with a high precision ($1\div 100\text{ }\mu\text{m}$), but only along particular prefixed directions. For these reason, they do not provide information about the deformation of the whole body. Photogrammetry allows a complete survey of the deformation field of a body, with precisions similar to those achievable with classical tools. The use of synchronized cameras (or still video-cameras) and the implementation of suitable algorithms allow the automatic dataset analysis and provide the results in "quasi real-time".

In this paper some methodologies developed and tested on real cases are presented, where measurements were carried out by using classical tools and photogrammetric techniques. In some cases, the particular nature of the investigated body allowed one to analyze the deformation by using only images, so that photogrammetry was the only possible choice.

1. Introduzione

L'interpretazione del comportamento di un materiale da costruzione soggetto a carichi avviene tramite l'analisi della curva sforzi-deformazioni. Mentre lo sforzo è a priori noto, essendo indotto dalla strumentazione stessa (presse, martinetti, pompe, ...), le deformazioni devono essere misurate mediante strumenti ausiliari. Attualmente gli strumenti maggiormente impiegati per la misura degli spostamenti hanno un funzionamento elettrico-meccanico, basato sull'analisi delle differenze di tensione elettrica che risulta proporzionale allo spostamento stesso.

Durante le prove in laboratorio su una struttura vengono spesso applicati trasduttori di spostamento LVDT (*linear variable differential transformer*), composti da un corpo cilindrico contenente un trasformatore differenziale costituito da tre avvolgimenti (uno primario e due secondari).

All'interno del cilindro un nucleo ad elevata permeabilità magnetica può muoversi facendo variare la tensione indotta dall'avvolgimento primario sui secondari, generando così un segnale proporzionale alla posizione del nucleo. Un'altra tipologia di strumentazione molto impiegata sono gli *strain gauges* (o estensimetri), composti da una resistenza elettrica inglobata in un materiale plastico, che deve essere incollata sulla superficie del corpo di cui si intende misurare la deformazione.

Entrambe le apparecchiature richiedono il collegamento con centraline elettriche e forniscono misure estremamente accurate (sino ad una incertezza di $\pm 1 \mu\text{m}$), ma avvengono solo nelle particolari posizioni dove viene posto il sensore che, in molti casi (soprattutto gli *strain gauges*), viene perduto al termine della prova.

L'uso di tecniche fotogrammetriche per la misura delle deformazioni permette invece l'analisi completa di tutto il corpo, mediante l'analisi di immagini acquisite con camere (o videocamere) sincronizzate. La creazione di appositi algoritmi consente anche all'utente non specializzato l'utilizzo di tali tecniche.

Molte pubblicazioni in letteratura (Roncella *et al.*, 2004; Maas & Hampel, 2006; Whiteman *et al.*, 2002) dimostrano come la fotogrammetria possa costituire una valida alternativa alle classiche strumentazioni oggi impiegate. Nel presente articolo vengono descritte due applicazioni che hanno richiesto lo sviluppo di un modulo apposito per la misura delle deformazioni, e una prova nella quale la misura è avvenuta per mezzo sia di metodi fotogrammetrici che tramite strumentazione classica.

2. La misura di campi di deformazione bidimensionali

L'analisi degli spostamenti di punti appartenenti a superfici piane è frequente nelle prove di laboratorio su materiali da costruzione. Un tipico esempio sono le prove a flessione su travi, dove gli sforzi vengono generalmente imposti tramite martinetti idraulici.

La misura degli spostamenti avviene con *strain gauges* o LVDT che, seppur siano in grado di evidenziare spostamenti con elevata risoluzione, forniscono misure solo di tipo puntuale e in poche zone di interesse.

Il modulo sviluppato, basato su tecniche fotogrammetriche digitali, permette l'analisi dell'intero campo di deformazione della trave mediante l'applicazione di target a basso costo, essendo composti da un pallino nero con sfondo bianco stampato su supporto cartaceo. L'economicità e la semplicità di applicazione sulla trave (a differenza dei collegamenti elettrici di cui necessitano le strumentazioni classiche) permettono la realizzazione di una maglia di target molto fitta e tale da poter ben rappresentare il comportamento dell'intera superficie della trave (Fig. 1).

Dinanzi alla trave viene posta una camera (o videocamera qualora sia necessaria una elevata frequenza di acquisizione) che deve essere mantenuta stabile per l'intera durata della prova, in modo tale che i parametri di orientamento risultino costanti per tutte le immagini della sequenza. Le immagini vengono poi solitamente acquisite ad intervalli di tempo regolari mediante l'intervento di un operatore, oppure in modalità automatica. Molte camere digitali disponibili sul mercato possono essere programmate per l'acquisizione automatica ad intervalli di tempo prestabiliti e con una frequenza elevata (anche 5 immagini per secondo). La singola immagine viene poi inviata ad un elaboratore elettronico tramite un collegamento via cavo o wireless, in modo da non occupare la scheda di memoria della camera e permettendo l'acquisizione di un numero di immagini pressoché illimitato.

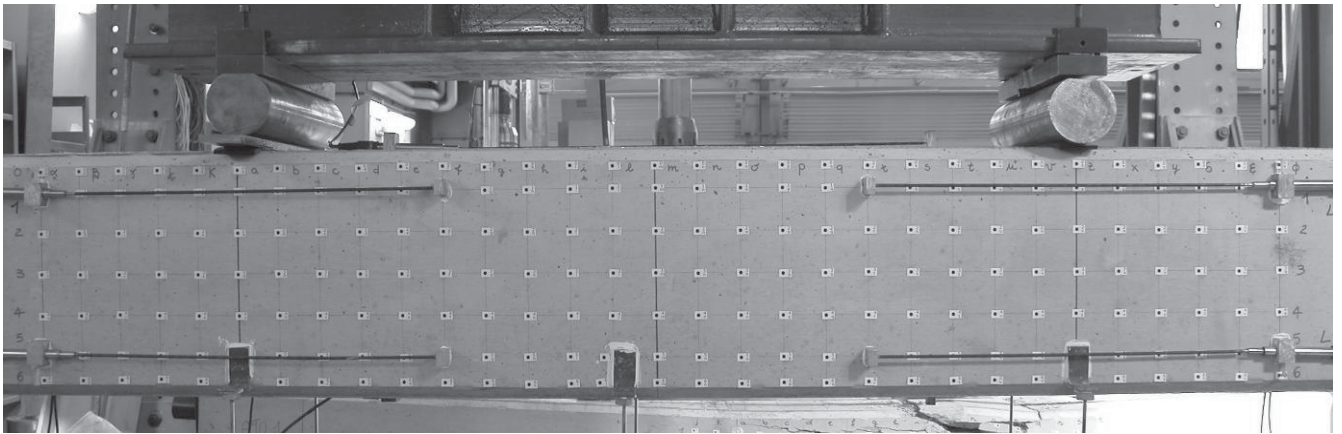


Figura 1 - La maglia di target sulla trave (Lab. GIMED - D.I.S., Politecnico di Milano)

Il metodo proposto permette la determinazione delle coordinate dei target di ogni immagine della sequenza mediante la stima di una trasformazione omografica. I parametri di input dell'algoritmo implementato sono:

- la sequenza di immagini;
- le coordinate di almeno quattro punti doppi, ovvero noti sia nel sistema di riferimento dell'oggetto che in quello immagine, per la stima dei parametri dell'omografia (poi mantenuti costanti durante la prova).

L'algoritmo esegue il raddrizzamento fotografico di ogni immagine della sequenza e provvede alla ricerca dei centri dei target sulle immagini raddrizzate mediante *Least Squares Template Matching*. L'algoritmo provvede dunque alla registrazione dei risultati, fornendo il campo di deformazione piano della superficie della trave, con una precisione dell'ordine di $1/20$ pixel proiettato sull'oggetto (nel caso considerato 0.03 mm). Oltre ad un output di tipo puramente numerico, l'algoritmo permette la ricostruzione visiva degli spostamenti mediante il loro tracciamento sulle immagini raddrizzate e la loro unione in un video (Fig. 2).

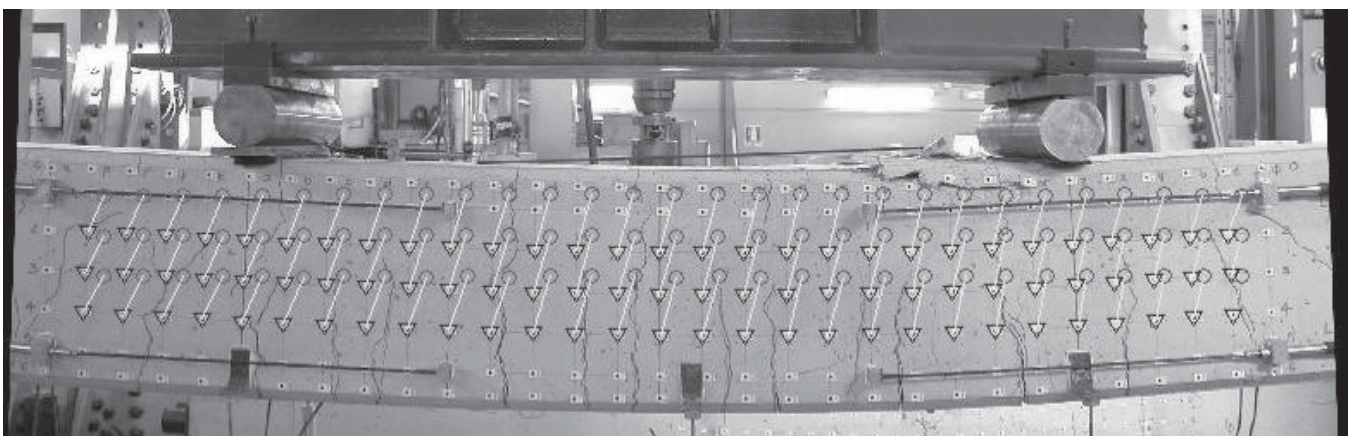


Figura 2 – Un frame del video riportante gli spostamenti dei target. Il cerchio indica la posizione iniziale del target, il triangolo la posizione per l'immagine considerata

Questa applicazione rappresenta un esempio dove la fotogrammetria consente di ottenere informazioni sull'intero campo deformativo della trave in modo assai più esteso rispetto ai sensori tradizionali ed a parità di precisioni ottenibili.

3. Misura dell'apertura di fessure su provini fluidi

E' noto che i materiali a base cementizia sono caratterizzati da un comportamento fragile e da una bassa resistenza a trazione. Negli ultimi anni, per limitare la propagazione di fessure all'interno di tali conglomerati, sono state introdotte fibre di acciaio o di altro materiale nella matrice cementizia, formando il cosiddetto *calcestruzzo fibro-rinforzato* (FRC-*Fiber Reinforced Concrete*, Cominoli *et al.*, 2006). E' facilmente ipotizzabile che tali materiali troveranno sempre una maggiore diffusione nei prossimi anni.

Presso il Lab. IC&T-Strutture del Polo Regionale di Lecco del Politecnico di Milano sono state eseguite alcune prove su campioni di FRC, il cui scopo è stato il controllo del grado di fessurazione dal momento del getto dei provini sino alla fase di presa.

Le principali problematiche riscontrate nella misura delle fessure sui campioni hanno riguardato:

- l'impossibilità di applicare alcun tipo di strumentazione (estensimetri, crepemetri,...) sul campione, data la natura fluida dello stesso;
- la necessità di ottenere non solo misure lungo direzioni prefissate (che sarebbero state ottenute nel caso di una possibile applicazione degli estensimetri) ma un'analisi completa dell'intera area fessurata.

A tal fine è stata realizzata un'opportuna strumentazione composta da un braccio meccanico dotato di un dispositivo di posizionamento automatico a cui è stata fissata una camera con una risoluzione di 2048×1536 pixel e dotata di un tele-obiettivo avente focale 200 mm (Fig. 3-A).

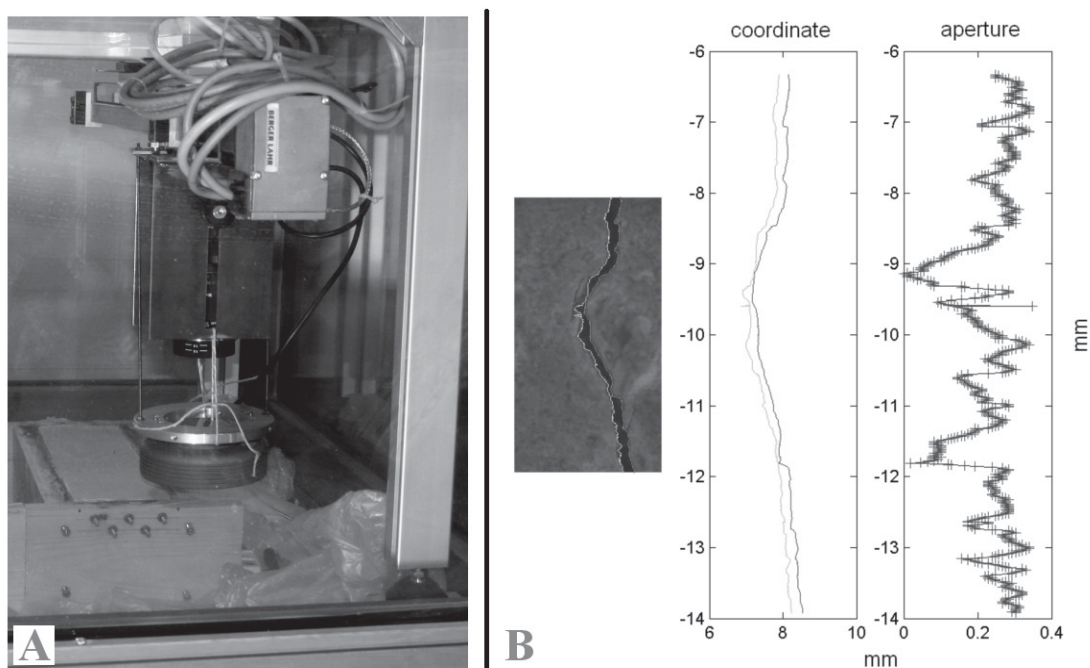


Figura 3 – A: La strumentazione per la l'analisi delle fessure su provini fluidi
B: L'output grafico dell'algoritmo di filtraggio

La camera è stata configurata in modo tale da acquisire immagini dei provini ad intervalli di tempo prestabiliti, ricoprendo ad ogni passaggio tutta la superficie del campione, non potendo prevedere dove potrebbe presentarsi una fessura.

Per eseguire la misura dell'ampiezza delle fessure formatesi è stato utilizzato l'algoritmo I.M.C.A. (*IMage Crack Aperture*), evoluzione di quello presentato in Barazzetti & Scaioni (2007). Tale algoritmo è in grado di individuare una fessura su una immagine digitale e contemporaneamente stimarne l'apertura nel sistema di riferimento legato all'oggetto. Inizialmente progettato per il

controllo di fessurazioni su strutture, I.M.C.A. è stato opportunamente adattato per l'utilizzo congiunto con la strumentazione precedentemente descritta. Il funzionamento dell'algoritmo è tale da permettere il suo utilizzo anche a personale senza particolari conoscenze di fotogrammetria. Individuata mediante una semplice selezione la zona di interesse sull'immagine, l'algoritmo ne esegue un filtraggio determinando le coordinate dei lati della fessura e fornendo l'apertura, con una risoluzione geometrica dell'ordine di 1 pixel (Fig. 3-B).

L'accuratezza dell'algoritmo è risultata di $\pm 9 \mu\text{m}$ per misure di tipo relativo, ovvero per le variazioni di apertura, permettendo anche la misura di fessure non visibili ad occhio nudo. Inoltre tale algoritmo è anche in grado di valutare le variazioni di superficie della lesione.

4. Studio delle deformazioni di un oggetto 3D

La procedura per lo studio di spostamenti tridimensionali qui presentata è basata sull'uso di 2 camere digitali sincronizzate. La misura degli spostamenti avviene mediante target circolari (come nel caso bidimensionale descritto al par. 1), che devono essere applicati in zone dove si intende rilevare lo spostamento. E' inoltre opportuno applicare dei target in posizioni tali da ricoprire quanto più possibile l'immagine per permettere un miglior orientamento della stessa.

Tale procedura è stata applicata per la misura degli spostamenti e delle rotazioni di un provino di sabbia cementata contenuta in un cilindro metallico, sulla quale è stato disposto un disco di acciaio per simulare il comportamento di una fondazione superficiale. La prova è stata eseguita in collaborazione con il Lab. di Geotecnica del D.I.S. del Politecnico di Milano. La strumentazione utilizzata per indurre il carico è una pressa dotata di un dispositivo di controllo elettronico del movimento verticale (Fig. 4). Il carico è stato applicato in modo eccentrico provocando non solo spostamenti verticali ma anche rotazioni del provino.

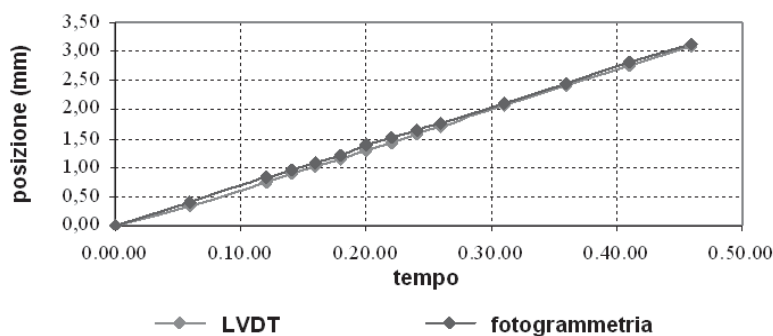
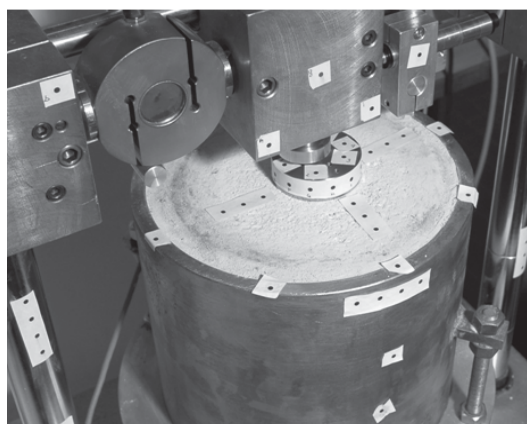


Figura 4 – La pressa di carico e il confronto LVDT - fotogrammetria

La misura degli spostamenti è stata condotta sia tramite strumentazione classica (in questo caso LVDT) sia per mezzo di tecniche fotogrammetriche.

L'utilizzo di camere sincronizzate e fissate in posizione stabile per l'intera durata della prova consente di determinare i parametri di orientamento all'epoca iniziale e quindi mantenerli costanti per tutte quelle successive. Le coordinate oggetto dei punti ad una generica epoca t_i sono pertanto determinabili mediante le equazioni di collinearità per mezzo delle corrispondenti coordinate immagine misurate di volta in volta, che rappresentano l'unica variabile.

Lo spostamento verticale indotto dalla pressa calcolato per mezzo delle immagini è stato poi confrontato con le misure del trasduttore lineare assunto come riferimento, data la notevole accuratezza dello stesso. Le differenze riscontrate tra i due metodi sono dell'ordine di pochi centesimi di millimetro (media nulla e s.q.m. $\pm 0.02 \text{ mm}$), a fronte di uno spostamento complessivo superiore a 3 mm (Fig. 4). Pertanto, è possibile affermare che la fotogrammetria può costituire una

valida alternativa alle strumentazioni classiche anche per la misura di spostamenti tridimensionali. Inoltre, mediante il metodo descritto è stato possibile misurare anche le rotazioni del provino, fornendo quindi ulteriori informazioni rispetto a quelle tradizionalmente ottenibili.

5. Conclusioni

L'utilizzo della fotogrammetria digitale per l'analisi delle deformazioni durante le prove di laboratorio su materiali da costruzione rappresenta una valida alternativa alle classiche strumentazioni oggi utilizzate. In ogni caso, per ottenere risultati in modalità automatica o almeno semi-automatica, è necessario ricorrere alla implementazione di appositi algoritmi che consentano anche a personale non specializzato l'utilizzo di tali tecniche. L'uso di software commerciali (di semplice utilizzo e costo limitato) permette anche all'utente non qualificato la realizzazione del rilievo, ma in tal caso viene generalmente persa l'automazione della procedura, essendo tali software non specificamente progettati per misure di questo tipo. Inoltre, tali software non possono essere usati in alcune circostanze, quali quella descritta nel paragrafo 2.

Considerando inoltre che spesso si opera con sequenze di immagini e pertanto con operazioni ripetute, l'implementazione di moduli automatici è certamente la scelta più indicata.

Riferimenti bibliografici

- Barazzetti, L., Scaioni, M. (2007) – *Automatic image-based crack deformation measurement*. In: A. Grün, H. Kahmen. (ed.s) *Optical 3-D Measurement Techniques VIII*, Zürich, Switzerland, Vol. 2: 287-294.
- Cominoli, L., Failla, C., Plizzari, G.A. (2006) – *Fibre ibride per applicazioni strutturali del calcestruzzo fibrorinforzato*. XVIII Convegno Nazionale IGF, Cetraro
- Roncella, R., Scaioni, M., Forlani, G. (2004) – *Application of Digital Photogrammetry in Geotechnics*, IAPRSSIS, Vol. 35, Part B5, Istanbul, Turkey: 93-98.
- Maas, H.G., Hampel, U. (2006) – *Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring*. *PE&RS*, Vol. 72(1): 39-45.
- Whiteman, T., Lichti, D., Chandler, I. (2002) – *Measurement of deflections in concrete beams by close range photogrammetry*. *IAPRS*, Vol. 34, Part 4.