

AUTOMAZIONE IN FOTOMECCANICA E SUA APPLICAZIONE ALLA MECCANICA DEI MATERIALI: RASSEGNA DELLE ATTIVITÀ SVOLTE PRESSO L'UNIVERSITÀ DI CAGLIARI

F. Ginesu, F. Bertolino, R. Ambu
DIMECA – Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Cagliari

SOMMARIO

Questa memoria descrive l'attività di ricerca svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari (DIMECA) nel campo dell'elaborazione automatica delle immagini applicata ai metodi ottici di analisi sperimentale delle tensioni nell'arco degli ultimi dieci anni.

ABSTRACT

This paper presents a review of the research carried out during the last ten years at the Department of Mechanical Engineering of the University of Cagliari in the field of image processing applied to the optical methods of experimental stress analysis.

INTRODUZIONE

Questa memoria descrive l'attività di ricerca svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari (DIMECA) nel campo dell'elaborazione automatica delle immagini applicata ai metodi ottici di analisi sperimentale delle tensioni nell'arco degli ultimi dieci anni (dal 1989 al 1998). L'attività principale è stata indirizzata verso i metodi generali di analisi delle frange e la loro applicazione a problemi di verifica strutturale e caratterizzazione dei materiali; non sono tuttavia mancate le applicazioni delle tecniche di acquisizione ed elaborazione automatica delle immagini a specifici metodi di analisi sperimentale. Più precisamente l'attività è stata indirizzata verso i metodi e le applicazioni di seguito indicati:

- 1) metodi generali di analisi delle frange e applicazioni alla meccanica dei materiali e alla misura della rugosità [1÷15, 21, 22, 29, 30, T1÷T3, T5÷T7, T10, T13, T14];
 - 2) tomografia computerizzata [16÷20, 23, 26], triangolazione attiva [24, 25, 28] e misura della forma di componenti meccanici [T4, T8, T9, T11, T12, D1];
 - 3) correlazione digitale di immagini [27, D2].
- Nel seguito si riporta una descrizione sintetica dei metodi e delle applicazioni sviluppati.

I METODI GENERALI DI ANALISI DELLE FRANGE

Tra il 1988 ed il 1994 l'unità operativa del DIMECA è stata fortemente impegnata nell'automazione di tecniche ottiche sviluppate negli anni immediatamente precedenti ed in particolare l'interferometria moirè e olografica [G1÷G3]. Il banco olografico è stato affiancato da un Personal Computer che gestisce le diverse fasi di acquisizione ed elaborazione del segnale. Le modalità di acquisizione dipendono dal metodo sperimentale prescelto, ma spesso il segnale in uscita è costituito da una serie di immagini di frange che possono essere trattate in modo simile, indipendentemente dalla tecnica sperimentale adottata. Per la fase di lettura, analisi e restituzione del segnale è stato sviluppato, nel corso di alcuni anni, un codice di calcolo modulare che ha preso il nome di DIP (Digital Image Processing). La prima versione è stata sviluppata da uno degli autori al Politecnico di Losanna nel 1990 su una stazione Silicon Graphics 4D35. Essa disponeva di alcuni moduli per il trattamento di immagini (quali i filtri lineari, non lineari e morfologici, il sogliaggio, la modifica della LUT, l'estrazione dei contorni, etc.) [G4], un modulo specializzato per il riconoscimento di quadri di frange ("tracing") e un modulo per la rappresentazione dei risultati in forme diverse (isocolori, shading, wire frame, etc) [5÷9]. La seconda versione del DIP è del 1991 ed è stata sviluppata nel DIMECA su una stazione grafica Apollo 3550: essa disponeva di un secondo modulo specializzato per l'analisi dei quadri di frange che si basava sulla FFT (spatial phase shifting) [10÷14]. Nel 1993 il codice è stato trasferito su una stazione Silicon Graphics INDIGO R4000 e si è arricchito di una interfaccia grafica che ne facilita considerevolmente l'uso. Questa versione consente l'applicazione delle tecniche di phase shifting a N immagini, permette l'uso di alcuni algoritmi di unwrapping della fase e dispone di diverse tecniche di rappresentazione dei risultati [T1, 15]. Le procedure matematiche che sono state implementate nel DIP e che nel seguito analizzeremo sono le seguenti [G5]: il tracciamento semiautomatico delle frange (tracing), il metodo della trasformata di Fourier (FTM) ed il Phase Shifting (PS).

Tracciamento semiautomatico delle frange (tracing)

L'approccio più naturale nell'analisi delle frange consiste nella loro individuazione e tracciamento. Questa tecnica è completamente generale e consente un controllo immediato dei risultati. Per ogni frangia l'utente deve individuare un punto di partenza, la direzione di ricerca e deve assegnare l'ordine corrispondente; il programma esamina quindi per una certa profondità le intensità luminose dei pixel circostanti e sceglie il percorso più luminoso. In presenza di zone "rumorose" la scelta del percorso può essere problematica per cui il programma richiede una conferma da parte dell'utente. Per selezionare i punti appartenenti alle frange scure è sufficiente invertire l'immagine agendo sulla look-up table. La profondità di ricerca deve essere scelta dall'utente in base alla larghezza delle frange per evitare di cadere nelle frange contigue. Per facilitare il controllo dell'utente sul programma è stata progettata un'interfaccia grafica. Uno dei problemi principali con questa tecnica è l'assegnazione manuale dell'ordine di frangia, che talvolta richiede la conoscenza a priori del fenomeno in esame. Per superare questo problema è possibile introdurre otticamente una portante di frequenza opportuna che produca un sistema di frange di tipo monotono. Una volta estratti nel piano i punti più significativi delle frange, si deve costruire la superficie 3D che passa attraverso questi punti e che rappresenta la funzione codificata dal metodo ottico utilizzato [5÷9].

Il metodo della Trasformata di Fourier (FTM).

Con la FTM è possibile, con una sola immagine ed in modo automatico, risalire

all'informazione codificata nel quadro di frange che in forma matematica si può esprimere come segue [G5]:

$$I(x,y) = a(x,y) + \gamma(x,y) \cos[\phi(x,y) + 2\pi f_0 x] \quad (1)$$

in cui $I(x,y)$, $a(x,y)$, $\gamma(x,y)$ e $\phi(x,y)$ indicano rispettivamente l'intensità luminosa, il valore medio del segnale, la sua modulazione e la fase nel punto (x,y) , mentre f_0 è la frequenza della portante. La FFT nella direzione di sensibilità (in questo caso x) si può esprimere come segue:

$$G(f,y) = A(f,y) + C(f - f_0, y) + C^*(f - f_0, y) \quad (2)$$

In cui $C^*(f - f_0, y)$ indica il complesso coniugato. Poiché si ammette che le variazioni spaziali di $a(x,y)$, $\gamma(x,y)$ e $\phi(x,y)$ siano piccole rispetto ad f_0 , la funzione $G(f,y)$ sarà una funzione trimodale con i picchi localizzati in $-f_0$, nell'origine e in f_0 . La funzione $C(f - f_0, y)$ può essere isolata usando un filtro centrato in f_0 e la portante viene eliminata spostando $C(f - f_0, y)$ di f_0 verso l'origine per ottenere $C(f,y)$. La trasformata inversa di $C(f,y)$ rispetto ad f conduce a:

$$c(x,y) = 0.5 \gamma(x,y) \exp[i \phi(x,y)] \quad (3)$$

A partire da questa espressione è possibile calcolare la fase $\text{mod}(2\pi)$:

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \{ \text{Re}[c(x,y)] / \text{Im}[c(x,y)] \} \quad (4)$$

in cui $\text{Re}[c(x,y)]$ indica la parte reale ed $\text{Im}[c(x,y)]$ la parte immaginaria di $c(x,y)$.

Perché questa tecnica dia buoni risultati è necessario che la portante sia elevata (ma non tanto da creare problemi di aliasing) e possa essere ben isolata rispetto al segnale da misurare. Basandosi su una DFT (Discrete Fourier Transform), possibili fonti d'errore sono la difficoltà di localizzare in modo esatto la portante, il fatto che l'immagine abbia un dominio limitato e l'eventuale presenza di zone prive d'informazione. Per la scelta del campo di frequenze da traslare si applica la DFT all'immagine, se ne calcola lo spettro in scala logaritmica e si seleziona una soglia al disotto della quale i valori dello spettro vengono posti uguali a zero. I valori al disopra della soglia vengono normalizzati all'unità e costituiscono il filtro da moltiplicare per il campo di frequenze. Un'alternativa valida a questo filtro è quello classico di Wiener che richiede però tempi di calcolo superiori. La FTM è stato implementato nel DIP in modo da garantire il totale controllo dell'utente che può selezionare, grazie all'interfaccia grafica, la portante, il campo di frequenze ed i filtri che ritiene opportuni [10÷14].

Phase Shifting (PS).

Il PS si basa sulla registrazione di alcuni quadri di frange prodotti dalla interferenza di due fasci laser introducendo in uno di essi uno spostamento uniforme della fase. Nel nostro caso la modulazione discreta della fase è stata ottenuta muovendo uno specchietto guidato da un piezoelettrico ceramico nanometrico [T1, 15, 17, 18, 21, 25]. Una difficoltà nell'uso dei PZT è la loro intrinseca non linearità ed isteresi. Prima di procedere è quindi necessario tarare il sistema per conoscere quali variazioni di voltaggio applicare per produrre gli spostamenti desiderati. Recentemente [T13] il PZT è stato sostituito da una combinazione di lamine quarto d'onda che consentono di estendere la tecnica di phase shifting agli interferometri in luce bianca. L'espressione matematica del sistema di quadri di frange da registrare si può esprimere come segue:

$$I_i(x,y) = a(x,y) + \gamma(x,y) \cdot \cos[\phi(x,y) + \alpha_i] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (N \geq 3) \quad (5)$$

in cui gli α_i sono i valori di shift imposti allo specchio dal PZT. Il numero minimo di immagini da registrare è pari a 3, pari cioè al numero di incognite del sistema, a , γ , e ϕ . Nel DIP sono stati implementati alcuni tra i numerosi algoritmi proposti in letteratura [G5].

Sia nel caso della FTM che del PS, la determinazione della fase passa per il calcolo di un'arcotangente e quindi i valori di fase sono $\text{mod}(2\pi)$: per ristabilire la continuità della funzione è necessario integrare tali valori lungo un percorso da scegliere sull'immagine. Nella letteratura specializzata sono stati proposti numerosi algoritmi, alcuni dei quali sono stati implementati nel nostro sistema (scansione a spirale o lungo un grafo, automi cellulari), in modo che l'utente possa scegliere volta per volta quello più adatto all'immagine in esame. Attualmente è in corso lo studio e lo sviluppo di un nuovo capace di superare gli inconvenienti presenti in immagini particolarmente rumorose.

LE APPLICAZIONI

Grating

La tecnica del grating è stata usata per osservare il campo di deformazione sulla superficie laterale di un provino soggetto a carichi statici o a fatica [8÷10]. Essa si basa sull'osservazione con un microscopio ottico di un reticolo di fase replicato sulla superficie laterale del provino. Gli spostamenti e le deformazioni piane possono essere calcolate misurando la variazione del passo. La frequenza del reticolo è stata scelta pari a 200 linee/mm e l'algoritmo utilizzato è stato la FTM.

Interferometria olografica

L'interferometria olografica non richiede un reticolo ed ha un'alta sensibilità [G1]. Nel nostro caso è stata usata per analizzare componenti meccanici deformati fuori dal piano. In [3÷6] si è analizzato il comportamento di una flangia cieca con otto rinforzi radiali: per la ricostruzione è stata utilizzata la tecnica di tracing in quanto era disponibile una sola immagine per ogni livello di carico e non era presente la portante necessaria per l'applicazione della FTM. L'esame delle ricostruzioni ha chiaramente messo in evidenza l'effetto dei rinforzi.

E' stato quindi esaminato il paraurti anteriore di un piccolo veicolo industriale in composito a fibre corte prodotto dalla IVECO-FIAT [22]. Anche in questo caso è stata utilizzata la tecnica di tracing in quanto la parte centrale dell'immagine, priva di frange, ha sconsigliato l'uso della FTM.

Interferometria moiré

L'interferometria moiré è stata utilizzata a diversi livelli di carico. Questa tecnica, molto utile in tempo reale, è molto sensibile ai difetti microstrutturali [G3]. Sono stati esaminati alcuni provini con fibre di carbonio e matrice termoplastica PEEK aventi 16 strati con orientazione delle fibre $\pm 15^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 35^\circ$, $\pm 45^\circ$ e $\pm 55^\circ$, sequenza di orientazione delle fibre $[+\theta/-\theta]_{8s}$, ricavati da laminati piani, che presentano un foro centrale passante su tutti gli strati. Su tali campioni si sono eseguite delle misure di spostamento analizzando l'area intorno al foro. I provini sono stati caricati a trazione facendo uso di una macchina di prova idraulica resa solidale al banco olografico. I quadri di frange sono stati registrati continuamente al variare del carico e solo le configurazioni più significative sono state in seguito digitalizzate. Il PEEK è una tipica resina termoplastica che manifesta deformazioni plastiche anche con piccoli

carichi: i quadri di frange indicano chiaramente il livello di deformazione plastica. In questo caso le immagini sono state esaminate utilizzando la FTM [11÷15].

Già da diversi anni vi è una notevole attenzione allo studio delle tensioni residue [G11]. Da un punto di vista sperimentale si è impiegato il così detto "metodo del foro", realizzato facendo ricorso ad un trapano ad alta velocità dotato di una turbinetta ad aria compressa. Le deformazioni rilasciate in prossimità del foro venivano rilevate mediante apposite rosette estensimetriche, in accordo con quanto previsto dalla norma ASTM E837-94a. In alternativa è stata impiegata la tecnica della moirè interferometrica. E' stato realizzato un reticolo avente tre distinte direzioni di sensibilità: due a 90° e la terza a 45°, in modo del tutto simile alle rosette per hole drilling. Ciò ha consentito sia dei rilievi medi sui tre campi che dei rilievi a tutto campo nelle tre direzioni. Dopo aver montato i provini su una piattaforma orientabile, venivano registrate le frange nelle tre direzioni, prima e dopo la realizzazione del foro. Dal loro confronto si risaliva alle deformazioni e da queste alle tensioni residue che dapprima sono state studiate in alcune giunzioni saldate [T2] e, successivamente, in alcuni laminati in materiale composito, avente diverse direzioni di orientamento delle fibre [T3, T5, T10, 30].

Interferometria classica

Sono stati realizzati due diversi interferometri facenti uso di luce laser per la misura della rugosità superficiale. Il primo presentava la configurazione di Michelson e il secondo quella di Twyman Green; entrambi avevano un ramo con uno specchietto di riferimento montato su un dispositivo piezoelettrico, necessario per il suo spostamento nanometrico, utile al fine dell'applicazione della tecnica del phase shifting [G5].

Si sono impiegate, inoltre, due sorgenti laser per ottenere una più ampia profondità di misura del campione. Si sa, infatti, che la rugosità misurabile è proporzionale alla lunghezza d'onda della luce impiegata. Dalla composizione dei risultati ottenuti con due laser di lunghezza d'onda λ_1 e λ_2 si può ottenere una lunghezza d'onda equivalente $\lambda_{eq} = (\lambda_1 * \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2)$ adatta alle diverse esigenze di misura. Alternativamente all'uso del piezoelettrico è stato realizzato nell'interferometro un dispositivo per lo spostamento di fase geometrico. Questa tecnica consiste nel determinare su un raggio polarizzato una variazione ciclica del suo stato di polarizzazione. Questo mutamento è un fenomeno topologico ed è quindi indipendente dalla lunghezza d'onda della luce impiegata. Per la sua realizzazione deve essere utilizzata luce polarizzata. A tal fine si deve montare un set-up con un beam splitter a mantenimento di polarizzazione, diverse lamine quarto d'onda e una lamina a mezza onda. La posizione dei componenti varia in relazione al set-up specifico messo a punto [T13].

Fotoelasticità

Si è realizzato un sistema che, sfruttando gli algoritmi propri dei metodi basati sulla variazione di fase, consente il calcolo della mappa di isocline e isocromatica. Si introduce, inoltre, uno studio dello stato di sollecitazione del pezzo, implementando una tecnica di separazione delle tensioni. La procedura proposta è basata sull'acquisizione di sei immagini che vengono utilizzate a gruppi di quattro. Queste immagini vengono ottenute con particolari disposizioni della lamina quarto d'onda in uscita e dell'analizzatore del polarizzatore circolare impiegato. Dalla composizione delle immagini si arriva prima al parametro di isocline e poi a quello di isocromatica. Sono stati implementati una serie di algoritmi per la minimizzazione degli errori nella mappa di isocline poiché risultano importanti nella successiva determinazione di quella isocromatica. Il codice di calcolo è stato realizzato in Visual Basic 3.0 su piattaforma WINDOWS con una struttura moderna basata sull'uso di finestre e bottoni che ne rendono facile l'impiego [T14].

TOMOGRAFIA COMPUTERIZZATA

Per l'analisi del danneggiamento subito dai materiali compositi vengono utilizzate numerose tecniche non distruttive (radiografie, ultrasuoni, microscopia ottica) che però non consentono di localizzare i difetti all'interno del volume: questo è il motivo che consiglia lo sviluppo di metodi di controllo basati sulla tomografia computerizzata (TC) [G6, G7, D1].

Nella TC a raggi X, un sottile fascio di raggi attraversa una sezione dell'oggetto prima di essere registrata da un acquisitore. Se $f(s)$ è il coefficiente di attenuazione del materiale nel punto s , allora un raggio X che attraversa un piccolo spessore Δs subisce la perdita d'intensità relativa:

$$\Delta I/I = - f(s) \Delta s \quad (6)$$

Se in un sistema di coordinate cilindriche localizziamo il raggio proiettante con l'angolo θ_m e con la sua distanza minima dall'origine r_n e se con I_0 ed I_1 indichiamo rispettivamente l'intensità del fascio prima e dopo l'attraversamento dell'oggetto, allora possiamo scrivere:

$$p(\theta_m, r_n) = \ln(I_0 / I_1) = \int [f(s) ds] \quad (7)$$

La TC a raggi X consiste nell'acquisizione, da diverse angolazioni, delle radiografie di un oggetto e nella ricostruzione della funzione attenuazione al suo interno, strato dopo strato, attraverso l'inversione della trasformata di Radon (7). La TC può essere applicata ogni volta che si sottopone un oggetto a qualche forma di radiazione che si propaga al suo interno lungo linee rette. Viene usata con i raggi X, con i fasci di elettroni, con la luce, il calore, i raggi gamma, gli ultrasuoni, etc. La tomografia ottica usa la luce come vettore d'informazione: una sua possibile applicazione nel settore meccanico è lo studio del tensore degli sforzi in un modello fotoelastico tridimensionale. La tomografia interferometrica consente inoltre di studiare le variazioni subite da un parametro ottico all'interno di un oggetto semitrasparente.

Tomografia ottico-interferometrica

Mediante la tecnica di ricostruzione tomografica si è misurato l'indice di rifrazione all'interno di una barretta di Pyrex [17, 18]. Utilizzando l'interferometria olografica in tempo reale si è rilevata la differenza di cammino ottico fra lo spessore della barretta e un liquido, la glicerina, avente indice di rifrazione noto e molto simile al campione. Sono stati realizzati dodici interferogrammi secondo diverse angolazioni: per ognuno di essi si è calcolata la differenza di cammino ottico (grazie alla tecnica di phase shifting a 4 immagini) e quindi, per mezzo della TC, si è ricostruita la distribuzione dell'indice di rifrazione all'interno del volume.

Tomografo a raggi X di prima generazione

Un sistema a raggi X è stato opportunamente strumentato ottenendo un prototipo di microtomografo di prima generazione [20, 22, T9]. Un fascio collimato di raggi X viaggia all'interno della camera dall'alto verso il basso: sulla base è posizionato un acquisitore puntuale costituito da un cristallo di silicio che converte la radiazione trasmessa attraverso l'oggetto in un segnale elettronico adatto all'elaborazione automatica. Il campione da esaminare è disposto a sbalzo su un sistema di movimentazione. Un motore lineare passo-passo consente spostamenti unitari di 25 μm mentre la rotazione è generata da un motore il cui passo è di 0.15°. Un PC486 controlla il processo di acquisizione e consente di scegliere i passi di movimentazione ed i tempi d'integrazione. Sono state effettuate una serie di misure per caratterizzare il tomografo rispetto ad alcuni parametri come la risoluzione spaziale, il

contrasto, il rumore, etc. I dati così acquisiti sono stati inviati via Ethernet su una stazione Silicon Graphics per la ricostruzione tomografica e l'analisi dei risultati.

Tomografo a raggi X di terza generazione

L'inconveniente maggiore dei microtomografi di prima generazione è l'elevato tempo di acquisizione. Per questo motivo si è realizzato un microtomografo di terza generazione [26, T9] costituito essenzialmente da una sorgente radiogena, da un sistema di rotazione interfacciato ad un PC e da uno scintillatore a cui è accoppiata una telecamera. Il software che permette la gestione del sistema e l'elaborazione delle immagini è scritto in Labview. Lo scintillatore ha il compito di convertire i fotoni X in fotoni luce che poi andranno acquisiti dalla telecamera. Rispetto al microtomografo ad acquisizione puntuale precedentemente sviluppato, il sistema di terza generazione fornisce prestazioni decisamente superiori. Per ciò che concerne il tempo, si è passati da 4 ore per l'acquisizione dei dati necessari alla ricostruzione di una sezione, a 18 minuti per i dati necessari per la ricostruzione di tutto il volume. Per ciò che riguarda la risoluzione spaziale si è passati da 2.5 a 9 linee/mm in corrispondenza di un valore di MTF (Modulation Transfer Function) pari a 0.5. Anche da un punto di vista meccanico questo tomografo è più semplice e più affidabile di quello puntuale.

Visualizzazione dei risultati

Il processo di ricostruzione tomografica si conclude con la generazione di una matrice di dati 3D in cui ad ogni nodo è associato un valore scalare, per esempio il livello di opacità ai raggi X. La visualizzazione volumetrica è un metodo di selezione e rappresentazione delle informazioni significative, contenute all'interno di questo reticolo [G8], che può essere costituito da una mole gigantesca di dati (decine di megabytes). Un approccio classico consiste nell'individuare, all'interno del volume, le superfici aventi valore della funzione costante. L'algoritmo che è stato implementato prende il nome di *marching cubes*. Stabilita la soglia da rappresentare, si esamina il volume considerandolo come una successione ordinata di cubi ad ognuno dei quali si associa un indice, calcolato assegnando ad ogni nodo un numero, pari a zero o uno, secondo che si trovi dentro o fuori dalla superficie. Poiché esistono 256 combinazioni possibili, una look-up table associa ad ogni indice una serie di triangoli, i vertici dei quali si trovano calcolando l'intersezione della superficie da visualizzare con il mesh. L'algoritmo illustrato può essere utilizzato anche per la rappresentazione di sezioni trasversali: selezionato il piano di taglio, i nodi vengono classificati in base al semispazio di appartenenza. La rappresentazione di isosuperfici è interessante quando si desidera isolare uno o più oggetti interni al volume. Un metodo più sofisticato consiste nell'applicare al volume in esame le tecniche di ray tracing: a fronte di una mole di calcoli non indifferente, è possibile osservare l'intero volume come se esso fosse semitrasparente, una sorta di radiografia dell'oggetto. Una volta elaborata una serie di tali immagini da angoli diversi (il che può comportare alcune ore di calcolo), le si memorizza sul disco del calcolatore. Successivamente è possibile rivederle in rapida sequenza con tecniche di animazione fornendo un'idea piuttosto precisa dell'intero volume [19].

LA TRIANGOLAZIONE ATTIVA

I sistemi di misura basati sulla triangolazione di luce strutturata [G9] si stanno oggi diffondendo rapidamente in quanto ad una grande velocità in fase di acquisizione associano semplicità, costi molto limitati, precisione sufficiente in molti campi applicativi [T12]. Nel nostro laboratorio sono stati realizzati due prototipi, uno che proietta un singolo piano di luce

[T8, 24] ed un altro che proietta un sistema di frange prodotto con un interferometro di Michelson [T4, 25]. Per ciò che riguarda il primo sistema, questo è costituito da un laser He-Ne, uno specchietto messo in rapida oscillazione da un galvanometro, una CCD commerciale, un motore elettrico passo-passo che fa ruotare la piattaforma su cui poggia l'oggetto da misurare, un PC che controlla tutte le operazioni. Il fascio di luce laser incide sullo specchietto montato sul galvanometro ed illumina un profilo dell'oggetto. La CCD acquisisce tutta l'immagine ed il programma salva su disco solo le intensità che superano una soglia predefinita. A questo punto il motore elettrico ruota la piattaforma e dispone l'oggetto in modo da acquisire un nuovo profilo. Dopo una rotazione complessiva di 360° è possibile ricostruire l'intera superficie. Terminata la fase di acquisizione, il programma di ricostruzione richiama tutti i file precedentemente salvati e da essi estrae i profili dell'oggetto. Questi vengono filtrati per ottenere linee di spessore unitario che vengono poi *incollate* a formare l'oggetto misurato. Per ottenere buoni risultati è essenziale tarare il sistema di acquisizione ed in particolare conoscere le posizioni relative di CCD, proiettore e piattaforma [T11, 28]. Un'interfaccia grafica, programmata in LabView, consente la gestione delle diverse operazioni. In uscita i dati sono raccolti in un file DXF per AutoCad.

CORRELAZIONE DIGITALE D'IMMAGINI

La correlazione digitale è un metodo numerico che consente di confrontare immagini allo scopo di determinarne la differenza e viene utilizzato, tra l'altro, per il calcolo degli spostamenti nel piano [G10]. Il metodo viene applicato ad immagini digitalizzate in cui è presente una distribuzione di livelli di grigio di tipo speckle. Un'immagine del tipo suddetto viene registrata da un computer in una matrice di numeri a ciascuno dei quali è associato convenzionalmente un livello di grigio. La correlazione di immagini digitali è quindi una operazione di confronto di insiemi di numeri. Supponendo di avere registrato le distribuzioni d'intensità luminosa relativamente alle configurazioni indeformata e deformata dell'oggetto, prima che questi due insiemi possano essere confrontati, occorre ipotizzare una relazione matematica tra la deformazione puntuale dell'oggetto ed il cambiamento tra le due distribuzioni di livelli di grigio. In particolare si suppone che sottoinsiemi di piccole dimensioni dell'immagine indeformata siano legati a sottoinsiemi nell'immagine deformata mediante una relazione biunivoca [G9]. E' stata implementata una tecnica di correlazione digitale per l'analisi delle deformazioni subite da superfici di materiali compositi [27, D2]. E' stata anzitutto svolta un'indagine preliminare con immagini generate numericamente mediante le quali è stato possibile verificare la precisione dell'algoritmo. E' stata quindi verificata l'applicabilità della tecnica di correlazione digitale all'analisi delle sezioni di provini in composito: i risultati sono stati in accordo con quelli riportati nella letteratura.

RINGRAZIAMENTI

La rassegna riportata in questa memoria è stata svolta nell'ambito del programma di ricerca scientifica di rilevante interesse nazionale (Murst 1998) "Automazione in fotomeccanica e sua applicazione alla meccanica dei materiali". All'attività di ricerca descritta in questa nota hanno collaborato, in aggiunta agli autori della memoria (in ordine alfabetico): I. Artizzu, N. Barillari, J. Chen, A. Cuboni, A. DiTullio, A. Gabba, G.L. Gatto, A. Gessa, M. Lera, E. M. Luchi, M. Macis, S. Orrù, D. Partenza, M. Perra, R. Pinna, M. Porcedda, P. Randaccio, R. Rossi, V. Savona, F. Stancampiano, Sun Wei Ming.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia cronologica dei lavori condotti presso il DIMECA

Memorie

- [1] F.Ginesu: "Holographic Interferometric Analysis by image processing System" Int. Conference on Advanced Experimental Mechanics Tianjin (China) May 1988;
- [2] F.Ginesu, R.Rossi: "Elaborazione automatica di sistemi di frange olografiche e moiré" XVI_ Convegno Nazionale AIAS - L'Aquila, Settembre 1988
- [3] F.Ginesu, R.Rossi: "Structural Analysis of Reinforced Discs by Numerical Processing of Fringe Patterns" Spring Conference on Experimental Mechanics, Boston 1989;
- [4] F.Ginesu, Sun Wei Ming, F.Bertolino - "The use of optical techniques for analysing composite materials", Thermoplastic Composites Technology Seminar, Cagliari, 1990.
- [5] F. Ginesu, F. Bertolino: " Numerical Analysis of Fringe Patterns for Structural Engineering Problems". Proc. Int. Symp. Opt. Appl. Science and Eng., Tech. Conf. 1553, Laser Interferometry IV: Computer-Aided Interferometry, San Diego (CA), pp.313-324, July 1991.
- [6] F.Bertolino, F.Ginesu - "Analisi Numerica e Restituzione 3D di Sistemi di Frange Interferometriche", 7° Convegno ADM, Trento, 1991.
- [7] F. Bertolino, F. Ginesu, W. Sun "Optical techniques and automatic fringe analysis for composite materials".Proc.International Seminar "Experimental Techniques and Design in Composite Materials", Cagliari, 22-23 Ottobre 1992, pp.55-66.
- [8] F. Bertolino, F. Ginesu, P. Priolo: "Visualization of strain fields in angle-ply graphite-peek specimens during loading". Eight Annual Meeting of The Polymer Processing Society, New Delhi (India), March 1992.
- [9] F. Ginesu, F. Bertolino, M. W. Sun "Application of an automatic grating technique for the structural analysis of composite materials". SEM VII Int. Congress on Exp. Mech., Las Vegas June 1992.
- [10] F. Bertolino, F. Ginesu "Semi-automatic approach of grating techniques", Applied Optics and Opto-electronics Conference, Leeds (U.K.), 14-17 September 1992, Optics and Lasers in Engineering 19, pp. 313-323, (1993) .
- [11] F. Bertolino, F. Ginesu, I. Crivelli-Visconti, J. Chen. "Analisi automatica di deformazioni di laminati in materiale composito", XXII° Convegno AIAS, Forlì, 1993.
- [12] F. Bertolino, F. Ginesu, J. Chen "Experimental characterization and analysis of angle-ply composite laminates". 1994 SEM Spring Conference. Baltimore, June 1994.
- [13] F. Bertolino, F. Ginesu, J. Chen "Analysis of angle-ply composite laminates". BSSM/SEM International Conference. Edinburgh, Aug.-Sept. 1994.
- [14] F. Bertolino, F. Ginesu "Fringe Analysis Procedures for the Structural Characterization of Composite Materials", Experimental Techniques and Design in Composite Materials, 2nd International Seminar, Sept. 1994, pp.1-13, Ed. M.S. Found, Sheffield (1995).
- [15] F.Bertolino, F.Ginesu: "Tecniche ottiche ed analisi automatica delle frange", Atti della Giornata di Studio MIS-MAC III: Metodi di Sperimentazione nelle Macchine, pp.101-108, Cagliari, 7 ottobre 1994.
- [16] V.Savona, F.Bertolino: "Utilizzo di algoritmi algebrici per l'applicazione della tomografia ai controlli non distruttivi", Atti della Giornata di Studio MIS-MAC III: Metodi di Sperimentazione nelle Macchine, pp.89-99, Cagliari, 7 ottobre 1994.
- [17] F.Bertolino, F.Ginesu, V.Savona: "Applicazione della tecnica tomografica nella sperimentazione meccanica: elaborazione e rappresentazione 3D dei risultati", IX Convegno ADM, pp.407-417, Caserta-Aversa, 27,28,29 settembre1995.

- [18] F. Bertolino, F. Ginesu, V. Savona: "Messa a punto di una tecnica di tomografia interferometrica", XXIV Convegno AIAS, settembre 1995.
- [19] F. Bertolino, G. Gatto, "Tecniche per la visualizzazione di immagini tomografiche", Seminario ADM Italo-Spagnolo, pp.47-50, Napoli, 25-27 Luglio 1996.
- [20] F. Bertolino, G. Gatto, F. Ginesu, P. Randaccio, "A first generation x-ray microtomography system for non-destructive materials testing", XXV Convegno AIAS, Gallipoli, 4-7 September 1996.
- [21] A. Di Tullio, P. Jacquot, F. Ginesu, F. Bertolino, "Speckle interferometry applied to 3D mechanical characterisation of composite samples", XXV Conv. AIAS, Gallipoli, 1996.
- [22] R. Ambu, F. Bertolino, F. Ginesu, "Experimental Analysis of a SMC Truck Bumper", Third Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Material, 30-31 October 1996, Cagliari, Ed. P. Priolo, Key Engineering Materials Vol.144, pp.145-154, 1998.
- [23] F. Bertolino, G. Gatto, F. Ginesu, P. Randaccio, "Characterisation of an X-ray System with GaAs Detector for Composite Material Analysis", Third Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Material, 30-31 October 1996, Cagliari, Ed. P. Priolo, Key Engineering Materials Vol.144, pp.261-270, 1998.
- [24] F. Bertolino, F. Ginesu, A. Gabba, "Automatic Surface Reconstruction of Simple Mechanical Objects by Triangulation of Structured Light", Proc. X ADM Int. Conf., pp.367-375, Firenze, 1997.
- [25] F. Bertolino, F. Ginesu, A. Cuboni, "Automatic Surface Reconstruction of Simple Mechanical Objects Using Grid Projection and Phase Shifting", Proc. X ADM Int. Conf., pp.377-385, Firenze, 1997.
- [26] F. Bertolino, G. Gatto, F. Ginesu, "Caratterizzazione di un tomografo di terza generazione", Proc. XXVI AIAS Conf., pp. 135-140, Catania, 1997.
- [27] R. Ambu, F. Bertolino, F. Ginesu, "Applicazione di tecniche di correlazione digitale di immagini all'analisi di materiali compositi", Proc. XXVI AIAS Conf., pp. 119-126, Catania, 1997.
- [28] F. Bertolino, S. Mura, M. Macis, "Taratura di un sistema di misura 3D basato sulla triangolazione di luce strutturata per la progettazione ed il controllo di pezzi meccanici", Atti del II Seminario Italo-Spagnolo su Progettazione e fattibilità dei prodotti industriali, Marina di Equa (Napoli), 24-26 giugno 1998, pp.37-44, (ISBN 88-900081-3-X), 1999.
- [29] R. Ambu, F. Bertolino, J. Chen, F. Ginesu, "Recenti progressi nella tecnica del moiré olografico", Proc. XXVII AIAS Conf., pp. 63-70, Perugia, 1998.
- [30] R. Ambu, F. Ginesu "Improvements of full field procedure with three directional gratings for residual stress analysis". 15th Symposium "Danubia-Adria" on Experimental Methods in Solid Mechanics. Bertinoro, 1998.

Tesi di Laurea e di Dottorato di Ricerca

- [T1] R. Ambu: "Applicazione di tecniche ottiche assistite da computer nell'analisi di elementi strutturali", Rel. F. Ginesu, F. Bertolino., Aa: 1994/95.
- [T2] N. Barillari: "Applicazione di tecniche semidistruttive nell'analisi di tensioni residue in giunti saldati", Rel. F. Ginesu, F. Bertolino, Aa: 1994-95.
- [T3] A. Gessa: "Analisi delle tensioni residue nei laminati in composito", Rel. F. Ginesu, P. Priolo, Aa: 1995/96.
- [T4] A. Cuboni: "Messa a punto di uno scanner tridimensionale basato sulla proiezione di luce strutturata", Rel. F. Bertolino, F. Ginesu, Aa: 1995/96.

- [T5] M. Perra: "Applicazione del metodo dell'hole drilling ai materiali compositi", Rel. F. Ginesu, Aa: 1996/97.
- [T6] D. Partenza: "Messa a punto di un prototipo per il rilievo delle caratteristiche reologiche nel settore lattiero-caseario", Rel. F. Ginesu, J. Kozlowski, Aa: 1996/97.
- [T7] S. Orrù: "Misure di rugosità superficiale con metodi interferometrici automatizzati", Rel. F. Ginesu, Aa: 1996/97.
- [T8] A. Gabba: "Realizzazione di un digitalizzatore per superfici tridimensionali mediante triangolazione di luce laser strutturata", Rel. F. Bertolino, F. Ginesu, Aa: 1996/97.
- [T9] M. Porcedda, F. Stancampiano: "Realizzazione e caratterizzazione di due prototipi di microtomografo", Rel. F. Bertolino, F. Ginesu, Aa: 1996/97.
- [T10] I. Artizzu: "Rilievo delle tensioni residue mediante reticoli di diffrazione", Rel. F. Ginesu, Aa: 1996/97.
- [T11] M. Macis: "Messa a punto di uno scanner tridimensionale mediante un metodo di taratura", Rel. F. Bertolino, Aa: 1996/97.
- [T12] G. L. M. Demuru: "Applicazione della tecnica di triangolazione laser alla verifica strutturale", Rel. F. Ginesu, S. Mura, Aa: 1997/98.
- [T13] R. Pinna: "Messa a punto di sistemi interferometrici per la verifica di superfici", Rel. F. Ginesu, Aa: 1997/98.
- [T14] E. M. Luchi: "Realizzazione e messa a punto di un codice di calcolo per l'analisi fotoelastica assistita", Rel. F. Bertolino, F. Ginesu, Aa: 1997/98.
- [D1] V. Savona: "Applicazioni della tomografia computerizzata al controllo non distruttivo di materiali strutturali", Tesi di Dottorato di Ricerca, DIMECA, 1996.
- [D2] R. Ambu: "Studio di tecniche di correlazione digitale per la verifica di elementi in materiale composito", Tesi di Dottorato di Ricerca, DIMECA, 1999.

RIFERIMENTI GENERALI

- [G1] C.M. Vest, *Holographic Interferometry*, J. Wiley & Sons, New York, (1979).
- [G2] *Handbook of Experimental Mechanics*, A.S. Kobayashi, Editor, PrenticeHall, Englewood Cliffs, NJ, pp.314-387, 1987.
- [G3] Post D., *Moiré Interferometry for Composites*; Chap. IV, *SEM Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*, M.E. Tuttle and R.L. Pendleton, Editors, SFM, BETHEL, CT, 1989.
- [G4] A. Rosenfeld, A.C. Kak, *Digital Picture Processing*, Computer Science and Applied Mathematics, Academic Press, 1982.
- [G5] Robinson D.W., Reid G.T. (Editors): *Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*; Institute of Physics Publishing, 1993.
- [G6] ASTM Guide E 1441-91: Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging.
- [G7] F. Natterer, *The Mathematics of Computerized Tomography*. John Wiley & Sons Ltd. and B.G. Teubner, Stuttgart, 1989.
- [G8] Kaufman A., *Volume Visualization*, IEEE Computer Society Press Tutorial, 1991.
- [G9] B.K.P. Horn: "Robot Vision", MIT Press, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [G10] Bruck H.A., McNeill S.R., Sutton M.A., Peters W.H.: "Digital Image correlation using Newton-Raphson Method of partial differential correction", *Exp. Mech.*, Vol. 29 (3) 261-268, 1989.
- [G11] *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Edited by Jian Lu. SEM - The Fairmont Press, Inc. 1996.

Contact Point: Prof. Francesco Ginesu, E-mail ginesu@vaxca1.unica.it