

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI MECCANICHE,
NUCLEARI, AERONAUTICHE E DI METALLURGIA*

TESI DI LAUREA

in

ANALISI SPERIMENTALE DELLE TENSIONI

**ANALISI COMPARATIVA DI METODI OTTICI PER
LA MECCANICA SPERIMENTALE**

CANDIDATO

RICCARDO COATTI

RELATORE

Chiar.mo Dott. Ing. GIORGIO OLMI

Anno Accademico 2008 – 2009

Sessione III

Ringraziamenti

Desidero ringraziare di cuore i miei genitori che mi hanno aiutato, supportato e sopportato in tutti questi anni e senza i quali i traguardi fino a qui raggiunti, in ogni campo della mia vita, non sarebbero stati possibili. Un grazie va anche a tutto il resto della mia famiglia che mi è sempre stata vicina.

Un grosso grazie va anche ad Emanuela che mi ha spronato nei momenti più duri e che ha pazientemente aspettato e a Roberto con il quale ho condiviso molte gioie e difficoltà del corso di studi e non solo.

In ultimo un ringraziamento anche a tutti quelli che, in questi anni, hanno partecipato in qualche modo al raggiungimento di questo traguardo: sono giunto fino a qui anche con il loro contributo.

Indice

Presentazione	3
1. Lo sviluppo della meccanica sperimentale: i metodi ottici	7
1.1. Introduzione	7
1.2. Lo sviluppo dei metodi sperimentali	8
2. Metodi speckle	13
2.1. Introduzione	13
2.2. La natura degli speckle	14
2.2.1. Speckle oggettivo	15
2.2.2. Speckle soggettivo	16
2.3. L'effetto speckle nella meccanica sperimentale.	18
2.4. Fotografia speckle	19
2.5. Interferometria speckle	24
2.6. Interferometria speckle tipo "shearing"	29
2.7. ESPI	32
2.8. Interferometria speckle a variazione di fase	38
2.9. Fotografia speckle in luce bianca	43
2.10. Altre applicazioni	45
2.11. Commenti	48

3. Metodi a correlazione di immagini digitali	51
3.1. Introduzione	51
3.2. Principi di funzionamento	53
3.3. Elaborazione delle immagini	55
3.4. Correlazione delle immagini	57
3.5. Correlazione delle immagini: Stereo Correlation	65
3.6. Cenni sulle tecniche sperimentali	72
3.7. Esempi di applicazioni commerciali	75
3.8. Commenti e sviluppi futuri	80
4. Conclusioni e commenti	83
Bibliografia	87

Presentazione

I metodi della meccanica sperimentale consentono l'analisi dello stato di deformazione e di tensione nei componenti e nelle strutture. Sperimentalmente si determinano spostamenti o deformazioni dai quali si risale alle tensioni. Tale modo di procedere si basa sull'osservazione del fenomeno dell'elasticità dei materiali che avviene solo nella seconda metà del XVII secolo e che vede tra i suoi più importanti precursori e pionieri, Robert Hooke. Questi pubblicò infatti nel 1678 il suo lavoro fondamentale sull'elasticità (*Lectures de potentia restitutiva*) sintetizzabile nella celebre legge “*ut tensio sic vis*”, cioè “*come è l'estensione (tensio) così è la forza (vis)*”. La sperimentazione sulle proprietà meccaniche dei materiali è legata alla nascita dei laboratori di prova sui materiali, quali quelli diretti da D. Kirkaldy (Londra, 1865), J. Bauschinger (Istituto politecnico di Monaco, 1871), A. Martens (Politecnico di Berlino, 1871), C. Bach (Istituto politecnico di Stoccarda, 1879), L. von Tetmajer (Politecnico di Zurigo, 1879). Con i laboratori di prova nasce la meccanica sperimentale dei solidi, di seguito denominata per brevità anche come meccanica sperimentale, intesa come complesso di metodi per l'analisi dello stato di deformazione nei materiali, nei componenti e nelle strutture.

La meccanica sperimentale si è sviluppata nel corso del XX secolo come riportato nella tabella 1 che mostra una cronologia sintetica riguardante i metodi in essa utilizzati, con l'indicazione di alcuni precursori e pionieri delle varie tecniche. Fino al 1950, a parte la tensiometria a raggi X adatta all'analisi delle tensioni residue, le tecniche fondamentali erano la fotoelasticità e l'estensimetria (con il complemento delle vernici fragili). A partire dal 1950 si sviluppano con continuità (cadenza all'incirca decennale) i metodi del moiré geometrico (1950) e quindi, con l'invenzione del laser (1960/63) i metodi interferometrici basati sull'impiego dell'ottica coerente, cioè l'interferometria olografica, l'effetto speckle e moiré; infine negli anni '80, con la commercializzazione del sistema SPATE (*Stress Pattern Analysis by measurement of Thermal Emission*), si sviluppano i metodi basati sull'effetto termoelastico (*TSA –Thermographic Stress Analysis*).

A partire dagli anni '80 il maggiore sviluppo è dovuto all'impatto dei sistemi e dei metodi di acquisizione ed elaborazione delle immagini sulla fotomeccanica sia con la nascita e lo sviluppo dei metodi basati sulla correlazione delle immagini digitali (*DIC - Digital Image Correlation*), sia con l'automazione dei metodi della fotomeccanica; nasce e si sviluppa così la fotomeccanica digitale basata su metodi quali: il metodo a variazione di fase, il metodo della trasformata di Fourier, i metodi basati sull'analisi del contenuto spettrale della luce (tecniche tipo *SCA - Spectral Content Analysis* ed *RGB* per la fotoelasticità).

Fino agli anni '60 inoltre furono molto applicati i metodi basati sui modelli analogici: la loro importanza risulta, tra l'altro, dall'esame dell'imponente bibliografia sull'argomento indicativa dell'immenso studio al quale tali sistemi sono stati sottoposti e che ha dato la possibilità di interpretare moltissimi aspetti fisici e meccanici.

Nella seconda metà del secolo XX l'evoluzione, sopra evidenziata dell'analisi sperimentale delle tensioni e, più in generale, della meccanica sperimentale, è legata principalmente ai seguenti fattori:

- il concomitante sviluppo della *meccanica computazionale* (modelli matematici) che ha prodotto uno spostamento di interesse dai metodi operanti sui *modelli analogici* (per esempio le analogie per lo studio della torsione) e su *modelli fisici strutturali* (per esempio fotoelasticità) ai metodi operanti *su prototipo* direttamente cioè sui materiali strutturali;
- all'invenzione del laser (1960/63) che ha permesso lo sviluppo dei metodi interferometrici basati sull'ottica coerente (interferometria olografica, speckle e moiré) operanti su prototipo;
- all'impatto del computer sulla sperimentazione ed in particolare sullo sviluppo dei sistemi digitali di acquisizione delle immagini con la conseguente automazione della fotomeccanica;
- allo sviluppo dei *micro e nanocomponenti*.

Grazie ai numerosi metodi operanti su prototipo così disponibili, l'analisi sperimentale delle tensioni è oggi utilizzata, oltre che come metodo di controllo per la validazione dei risultati delle analisi numeriche, quale insostituibile

metodo di indagine per la caratterizzazione meccanica dei materiali, il collaudo ed il monitoraggio in esercizio di componenti, macchine e strutture.

Lo scopo del presente studio è di illustrare due metodi utilizzati nella meccanica sperimentale: il *metodo speckle* ed il *metodo a correlazione di immagini digitali*, descrivendoli dal punto di vista fisico e sottolineandone pregi e difetti, confrontandoli con altri metodi ottici usati nell'analisi sperimentale delle tensioni e valutando il modo di interagire tra loro. In ultimo saranno presentati esempi e prodotti presenti sul mercato che si rifanno ai suddetti metodi.

ANNO	TECNICHE	PRECURSORI
1900	Fotoelasticità	Brewster (1815), Wertheim (1852), Mesnager (1901), Filon (1902), Coker (1910), Hetényi (1938), Drucker e Mindlin (1940), Manzella (1942), Mondina (\approx 1950)
1925	Tensiometria mediante raggi X	Lester e Aborn (1925), Sachs e Weerts (1930)
1930/ 1940	Vernici fragili	Sauerwald e Wieland (1925), Dietrich e Lehr (1932), De Forest (1939), Turra (1941), Ferro Milone (1948)
1940	Estensimetri elettrici a resistenza	Lord Kelvin (1856), Simmons e Ruge (1938), de Forest, Eisler, W.T. Bean, Smith, Campbell, Bray (\approx 1950)
1950	Metodi del moiré geometrico	Lord Rayleigh (1874), A. Righi (1887) Tolenaar (1945), Dantu (1954), Morse, Durelli e Sciammarella (1961), Theocaris (1969), Pirodda (1969), Durelli e Parks (1970)
1960	Olografia	Gabor (1948) Leith e Upatnieks (1961)
1970	Metodi speckle	Archbold, Burch, Ennos & Taylor (1969), Butters & Leendertz (1971), F.P Chiang (1973)
1980	Interferometria moiré	Lord Rayleigh (1874), A. Righi (1887), Post (\approx 1980)
1980	Metodi basati sull'effetto termoelastico(TSA)	Weber (1830), Lord Kelvin (1852), Belgen (1967), Mountain e Webber (1978)
1980	Metodi a correlazione di immagini digitali (DIC)	Peters e Ranson (1981), Sutton
1985 2005	Fotomeccanica digitale:	Per la fotoelasticità: Muller e Saackel (1979), Voloshin. e Burger (1983), Sanford e Iyengar (1885), Hecker e Morche (1986)
2025	?	?

Tabella 1: Lo sviluppo dei metodi ottici

Capitolo 1

Lo sviluppo della meccanica sperimentale: i metodi ottici

1.1. Introduzione

L'analisi delle tensioni sui componenti strutturali incontra spesso delle serie difficoltà. Le forme complicate, determinate principalmente dal tipo di impiego a cui sono chiamati tali componenti, il complesso stato dei carichi meccanici e termici a cui essi sono sottoposti, sono le ragioni per le quali i risultati teorici devono essere verificati tramite l'indagine sperimentale.

Usualmente la meccanica sperimentale ha come scopo la determinazione delle tensioni, deformazioni o spostamenti di particolari meccanici, sia sul campo che tramite l'utilizzo di modelli o prototipi. Molti metodi sono utilizzati, tra i quali i più conosciuti sono gli estensimetri e le macchine prova, ma sono sempre più disponibili e stanno acquistando importanza giorno dopo giorno, i metodi ottici a tutto campo.

I tipi di carico che agiscono su un determinato componente possono essere classificati in termici e meccanici; questi ultimi si possono suddividere in quelli generati da gas in pressione o da forze di massa dovute al moto o a vibrazioni. Tutto questo porta a degli stati di tensione che possono essere a loro volta classificati in base al tipo di materiale analizzato se esso è un continuo eterogeneo od omogeneo ed isotropo: in entrambi i casi si possono avere campi di tensione bidimensionali, bidimensionali in componenti spaziali, oppure tridimensionali.

In ogni caso, comunque, i metodi di misura disponibili sono molteplici e possono essere suddivisi, a grandi linee, tra ottici e non ottici: ai primi appartengono, tra gli altri, la fotoelasticità, l'interferometria olografica, il metodo moiré, la fotografia speckle, l'ESPI, mentre ai secondi, l'estensimetria,

i metodi ad ultrasuoni e le vernici fragili. Il successo del processo sperimentale si poggia sulla scelta della tecnica d'indagine per lo scopo che ci si prefigge, sulle limitazioni degli apparati disponibili, sui costi, sull'accuratezza richiesta e sul carattere dell'informazione ottenuta. I criteri di scelta sono quindi diversi ed è difficile stabilire dei principi generali sui quali tale scelta dovrebbe essere basata: un aiuto potrebbe essere la conoscenza di possibili soluzioni per il particolare tipo di problema esaminato utilizzando un certo metodo, piuttosto che un altro. La misura delle tensioni può essere eseguita su prototipi o su modelli e in ingegneria meccanica entrambi sono largamente utilizzati.

Scopo del presente capitolo è riassumere lo sviluppo delle tecniche utilizzate nell'analisi sperimentale delle tensioni, cioè nella meccanica sperimentale, che è avvenuto prevalentemente nell'ultimo secolo e agli inizi del secondo millennio, illustrando l'evolversi dei metodi.

1.2. Lo sviluppo dei metodi sperimentali

All'inizio del '900 l'analisi sperimentale delle tensioni si basava essenzialmente su misure condotte con macchine di prova, strumentando i provini con varie attrezzature, tipo dinamometri o estensimetri. Tale strumentazione, pur essendo ancora oggi di grande utilità, risulta essenzialmente incapace di fornire informazioni quantitative in presenza di corpi sollecitati in maniera complessa, lì dove, cioè, non è possibile prevedere accuratamente la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni. Pertanto gli strumenti tradizionali, pur fornendo risultati molto accurati e ripetibili, possono soltanto essere utilizzati per condurre esperienze su provini o comunque su componenti sollecitati in maniera semplice, mentre risultano inadeguati per operazioni di misura sul campo, ovvero direttamente sui prototipi o sui componenti e, inoltre, non forniscono una visione globale degli stati tensionali e deformativi. Le tecniche numeriche, oggi molto diffuse, possono in qualche modo integrarsi con le tecniche tradizionali: mediante esse, infatti, è possibile individuare le zone maggiormente sollecitate del componente e quindi permettere il restringimento del campo di indagine; d'altra parte richiedono la conoscenza delle proprietà dei materiali di cui simulano il comportamento,

pertanto, quando si intendono effettuare prove di caratterizzazione, esse possono essere utilizzate solo per effettuare una calibrazione delle prove sperimentali, le quali comunque saranno necessarie.

Verso i primi decenni del '900 iniziarono a diffondersi, inizialmente presso gli ambienti di ricerca e successivamente anche nel mondo industriale, diverse tecniche a pieno campo che permisero di superare, in molte situazioni, i suddetti limiti delle tecniche tradizionali.

Fra le prime tecniche a pieno campo diffuse, sicuramente c'è la fotoelasticità attraverso la quale è possibile rilevare a pieno campo lo stato di tensione di un corpo trasparente soggetto ad uno stato piano di tensione. Tale tecnica, pur essendo stata largamente utilizzata in passato per la risoluzione di diverse problematiche, come la determinazione dei fattori di concentrazioni delle tensioni, attualmente non è molto utilizzata poiché essa risulta applicabile, come già detto, soltanto a corpi trasparenti e piani, per cui richiede comunque la realizzazione di modelli ed il trasferimento dei risultati dal modello al prototipo; inoltre anche la determinazione delle singole componenti di tensioni richiede procedure non sempre particolarmente rapide e altre difficoltà si incontrano nello studio degli stati di tensione tridimensionali, dove è necessario l'utilizzo del metodo di congelamento delle tensioni, di non semplice attuazione. Pertanto oggi gli studi più diffusi consistono in applicazioni su componenti realizzati in materiali trasparenti, come controlli non distruttivi o misura di tensioni residue su fibre ottiche o su componentistica ottica generica e su polimeri.

Alcuni anni più tardi, intorno agli anni '60, si diffusero le tecniche moiré, le quali si basano sull'interferenza meccanica di due griglie, una di riferimento fissa ed una attaccata sul corpo da esaminare di cui ne segue gli spostamenti. Adottando la configurazione base, tali tecniche permettono di ottenere a pieno campo sistemi di frange i quali sono interpretabili come curve di livello di una singola componente di spostamento nel piano. Mediante opportune varianti, come il moiré ombra o il moiré alla Ligtenberg, è possibile effettuare misure di forme, spostamenti fuori dal piano e rotazioni delle normali di una superficie. Il limite principale delle tecniche moiré risiede nella bassa sensibilità della tecnica dovuta ai limiti costruttivi delle griglie; pertanto tali tecniche possono

essere utilizzate per la misura di grandi spostamenti, come spostamenti in campo plastico di materiali rigidi o spostamenti elastici di materiali cedevoli, rilievi di forme o per la realizzazione di sistemi di allineamento.

A partire dal 1960 iniziarono a diffondersi le cosiddette tecniche interferometriche, cioè metodi di misura basati sull'interferenza di campi di luce coerenti, grazie alla diffusione dei laser, ovvero di sorgenti di luce altamente coerente. I principali vantaggi che questo tipo di tecniche offrono consistono nell'elevata sensibilità e nella possibilità di effettuare misure a pieno campo.

Storicamente la prima tecnica interferometrica è l'olografia: essa si diffonde grazie all'idea di Gabor, anche se sarà solo qualche anno più tardi con Leith e Upatnieks che la tecnica prenderà forma come metodologia sperimentale. L'interferometria olografica si basa sulla registrazione dell'intero fronte d'onda, in fase ed ampiezza, proveniente da un oggetto. La registrazione del fronte d'onda avviene mediante gli ologrammi, ovvero lastre fotografiche ad alta risoluzione; confrontando il fronte d'onda in una configurazione di riferimento con una condizione deformata, è possibile risalire alla componente di spostamento dell'oggetto in ogni punto, lungo una direzione che dipende dalla direzione di illuminazione e da quella di osservazione. Inoltre, mediante opportuni accorgimenti, è possibile visualizzare lo stato di deformazione di un corpo messo in vibrazione. Tale tecnica, che all'inizio riscosse grande entusiasmo presso gli ambienti di ricerca, attualmente risulta poco utilizzata a causa delle non poche difficoltà connesse con lo sviluppo delle lastre fotografiche.

Le tecniche interferometriche, attualmente più utilizzate, sono l'interferometria moiré e l'interferometria speckle. La prima consente di visualizzare a pieno campo, mediante frange di interferenza, gli spostamenti nel piano della superficie sotto osservazione. L'interferenza avviene fra due fronti d'onda diffratti da un reticolo incollato sulla superficie ed illuminato lungo direzioni disposte simmetricamente rispetto alla normale della superficie stessa, l'angolo di inclinazione di tali fasci dipende dal passo del reticolo.

L'interferometria moiré, oltre ai vantaggi tipici delle tecniche interferometriche, non richiede una grande stabilità meccanica dell'apparato

sperimentale, poiché le frange si formano dal momento in cui insorgono le deformazioni e restano ferme fino a quando non cambia lo stato di deformazione superficiale; inoltre la qualità delle frange dipende dalla qualità del reticolo per cui è possibile ottenere sistemi di frange estremamente “puliti” ed è possibile utilizzare mezzi di registrazione digitali estremamente più comodi degli ologrammi. D'altra parte essa risulta essere una tecnica di contatto, in quanto il reticolo deve essere incollato sulla superficie per seguirne fedelmente gli spostamenti; inoltre è sensibile ai soli spostamenti nel piano ed è utilizzabile soltanto per l'analisi di superfici piane o quasi piane. In ogni caso la tecnica oggi risulta avere applicazioni in svariati settori di ricerca.

L'interferometria speckle è una tecnica relativamente nuova diffusasi dopo l'olografia verso la fine degli anni '60. Essa permette di fare le stesse cose che si fanno con l'olografia con la differenza che i mezzi di registrazione utilizzati non sono le lastre olografiche con tutte le problematiche connesse, bensì normalmente si utilizzano telecamere con segnali video standard. Ciò consente una più facile e veloce gestione dei dati sperimentali ed inoltre dà la possibilità di realizzare prove in tempo reale. A tal proposito si deve dire che attualmente alcuni ricercatori stanno conducendo alcuni interessanti studi su come registrare un ologramma direttamente sul chip di una telecamera. Quest'ultima tecnica, comunemente nota come olografia digitale, richiede la ricostruzione dell'oggetto olografato in maniera numerica, applicando cioè i principi della diffrazione; il reale limite consiste nel fatto che la risoluzione e la dimensione dei chip limita la dimensione e l'accuratezza con cui sono ricostruiti gli oggetti osservati. Lo sviluppo e la diffusione delle suddette e di altre tecniche sperimentali è stato e sarà sempre di più dipendente dai progressi della tecnologia, dell'elettronica e dell'informatica, per cui non è facile prevedere quale sarà il trend della ricerca nei prossimi anni.

Capitolo 2

Metodi speckle

2.1. Introduzione

Il fenomeno degli speckle era già noto molto tempo prima dell'invenzione del laser, associato a grandi nomi come Newton e Lord Rayleigh. Nonostante ciò, di solito lo si associa ad esso, in quanto è proprio con l'inizio dell'utilizzo del laser che è nato l'interesse per tale fenomeno, portando ad una profonda comprensione dello stesso e a molte nuove applicazioni nell'analisi sperimentale delle tensioni fino a diventare uno dei metodi più importanti utilizzati nella meccanica sperimentale dei giorni nostri.

L'invenzione del laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) creò grandi aspettative tra gli utilizzatori dei metodi ottici, perché sembrò essere la risposta a molti problemi di illuminazione, infatti era una fonte che produceva un fascio di luce intenso, stretto, monocromatico e coerente. Si considera che i laser siano fasci di luce con uno stretto spettro di lunghezze d'onda, ma non è così per tutti i tipi: alcuni emettono su larghi spettri, mentre altri hanno onde con multipli di lunghezza ben definiti. In ogni caso, come detto, si ha, rispetto alle sorgenti di luce incoerenti, come quella bianca, una notevole coerenza. Questa risiede nella possibilità della sorgente di luce di mantenere una certa relazione di fase con se stessa durante la propagazione: si può definire una coerenza temporale ed una spaziale. La prima si ha quando per un intervallo significativamente lungo l'onda mantiene andamento sinusoidale, quindi prevedibile, senza che vi siano deviazioni di fase, mentre la seconda risiede nel fatto che due onde mantengono la differenza di fase, presente tra loro, in una regione estesa dello spazio. Il laser ha elevate proprietà di coerenza temporale e spaziale e perciò viene utilizzato nella moderna meccanica sperimentale, soprattutto perché questa sua caratteristica permette di utilizzare le teorie dell'interferometria.

Nacquero però presto dei problemi: immagini visive o fotografiche di oggetti illuminati da laser erano ricoperte con una struttura a grani che limitava molto l'effettiva risoluzione, dando fotografie di qualità molto inferiore rispetto a quelle fatte in luce non coerente.

Un esempio di tale fenomeno è illustrato in figura 2.1.

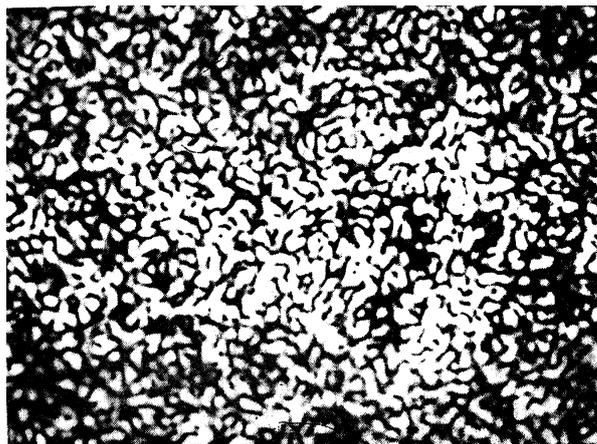


Fig.2.1 - Esempio della granulosità caratteristica della illuminazione in luce coerente (effetto speckle, ingrandimento).

Questo fenomeno noto come “laser speckle” fu considerato per alcuni anni un imprevisto che portava il laser ad essere meno utile di quanto aspettato: la formazione di queste strutture fu osservata per le prime volte dai ricercatori che operavano nel campo dell'olografia, quando si lavorava con aperture ridotte. Lo speckle fu quindi inizialmente considerato come un effetto di disturbo inevitabilmente sovrapposto alle informazioni codificate nelle frange olografiche, solo successivamente si intuì la possibilità di impiegare tale effetto come mezzo di misura.

Ora le tecniche che si basano sull'effetto speckle sono importanti come quelle basate sull'olografia o addirittura in misura superiore.

2.2. La natura degli speckle

Il termine inglese *speckle* significa macchiolina, termine che rende molto bene l'idea del fenomeno. Quando infatti una superficie otticamente rugosa, ovvero con una rugosità maggiore o uguale alla lunghezza d'onda della luce, è

illuminata con un fascio di luce coerente, ad una certa distanza dalla superficie è possibile osservare un campo di luce caratterizzato da una miriade di macchie chiare e scure distribuite in maniera casuale. Le cause di ciò sono state identificate nella natura propria della luce coerente e nella scabrosità di qualsiasi superficie non idealmente speculare.

Le superfici di molti materiali sono ruvide in una scala che può essere paragonata a quella di una lunghezza d'onda ottica (0,6 μ m). Gli speckle possono essere anche prodotti dalla trasmissione di luce coerente attraverso oggetti diffondenti come per esempio vetro o particelle in liquido. Quando la luce laser è riflessa o diffusa attraverso tali superfici, l'onda ottica che arriva in un punto posto ad una certa distanza da essa, è formata da molte onde ciascuna nata da un differente punto della superficie illuminata. Il cammino ottico percorso da queste onde, dalla fonte alla ricezione, può differire da zero a molte lunghezze d'onda, a seconda della scabrosità della superficie e della geometria del sistema. L'interferenza delle onde che arrivano al punto di ricezione causa un'irradiazione risultante che varia dallo scuro al brillante. In un punto vicino a quello in esame si avrà probabilmente una brillantezza differente causata dalla stessa risultante. Questa variazione di irradiazione è la causa principale della nascita del cosiddetto effetto speckle: in particolare si parla di speckle oggettivo e soggettivo.

2.2.1. Speckle oggettivo

Lo *speckle oggettivo* è quello che si forma senza l'ausilio di un sistema ottico su di uno schermo posto di fronte all'oggetto (Figura 2.2). Il generico punto dello schermo posto di fronte all'oggetto riceve luce da tutti i punti dell'oggetto delimitato dai punti P_1 e P_2 . Considerando solo la luce riflessa dai punti estremi P_1 e P_2 lo sfasamento nel punto Q_1 risulta:

$$\Delta = (SP_1 + P_1Q_1) - (SP_2 + P_2Q_1)$$

pertanto se tale sfasamento è uguale ad un multiplo intero di lunghezze d'onda

si ha interferenza costruttiva e quindi nel punto Q_1 si forma uno speckle chiaro. Analogamente nel punto Q_2 dello schermo lo sfasamento risulta:

$$\Delta = (SP_1 + P_1Q_2) - (SP_2 + P_2Q_1)$$

Se tale sfasamento è uguale ad un multiplo dispari di semi-lunghezze d'onda allora si ha interferenza distruttiva e quindi si ha la formazione di uno speckle scuro.

Si può dimostrare che il diametro medio dello speckle oggettivo risulta:

$$S_o = 1,22 \frac{L}{D} \lambda$$

dove D è il diametro dell'oggetto, L è la distanza tra oggetto e schermo, λ è la lunghezza d'onda della luce.

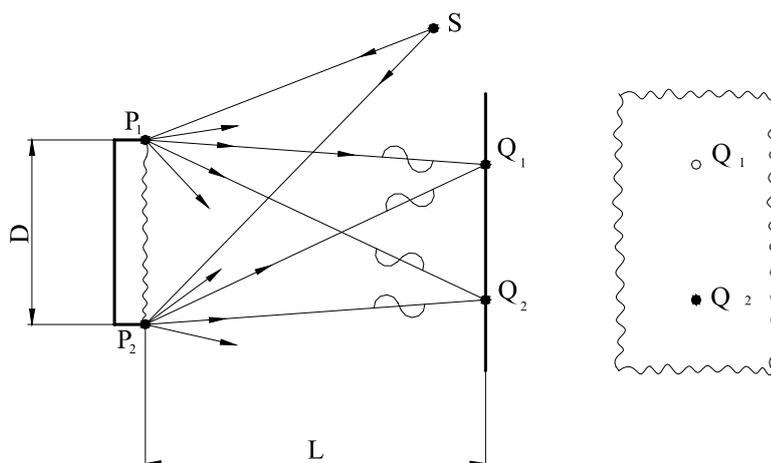


Figura 2.2 – Formazione dello speckle oggettivo: in Q_1 i campi sono in fase e quindi si ha uno speckle chiaro, in Q_2 i campi sono in opposizione di fase e quindi lo speckle è scuro.

2.2.2. Speckle soggettivo

Lo *speckle soggettivo* (Figura 2.3) è quello che si forma quando si riprende un oggetto diffondente, illuminato con una sorgente di luce coerente, con l'ausilio di un sistema ottico (macchina fotografica, telecamera, occhio nudo). Di conseguenza i limiti di diffrazione delle lenti devono essere tenuti in considerazione, in particolare quelli relativi alla risoluzione: ne risulta il fatto

che non c'è corrispondenza biunivoca tra i punti dell'oggetto ripreso ed i punti dell'immagine. L'interposizione di una lente fa sì che in un punto del piano immagine arrivi luce proveniente da punti limitrofi dell'oggetto, con conseguente sfasamento e quindi formazione degli speckle.

Anche in questo caso si manifesta l'effetto speckle che, nel piano immagine, ha una dimensione data dall'equazione precedente dove però D indica il diametro della lente ed L indica la distanza tra la lente ed il piano immagine:

$$(S_S)_i = 1,22 \frac{L}{D} \lambda$$

Questa indica che per aumentare la dimensione tipica dello speckle basta diminuire il diametro della lente (diminuire l'apertura dell'obiettivo della macchina fotografica o *strizzare* l'occhio nel caso di visione diretta).

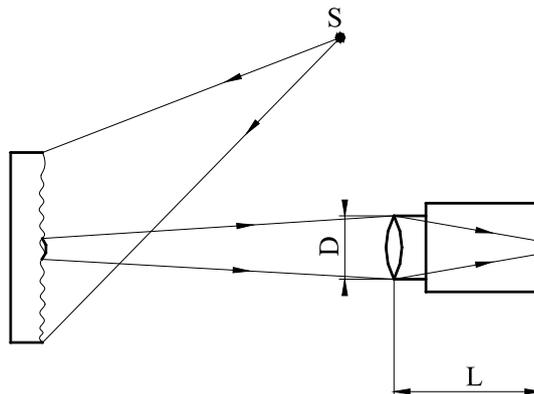


Figura 2.3 – Formazione dello speckle soggettivo

La relazione precedente si può anche scrivere nella forma:

$$(S_S)_i = 1,22\lambda(1 + M)f$$

dove M è l'ingrandimento della lente, mentre f è dato da

$$f = \frac{F}{D}$$

essendo D il diametro ed F la distanza focale della lente. La dimensione tipica dello speckle soggettivo sull'oggetto $(S_S)_o$ risulta quindi:

$$(S_S)_o = \frac{(S_S)_i}{M} = 1,22\lambda \frac{(1 + M)}{M} f$$

Lo speckle osservato ad occhio nudo, anche quando si tratta dello speckle che si forma su di un piano posto davanti all'oggetto, è di tipo soggettivo. Per osservare lo speckle oggettivo bisogna esporre direttamente una lastra fotografica posta di fronte all'oggetto.

2.3. L'effetto speckle nella meccanica sperimentale

I metodi speckle sono utilizzati nella meccanica sperimentale per il rilievo degli spostamenti, delle rotazioni e delle deformazioni. Se un oggetto diffondente illuminato con una sorgente di luce coerente si deforma in seguito ad un carico applicato, si verificano due effetti: il campo speckle si sposta con il punto deformato ed inoltre la sua fase cambia in accordo alla variazione dei cammini ottici.

In base al set up utilizzato si hanno le seguenti tecniche di analisi:

- la *fotografia speckle* che utilizza lo spostamento degli stessi per la misura di spostamenti nel piano;
- l'*interferometria speckle* che utilizza la variazione di fase degli stessi per la misura di spostamenti nel piano o fuori dal piano;
- l'*interferometria speckle tipo "shearing"* che permette di legare l'informazione sperimentale alle derivate degli spostamenti, cioè alle deformazioni generalizzate.

Gli ultimi due metodi utilizzano il fenomeno dell'interferenza: esso è dovuto alla sovrapposizione nello spazio di due o più onde. La teoria elettromagnetica delle onde ci dice che il campo risultante è pari alla somma dei campi presi singolarmente. Quello che si osserva sono però le intensità luminose, che non seguono lo stesso principio, infatti può accadere che l'intensità dell'onda risultante sia diversa dalla somma di quelle associate ad ogni singola onda di partenza. Questa asserzione sta alla base del fenomeno: in alcuni punti si ha un minimo dell'intensità luminosa ed in altri un massimo; si parla rispettivamente di interferenza distruttiva, dove non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, e di costruttiva dove si ha la somma delle onde di partenza.

Il fenomeno si riferisce usualmente ad onde coerenti, cioè che mantengono nel tempo la stessa differenza di fase, quindi a fenomeni aventi, in teoria, la stessa singola frequenza, infatti due onde generate da sorgenti aventi diversa frequenza non danno luogo ad interferenza, perché oscillazioni con diverso periodo sono disaccoppiate in potenza. Ne nascono delle frange di interferenza che sono rappresentative di quello detto sopra, cioè dell'accoppiamento o disaccoppiamento di fase tra le onde. Anche se in natura non è possibile avere fenomeni ondulatori che abbiano una sola frequenza, ma si ha piuttosto un range di frequenze per una determinata onda, il laser si avvicina molto a questo concetto, rendendolo adatto all'impiego nelle varie disposizioni degli interferometri, in particolare quelli che utilizzano l'effetto speckle.

2.4. Fotografia speckle

Un diretto e semplice sfruttamento dei metodi speckle nella metrologia è di utilizzarli come microscopici segni di punti sulla superficie dell'oggetto in esame. Un singolo speckle è una impronta unica che deriva dalla morfologia locale di una piccola area della superficie dell'oggetto e che dipende dalla geometria del sistema ottico e dall'apertura focale del sistema di illuminazione e visione, per cui può essere utilizzato per rilevare eventuali modificazioni della superficie come moti rigidi o plasticizzazioni locali. Se un'immagine speckle è creata grazie ad una sorgente di luce che illumina l'oggetto, allora lo speckle vicino ad un punto nell'immagine stessa è unicamente identificato con il corrispondente punto sull'oggetto. C'è quindi una corrispondenza biunivoca, come già accennato, tra i due punti: se il corpo in esame si sposta entro certi limiti, e se il sistema ottico non subisce cambiamenti, allora lo speckle si sposta con il punto ed il moto si osserva sul piano immagine. Inoltre lo speckle stesso non si deforma e non si perde in alcun modo.

Si possono quindi sfruttare queste caratteristiche nella tecnica denominata *fotografia speckle*, dove il campo speckle è registrato tra due stati del modello, uno non deformato ed uno deformato in seguito ai carichi meccanici o termici

applicati: gli spostamenti degli speckle corrispondono agli spostamenti locali dei punti appartenenti alla superficie dell'oggetto.

Si può definire la fotografia speckle come una forma elementare di interferometria, che consente di fare misure di moderata risoluzione di spostamenti (in alcuni casi anche di rotazioni e vibrazioni, in base al set-up utilizzato), mediante un metodo a doppia esposizione. In questo studio ci si riferisce al caso della rilevazione di spostamenti nel piano, per il quale è stata utilizzata fin dal passato la tecnica in esame.

Il metodo utilizza fotogrammi ad alta risoluzione di un corpo illuminato in luce coerente: il risultato sarà una registrazione su lastra fotografica di un campo di frange di interferenza permanentemente impresse, che produce una mappa degli spostamenti dell'oggetto; possono essere determinate entrambe le componenti di spostamento nel piano, in maniera distinta e senza ambiguità.

Lo schema di principio è illustrato in figura 2.4 per la ripresa e per il trattamento: la lente forma un'immagine della superficie dell'oggetto nel suo piano focale, ma essendo di forma irregolare, l'immagine sarà modulata, da un campo casuale di speckle.

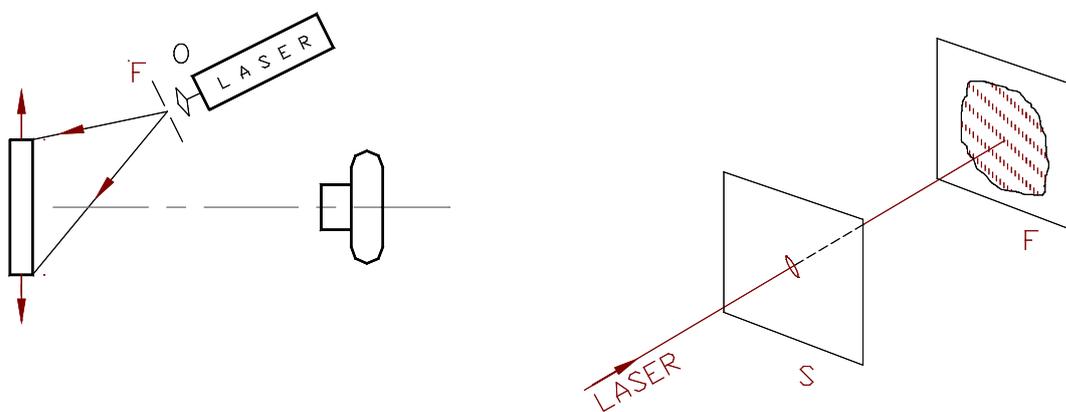


Figura 2.4 - Registrazione dell'oggetto indeformato e deformato (sin.) e osservazione delle frange di Young (des.)

Un vantaggio di questo schema è la semplicità, non essendoci nulla di particolarmente complicato nella messa in opera dei vari componenti: si illumina l'oggetto e si rilevano delle fotografie; il filtro spaziale F elimina le frange spurie, che contaminerebbero il campo speckle, mentre l'apertura della

lente dell'obiettivo determina la sensibilità del metodo, attraverso le dimensioni degli speckle.

Come già accennato si compiono due rilevamenti: prima si imprime sulla lastra fotografica lo stato inderformato, poi, in seguito all'applicazione dei carichi, si rileva, sulla stessa lastra, il campo speckle che nasce dagli spostamenti avvenuti. Per quel che riguarda l'utilizzo dei fotogrammi, si nota che sono raccomandati piatti fotografici di vetro, oppure gli stessi tipi utilizzati nell'olografia; ci sono comunque pratiche standard classificate, che indicano anche il tipo di superficie da adottare.

Se l'oggetto trasla nel piano, cioè parallelamente a sé stesso, ad una distanza costante dalla lente dell'obiettivo di ripresa, la fase relativa alle componenti diffuse dai vari punti del piano oggetto che danno origine ad ogni speckle, rimane invariata. Di conseguenza il campo speckle risultante in seguito a tale spostamento sarà semplicemente traslato rispetto a quello originario a struttura scarica. Considerando l'entità dello spostamento pari a L e indicando l'ingrandimento della lente con M , gli speckle trasleranno della quantità ML : tale traslazione è indipendente dall'angolo di illuminazione della sorgente laser.

Dopo le due esposizioni dette sopra, se la traslazione è più grande delle dimensioni degli speckle, che ovviamente saranno soggettivi, la pellicola sviluppata conterrà una coppia di campi identici, dal momento che la fase non cambia, separati da una distanza ML . Ognuno di questi campi è il risultato di una casuale interferenza di onde che ha l'alta probabilità di essere scura; quindi, visto l'utilizzo di un negativo, si ottiene, per ogni campo, un insieme randomico di punti scuri in campo bianco.

Se lo spostamento non è elevato, si potrebbe pensare di usare la lastra fotografica e di identificare l'entità dello stesso e la sua direzione misurando direttamente sul negativo, aiutati dal fatto che i bordi degli speckle scuri risultano abbastanza netti, ma questa tecnica è sperimentalmente inutilizzabile o al limite molto complicata, in quanto necessita di microscopi, oltre ad avere il problema di dovere identificare i centri delle macchie all'interno di una struttura complessa. Un approccio migliore all'analisi è quello di utilizzare le caratteristiche di diffrazione dello "specklegramma" per determinare le

grandezze cercate. A tal pro ci sono due possibili tecniche attuabili: il metodo delle frange di Fourier ed il metodo delle frange di Young.

Si supponga di avere già il campo sviluppato su una pellicola e la si ponga nel piano oggetto di un apparato per filtraggio ottico come quello mostrato in figura 2.5. Si osserverà nel piano immagine un pattern di diffrazione risultante che presenta uno spot scuro al centro, dovuto al blocco della componente di ordine zero; la distribuzione di intensità delle frequenze che ne deriva ha un andamento che, in un piano cartesiano con ascissa la distanza dall'asse ottico ed ordinata la grandezza degli speckle, è a campana, simmetrico all'asse delle ordinate. A questo punto si posiziona un filtro detto di Fourier che presenta un foro ad una certa distanza dall'asse dell'apparato: si eseguirà quindi un taglio per un certo range di frequenze della distribuzione detta.

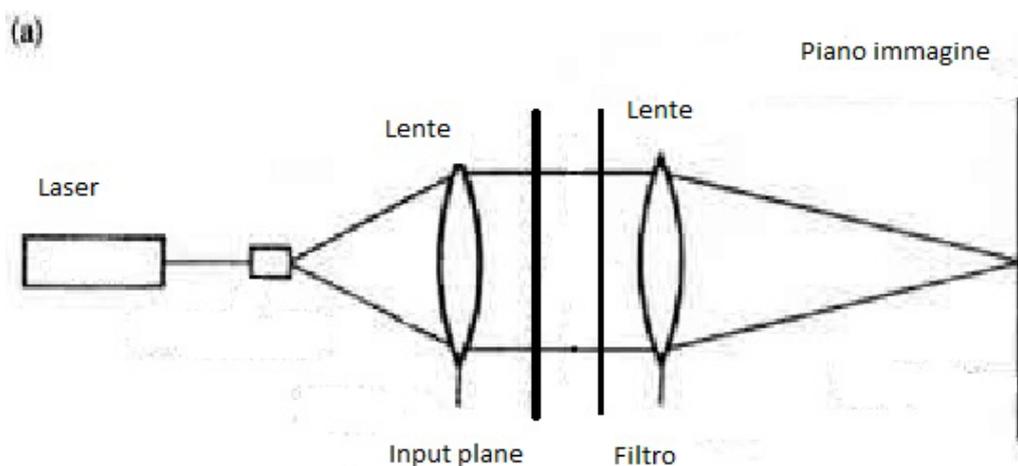


Figura 2.5 – Apparato di filtraggio per il metodo delle frange di Fourier

Questo risultato è lo stesso che si ottiene pensando di attaccare all'oggetto un reticolo come nelle tecniche che utilizzano l'effetto Moiré: quando l'oggetto subisce una deformazione nel piano, il pattern speckle seguirà gli spostamenti dei punti sulla superficie dell'oggetto. Pertanto, il reticolo sarà modulato in fase ed anche in questo caso si può fare l'immagine dello speckle pattern prima e dopo la deformazione mediante doppia esposizione. La trasmittanza risultante sarà $t_1 + t_2$. Le immagini dei due speckle pattern possono anche essere formate su due negativi separati e poi sovrapposti. In questo secondo caso, la

trasmissione complessiva sarà $t_1 \cdot t_2$. Mediante filtraggio ottico del negativo doppiamente esposto, si ottiene una distribuzione di intensità dipendente solo dalla funzione di modulazione $\psi_x(x)$.

Come si nota questa tecnica si avvicina molto a quelle che utilizzano il metodo Moiré e quindi non sarà particolarmente approfondita, perché non oggetto dello studio in essere; diverso è il discorso del secondo tipo di analisi, come di seguito descritto.

Per illustrare il secondo metodo delle frange di Young, si illumina il negativo a doppia esposizione ottenuto con un fascio laser non espanso: si può utilizzare una penna laser, facile da reperire e maneggiare. Si posiziona uno schermo a distanza z dalla pellicola e si passi la penna su di essa: si otterrà, per ogni posizione del fascio laser, un alone caratterizzato da un insieme di frange di interferenza che decrescono in luminosità dal centro alla periferia. Tali frange nascono dalla diffrazione data dai due generici speckle identici e vicini relativi alle due configurazioni del modello, che si comportano come i due fori presenti nell'interferometro di Young: le frange sono dette perciò "frange di Young".

Le frange saranno parallele ed equidistanti e con direzione perpendicolare alla linea che congiunge i due speckle, quindi ortogonali allo spostamento incognito, inoltre dalla distanza che c'è tra esse si può risalire all'entità dello spostamento. Infatti chiamata d la distanza tra due frange adiacenti e λ la lunghezza d'onda della luce coerente, lo spostamento L dell'oggetto si determina con la seguente:

$$L = \frac{\lambda z}{Md}$$

Dalla misura di d si può quindi risalire allo spostamento L dell'oggetto nel punto di incidenza del fascio laser.

Si nota che il procedimento appena descritto è un'analisi punto a punto del campo immagine che si forma in seguito alla doppia esposizione: questo è un grosso limite, perché obbliga ad un grande lavoro di osservazione dopo il rilevamento sperimentale. Sono stati studiati metodi che evitano tale limite, filtrando spazialmente l'informazione contenuta nell'intero specklegramma per

ottenere frange sul piano di osservazione che rappresentano uguale componente di spostamento.

Per ottenere il modello a frange di Young, le coppie di macchie identiche devono essere separate di una distanza pari ad almeno metà della dimensione speckle, pertanto il metodo fotografico non ha una elevata sensibilità, risultando utile nel campo di spostamenti non piccoli, quindi usato come complementare a quelli più sensibili dell'interferometria speckle.

2.5. Interferometria speckle

Un utilizzo più sofisticato dell'effetto speckle in metrologia è legato all'informazione di fase contenuta nello speckle stesso ed a combinazioni coerenti di campi speckle come base per le misure. Dal momento che questo approccio è propriamente interferometrico, le tecniche considerate sono comprese in quella che viene chiamata *interferometria speckle* o *interferometria a correlazione di speckle*.

Questo metodo sfrutta la variazione di fase subita dagli speckle nel passare dalla configurazione indeformata a quella deformata: lo spostamento da analizzare può essere, a seconda del set-up adottato dal sistema di misura, nel piano o fuori dal piano, mentre nella fotografia speckle la misura era prevalentemente per spostamenti nel piano. Inoltre si dovranno esaminare traslazioni di entità piccola rispetto alla dimensione delle macchie, differentemente da prima, per evitare il fenomeno di decorrelazione degli speckle. Tale concetto risiede nel fatto che questa tecnica sperimentale concerne nella registrazione e combinazione di campi per due stati del modello in esame; per fare in modo che tutto ciò funzioni, tali campi devono rimanere correlati, cioè se gli speckle corrispondenti alle due esposizioni si muovono troppo lontani tra loro da non poter essere più comparati, la corrispondenza si perde e la misura non può essere effettuata. Questo è tanto più importante quanto si utilizzano metodi elettronici di osservazione dove la risoluzione dei pixel diviene una variabile molto importante. Si osserva che la sensibilità di questa tecnica è maggiore di quella fotografica, proprio per il fatto che gli

spostamenti devono essere piccoli, inoltre speckle di grosse dimensioni sono un vantaggio perché permettono di aumentare il campo di misura prima che la correlazione sia persa.

Dal momento che la statistica di distribuzione dell'interferenza degli speckle predice bassa probabilità di avere macchie brillanti, l'immagine ottenuta non sarà particolarmente luminosa, dando quindi luogo a frange non facilmente visibili, o almeno non come quelle ricavate dal metodo fotografico.

Come detto precedentemente, questa tecnica sperimentale utilizza delle combinazioni di campi per effettuare le misure. E' come se si utilizzassero le informazioni provenienti da due immagini speckle nate da due fasci di luce coerente che illuminano la stessa configurazione del modello: in effetti è proprio così che si procede, utilizzando di volta in volta campi di riferimento oppure campi oggetto provenienti da direzioni diverse. Lo scopo di un secondo laser è di rendere lo speckle fortemente dipendente dalla differenza di fase dei fasci di riferimento ed oggetto.

L'esistenza di differenti tipi di interferometri permette di misurare spostamenti nel piano e fuori del piano. Si considerino i secondi: ci sono due configurazioni che si differenziano per l'utilizzo o meno di un onda di riferimento.

Lo schema del primo metodo esaminato è mostrato in figura 2.6: l'oggetto è illuminato da una sorgente di luce coerente con un angolo di incidenza pari a θ_i rispetto alla normale al corpo: con l'ausilio di una lente si forma quindi un campo speckle sul piano immagine.

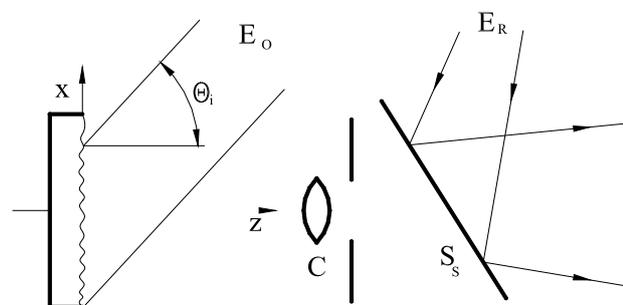


Figura 2.6 – Disposizione con fascio di riferimento per la misura di spostamenti fuori dal piano

Un campo di riferimento, E_r , che solitamente ha un fronte d'onda piano o sferico ed è ortogonale allo specchio S_s , è aggiunto al piano immagine. Lo scopo di tale perturbazione è, come detto, di modificare lo speckle oggetto attraverso l'interferenza con un campo del quale si conoscono fase e ampiezza. In questo caso, quando l'oggetto subisce uno spostamento fuori dal proprio piano, il cambiamento di fase che gli speckle subiscono è dovuto solamente alla componente relativa a tale dislocazione, potendo trascurare la componente lungo il piano nel caso sia piccolo l'angolo di incidenza del laser.

Si agisce attraverso due acquisizioni: a struttura scarica ed a struttura carica; quindi si combinano le due intensità risultanti attraverso somma o sottrazione. Di solito si utilizza il secondo metodo, vantaggioso soprattutto quando si usano ausili elettronici.

La differenza di fase tra i campi oggetto delle due configurazioni relativa al fascio di riferimento è data dalla seguente relazione:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_i) w$$

Imprimendo uno spostamento nella direzione z , l'immagine osservata sulla lastra fotografica, cioè sul piano immagine, varierà di brillantezza con la variazione della componente w . Dato che la condizione di interferenza distruttiva, cioè quando si osservano delle frange scure, è data da:

$$\Delta\varphi = 2n\pi$$

allora ci saranno frange che rappresentano il luogo dei punti in cui è costante la componente di spostamento fuori dal piano, rappresentata dalla relazione:

$$w = \frac{n\lambda}{(1 + \cos \theta_i)}$$

La versione della tecnica appena vista ha una sensibilità elevata. Questo porta dei problemi nel caso si vogliano misurare spostamenti di grande entità, in quanto ne risulterebbe un numero grande di frange molto ravvicinate e quindi si avrebbe il rischio di confonderle nell'analisi degli componenti di traslazione. Si utilizza, perciò, una diversa disposizione illustrata in figura 2.7.

La struttura viene illuminata da due fasci aventi differente angolo di inclinazione, rispetto alla direzione di osservazione. Di conseguenza un fascio serve come riferimento per l'altro ed il movimento dell'oggetto varierà la fase

di entrambi: come al solito si effettueranno due acquisizioni. La variazione di fase dei due campi speckle relativi alle due misure è:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_{i1} - \cos \theta_{i2}) w$$

dove θ_{i1} e θ_{i2} sono gli angoli di inclinazione dei due fasci che illuminano il modello. La componente di spostamento fuori dal piano risulterà essere:

$$w = \frac{n\lambda}{(\cos \theta_{i1} - \cos \theta_{i2})}$$

da cui si nota che, scegliendo opportunamente gli angoli di incidenza dei due campi, si può variare la sensibilità, arrivando ad avere delle distanze tra le frange anche di alcuni millimetri, quando la differenza tra gli angoli è piccola.

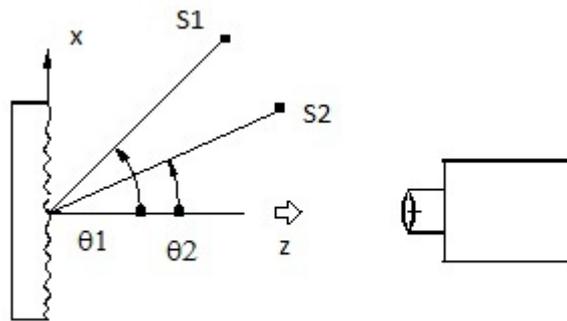


Figura 2.7 – Disposizione a due fasci con diversa inclinazione

Si considerino ora le misure di spostamenti nel piano: la configurazione utilizzata è illustrata in figura 2.8. La struttura in esame è illuminata da due fasci di luce coerente ugualmente inclinati di un angolo θ rispetto alla direzione di osservazione e si effettua sempre una doppia acquisizione. Con questa disposizione i due campi speckle, ognuno formato da un fascio, interferiscono, cioè per ogni punto del modello ci sono due onde provenienti dalle due sorgenti che interferiscono tra loro, formando poi il campo risultante sul piano immagine.

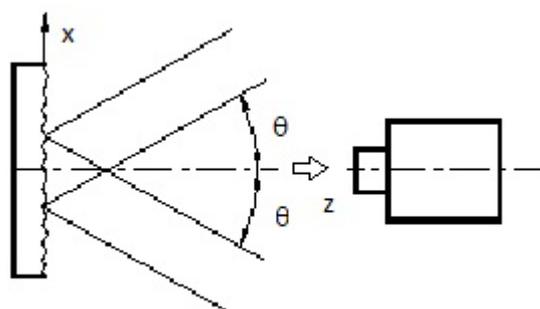


Figura 2.8 – Disposizione a due fasci con inclinazione simmetrica

Quando il modello si muove, lo spostamento dei suoi punti causa una variazione di fase tra i due campi, come nei casi precedenti: ora, grazie alla particolare configurazione, la variazione di fase è:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} u \sin \theta$$

dove u è la generica componente di spostamento sul piano (in questo caso lungo l'asse x), mentre il contributo di quella fuori dal piano scompare grazie al set-up usato. Al solito si ricava tale componente in relazione all'ordine di frangia:

$$u = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

Il metodo è utilizzabile per piccoli spostamenti e la sensibilità può essere cambiata variando l'angolo di incidenza. Inoltre, ruotando il modello o l'interferometro di 90° , è possibile determinare la componente di spostamento anche lungo l'asse perpendicolare a quello in esame, dal momento che gli speckle relativi sono completamente indipendenti.

Come visto, si ottengono delle frange di interferenza in seguito a spostamenti del modello. Una criticità dell'interferometria speckle è quella di essere sensibile ad eventuali vibrazioni, quindi necessita di adeguato isolamento da esse. Inoltre le frange ottenute non sono così brillanti e con risoluzione elevata come quelle ricavati da altri metodi o con la fotografia speckle. Per evitare questo, oltre ai metodi digitali che verranno descritti più avanti, si adottano particolari filtri che, come detto in precedenza, permettono di isolare certe frange relative a componenti di spostamento di determinata ampiezza, eliminando, quindi, parte dell'informazione che non interessa. Il

problema principale dell'analisi delle frange di interferenza nate da questo metodo è dovuto all'interpretazione delle sfumature degli speckle impressi sulle lastre fotografiche, che, essendo negativi, forniscono diversi toni di nero. Tale difficoltà viene superata dai moderni metodi digitali.

2.6. Interferometria speckle tipo "shearing"

Le tecniche descritte precedentemente misurano spostamenti superficiali, sia nel piano che fuori da esso. Generalmente, però, si è interessati all'analisi delle deformazioni dei corpi, per poi arrivare a quella delle tensioni tramite relazioni elasto-plastiche, senza passare attraverso la derivazione analitica delle componenti di spostamento che introdurrebbe un'ulteriore fonte di errore. L'interferometria di tipo shearing, detta anche *shearography*, è interessante da questo punto di vista, perché l'informazione sperimentale è legata, invece che agli spostamenti, alle loro derivate, quindi alle deformazioni. In base al set up utilizzato è possibile determinare le componenti della rotazione o le deformazioni.

In questo tipo di interferometria l'oggetto è illuminato con un fascio di luce coerente. Provocando in modo opportuno lo spostamento dell'immagine, nel punto del piano immagine si ha l'interferenza tra i campi speckle provenienti da due punti vicini P_1 e P_2 distanti tra di loro della quantità δx . Come nelle altre tecniche di interferometria speckle, si effettuano due acquisizioni ad oggetto scarico e quindi ad oggetto carico.

Lo spostamento delle immagini si può ottenere con diverse tecniche. La figura 2.9 mostra lo spostamento delle immagini ottenuto con un interferometro tipo Michelson, in cui uno dei due specchi è leggermente ruotato rispetto alla direzione normale.

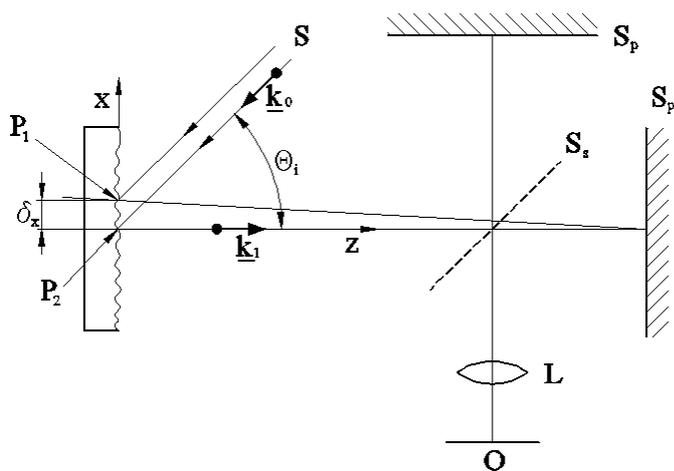


Figura 2.9 – Interferometria speckle tipo shearing: set up basato su di un interferometro tipo Michelson per lo spostamento delle immagini

Lo stesso effetto (Figura 2.10) si ottiene ponendo di fronte alla parte superiore della lente della fotocamera un prisma ottico.

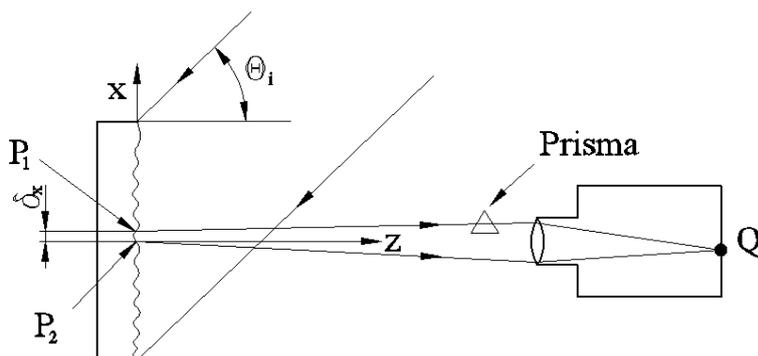


Figura 2.10 – Interferometria speckle tipo shearing: set up basato sull'impiego di un prisma per lo spostamento delle immagini

Si nota come nel punto Q del piano immagine si sovrappongono e quindi interferiscono i campi speckle provenienti dai punti P_1 e P_2 distanti tra di loro della quantità δx . Si analizza nel seguito come sia possibile ottenere le derivate degli spostamenti in riferimento all'ultima configurazione illustrata.

L'oggetto è illuminato in luce coerente con un angolo di incidenza θ_i e quando i raggi passano attraverso la lente del dispositivo di osservazione, risultano divisi lateralmente dal prisma ottico; in altre parole la fotocamera registra l'interferenza tra campi speckle provenienti da punti vicini dell'oggetto. La differenza delle variazioni di cammino ottico generate in seguito alle due acquisizioni è data da:

$$\Delta = \left[(1 + \cos \theta_i) \frac{\partial w}{\partial x} + \sin \theta_i \frac{\partial u}{\partial x} \right] \delta x$$

l'equazione dell'interferenza è legata alle frange distruttive e costruttive, in particolare si ha una frangia scura ogni volta che:

$$\Delta = n\lambda$$

di conseguenza

$$\left[(1 + \cos \theta_i) \frac{\partial w}{\partial x} + \sin \theta_i \frac{\partial u}{\partial x} \right] \delta x = n\lambda$$

La relazione precedente mostra che l'ordine di frangia n dipende sia dalla componente della rotazione, sia dalla deformazione. Con opportune configurazioni del sistema di analisi è possibile separare la rotazione dalla deformazione.

Se si illumina il modello con un fascio ad incidenza perpendicolare ($\theta_i = 0$), si elimina la dipendenza dalla deformazione. In tal caso è possibile ricavare un insieme di frange dopo la doppia esposizione, che forniscono informazioni sulle rotazioni dell'oggetto. Infatti nell'equazione precedente rimane:

$$\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{n\lambda}{2\delta x}$$

Ripetendo l'esperienza con una rotazione relativa tra oggetto e rivelatore di 90° è possibile determinare la componente di rotazione relativa alla direzione y .

Isolare la componente relativa alla sola deformazione risulta un po' più complicato. Infatti non è possibile farlo se si utilizza una sola direzione di illuminazione. Bisogna quindi fare due analisi di interferometria di tipo shearing con due sorgenti diverse, come nella misura delle componenti di spostamento dell'interferometria speckle. I due angoli dei fasci di luce devono essere uguali ed opposti, così nell'equazione rimane, facendo la differenza dei cammini ottici, solamente la deformazione:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\lambda}{2\delta x} \frac{n_1 - n_2}{\sin \theta_i}$$

dove n_1 e n_2 sono gli ordini di frangia corrispondenti ai due diversi campi illuminanti.

Un secondo metodo di tipo shearing è quello detto "sfuocato". L'oggetto da studiare è illuminato da un fascio di luce coerente che vi arriva con un certo angolo di incidenza come in figura 2.10. In questo caso si sfrutta tutta

l'apertura della lente senza l'interposizione di alcun prisma, inserendo, però, un piatto fotografico posto a piccola distanza dal piano immagine, esponendolo doppiamente, a modello indeformato e deformato.

Il principio sul quale ci si basa è il seguente: le due immagini dell'oggetto saranno coincidenti sul piano immagine, ma lateralmente separate nella direzione x della figura precedente: tale distanza è proporzionale a quella tra i due piani ed inversamente a quella tra il piano immagine e la lente. Tutto questo fa sì che i raggi che provengono da punti vicini del corpo in esame interferiscano nel piano di "sfocatura". L'interferenza risultante è un insieme di righe perpendicolari alla linea che congiunge i centri di apertura della lente. Tali righe si muovono con la deformazione dell'oggetto e, aggiungendole a quelle registrate a sistema indeformato, si formano delle frange che seguono le stesse equazioni viste nella tecnica precedente e che sono riconducibili al metodo Moiré, per cui, per la loro interpretazione, si utilizzerà un filtro di Fourier come quello visto nella fotografia speckle.

I metodi di tipo shearing non richiedono particolare isolamento dalle vibrazioni, ma la qualità delle frange non è molto elevata. Non è neppure possibile variare la sensibilità della misura, mentre sono ancora valide le limitazioni dovute alle dimensioni focali delle lenti utilizzate, che si traducono nella necessità di avere spostamenti di piccole dimensioni.

2.7.ESPI

L'uso del mezzo televisivo per l'acquisizione, così come l'elaborazione al computer delle immagini, hanno rivoluzionato i metodi ottici nella metrologia.

Le tecniche che sono state descritte in precedenza non hanno portato a sviluppi consistenti in campo industriale e di ricerca. Questa mancanza è data principalmente da problemi di stabilità, la necessità di un processo di elaborazione fotografico e di un post-processing e le difficoltà incontrate nell'interpretazione da parte di personale con poca esperienza in ottica. L'attuazione e l'elaborazione sono particolarmente problematiche, dal momento che aumentano il tempo richiesto per completare gli esperimenti.

Per queste ragioni è stato naturale passare dalla fotografia all'uso televisivo, oltre ad utilizzare segnali elettronici e tecniche computerizzate per generare le frange di interferenza. Questa tecnica è chiamata *Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)*.

Nell'interferometria speckle non è necessario ricostruire il campo che ha dato origine al pattern registrato, ma è sufficiente correlare tra loro le distribuzioni ottenute in diversi stati dell'oggetto, quindi si deve solamente immagazzinare le informazioni che sono contenute nel campo: si può di conseguenza utilizzare un qualunque metodo che consenta una registrazione fedele dell'intensità del campo oggetto. A tal scopo sono impiegati telecamere che forniscono, almeno nei modelli più recenti, direttamente segnali digitali in uscita dopo l'acquisizione, oltre a calcolatori e programmi sempre più potenti e versatili.

L'ESPI dà la possibilità di correlare i campi speckle in tempo reale durante l'analisi sperimentale, mostrando le frange risultanti direttamente su monitor, senza dovere ricorrere ad una lunga e costosa interpretazione delle lastre fotografiche. Inoltre il suo successo nell'industria è dovuto anche al fatto che è maggiormente indipendente dalle vibrazioni, perché solamente 1/30 di secondo è necessario per registrare il pattern speckle, per cui non necessita di banchi antivibranti. Ovviamente non serve più nessuna camera oscura per le fotografie: un calcolatore è usato per tutto il processo, per il calcolo degli spostamenti e per fornire i risultati sperimentali in forma grafica.

Ci sono diverse disposizioni ottiche quando si considerano i sistemi elettronici. Una delle più utilizzate è quella con il fascio di riferimento come quello sfruttato nell'interferometria speckle per il calcolo degli spostamenti fuori dal piano (figura 2.6). L'immagine dell'oggetto in esame, illuminato con luce laser, viene raccolta mediante una telecamera sul cui CCD (charge coupled device) viene inviato anche il campo di riferimento e poi osservato su un monitor TV. Se si memorizza una immagine digitalizzata come immagine di riferimento e la si confronta con le immagini successive, si ottiene una interferenza elettronica tra le immagini. Come detto sopra, le frange nascono proprio da questa interferenza elettronica che viene processata dai vari sistemi

video e software, per cui la registrazione consta solo nell'immagazzinare i campi speckle durante la sperimentazione.

I sistemi video ed informatici usati comprendono la videocamera digitale, il processore di segnali, una memoria ed un monitor. Lo scopo del set-up è di ottenere frange con la massima visibilità possibile e parallelamente ridurre al minimo i disturbi elettronici e quelli ad alta frequenza. Un occhio di riguardo è posto anche nei confronti dei costi, in quanto il laser ha prezzi abbastanza elevati che crescono con la potenza richiesta in uscita, quindi sarà necessario ottimizzare la sensibilità del sistema.

La parte più sensibile dell'elaborazione del segnale, per quello che riguarda la rimozione dei disturbi, è al primo stadio dell'amplificazione del segnale video, che viene poi portato all'amplificatore della videocamera. Di conseguenza tutta questa sezione del set-up sperimentale deve essere attentamente progettata.

Nei moderni sistemi ESPI vengono utilizzate videocamere CCD perché hanno un alto grado di linearità, bassi disturbi a basse intensità luminose, elevate possibilità di amplificare il segnale e una risposta spettrale a circa $0.6\mu\text{m}$. La risoluzione verticale e orizzontale della stessa è determinata dal numero di pixel che nei video standard utilizzati è di solito fissato.

Un sistema video converte quindi un'immagine formata sul piano di analisi della telecamera in un'equivalente immagine sul monitor TV. La relazione presente tra queste due immagini è una complicata funzione del processo elettronico così come dei controlli di luminosità e contrasto del monitor. Nell'analisi delle frange di correlazione presentate sui video sarà assunto che l'uscita della videocamera sia proporzionale all'irradiazione dell'immagine e la luminosità del monitor sia proporzionale alla potenza di uscita.

Le frange di correlazione speckle nel metodo ESPI sono osservate attraverso un processo di segnale video che si basa sulla loro sottrazione od addizione, oppure una combinazione delle due.

Nel metodo di sottrazione il segnale video che corrisponde al campo speckle del piano immagine dell'oggetto indeformato è immagazzinato elettronicamente nella memoria RAM del computer. L'oggetto subisce poi il campo di spostamenti che, nell'analisi sperimentale delle tensioni, nasce in

seguito ai carichi meccanici o termici applicati, ed il segnale video ripreso dal vivo dal CCD è sottratto dalla figura precedente. Le aree delle due immagini dove il campo speckle rimane costante daranno un segnale risultante nullo, mentre quelle dove è avvenuto un cambiamento daranno segnali diversi da zero.

Per comprendere la formazione delle frange si possono considerare le intensità prima e dopo il campo di spostamenti ed i corrispondenti segnali in uscita dalla videocamera a loro proporzionali. Eseguendo l'operazione di sottrazione, il segnale risultante avrà valori positivi e negativi e il monitor televisivo presenterà la parte negativa del segnale come aree scure. Per evitare questa perdita di informazione l'output della telecamera, dopo l'operazione sopradetta, è rettificato prima di essere proiettato sullo schermo. La luminosità dello stesso è proporzionale al valore assoluto del segnale di tensione e, di conseguenza, varierà tra un massimo e un minimo proporzionale, a sua volta, alla variazione di fase delle intensità luminose in entrata nel sistema, quindi in ultima istanza, alle frange di correlazione. Il segnale viene poi filtrato per migliorare la visibilità delle frange rimuovendo il disturbo a bassa frequenza. In questo metodo sofisticati programmi possono essere utilizzati per elaborare i dati, calcolare le informazioni desiderate e visionarle graficamente sullo schermo.

Nella tecnica additiva i due campi di luce corrispondenti ai due stati di acquisizione del modello in esame sono sommati sul piano immagine della videocamera. La tensione in uscita dalla videocamera sarà proporzionale a tale intensità risultante. Questa tecnica è sfruttata soprattutto per l'osservazione delle frange che nascono in seguito alle vibrazioni applicate ai modelli. Quando due campi speckle sono sommati le aree di correlazione massima avranno massimo contrasto; mano a mano che tale correlazione diminuisce, si attenua anche il contrasto relativo, arrivando ad un minimo che è diverso da zero quando l'interferenza è completamente distruttiva. Questo fatto può essere dimostrato in termini matematici calcolando le intensità luminose che, come nel metodo sottrattivo, sono proporzionali al segnale di uscita della videocamera. Quando la somma dei due campi di macchie è direttamente mostrata sullo schermo, l'intensità media è costante e la variazione di

correlazione è rappresentata da una variazione del contrasto ma non delle intensità. La componente continua del segnale viene perciò rimossa tramite filtraggio ed il segnale è poi rettificato: la luminosità risultante del monitor può essere nuovamente considerata proporzionale alle frange che nascono dall'interferenza degli speckle e presenta un andamento che varia tra un massimo ed un minimo.

Il confronto tra i due metodi mostra che le frange di minimo ottenute per sottrazione corrispondono alle frange di massimo ottenute per addizione. Nella prima tecnica le frange stesse hanno migliore visibilità che nella seconda perché il campo contiene intensità nulla; il metodo additivo è però usato in quelle analisi nelle quali una memoria video non è richiesta, di conseguenza, risulta molto interessante nell'analisi modale delle vibrazioni anche se la risoluzione non è delle migliori.

L'interferometria speckle elettronica si è sviluppata fino a diventare un'importante tecnica che ha potenziali applicazioni in molte aree della metrologia scientifica ed ingegneristica. I suoi vantaggi sono unici, anche se esistono delle limitazioni al metodo: l'ESPI non è un sostituto dei metodi basati sulla fotografia speckle, ma è un forte aiuto all'insieme di strumenti dell'analisi sperimentale per la risoluzione di particolari problemi di misura. Alcuni dei suoi vantaggi sono:

- velocità, permettendo agli analisti di ottenere indagini a tutto campo completamente sviluppate in pochi secondi;
- il metodo non richiede l'ambiente altamente stabile necessario nell'interferometria speckle convenzionale;
- il sistema può essere utilizzato in condizione di elevata illuminazione: nessuna camera scura è necessaria durante l'acquisizione dei dati o l'elaborazione;
- dal momento che nessuna pellicola ed elaborazione della stessa sono necessarie, il costo per l'esperimento è molto basso e potenziali problemi di sicurezza sono ridotti;
- personale con poca conoscenza dei metodi ottici può utilizzare il sistema;
- le capacità uniche dal punto di vista sperimentale fanno sì che il metodo sia il solo che possa essere sfruttato in determinate situazioni.

Per quanto riguarda i limiti del campo di misura del metodo ESPI, si parla di:

- sensibilità ridotta: non è possibile rilevare frange al di sotto di valori di risoluzione caratteristici della videocamera; questa restrizione limita il gradiente di spostamento che può essere osservato. La visibilità delle frange ottenuta usando il metodo ESPI per osservare le vibrazioni fuori dal piano decresce perciò rapidamente con l'aumentare della loro entità.
- l'area massima che può essere ispezionata durante un singolo rilevamento è limitata dalla potenza disponibile del laser e dalle disponibilità della videocamera. Anche se si ha sufficiente potenza, la stabilità meccanica del sistema e la coerenza temporale del laser riducono le prestazioni del metodo. Per osservare frange su piccole aree di corpi con elevata estensione, una forza di deformazione relativamente alta deve essere applicata e questo fa nascere moti di corpo rigido che causano le correlazioni degli speckle e quindi una riduzione nella visibilità delle frange stesse.
- è stato assunto che la superficie sotto esame non cambia microscopicamente durante le misure: se essa viene alterata da ossidazione, ricristallizzazione o altri eventi, allora risulterà una decorrelazione del campo speckle. Inoltre la natura rugosa della superficie può portare ad un'elevata dipendenza dello stesso da essa: questo avviene in molti materiali come carta, cartone e molte sostanze organiche. Tutto ciò porta ad avere un effetto di diffusione maggiore rispetto a quello che si ha in un normale campo speckle, quindi per far sì che la superficie sia uniformemente diffondente e utile per una rilevazione attraverso i comuni interferometri che utilizzano la tecnica ESPI, si procede molto spesso a ricoprire il modello con uno strato di vernice bianca come quella utilizzata nel metodo speckle a luce monocromatica.

2.8. Interferometria speckle a variazione di fase

La disponibilità delle tecniche di acquisizione ed elaborazione automatica delle immagini ha permesso lo sviluppo di una tecnica che si utilizza per migliorare la precisione, la convenienza e l'utilità di tutte le tecniche interferometriche. Nonostante i principi base del metodo siano noti sin dai primi utilizzi della fotoelasticità, solamente con l'avvento di potenti computer e migliori tecnologie di elaborazione digitale di immagini si è reso possibile applicare tale tecnica con successo all'analisi sperimentale. In particolare il metodo a variazione di fase qui illustrato è utile nell'interferometria speckle elettronica.

Il frutto di un'analisi sperimentale condotta attraverso metodi ottici è di solito un'immagine di un campo rappresentante un insieme di frange; esso è una mappa di un insieme di fronti d'onda che sono indicativi di qualcosa di utile come per esempio la flessione di strutture, la forma di superfici, le deformazioni superficiali o lo stato di tensione in un oggetto trasparente. Per interpretare tali campi si contano le frange e si moltiplica il loro ordine per alcuni fattori che dipendono dalla lunghezza d'onda, dalla geometria della disposizione sperimentale e dalle proprietà del materiale. Da qui si possono interpolare le frange per ottenere le variabili di interesse in ogni punto del campo rappresentante l'oggetto in esame.

Questo processo è soggetto ad alcune difficoltà, tra cui l'essere lento e troppo elaborato. Spesso ci sono poche frange che permettono una valida interpolazione e l'utilizzo di compensatori o processi ottici quali l'interferometro di Fourier non sono sufficienti a migliorare i risultati. Di conseguenza, con l'avvento della televisione e dei potenti PC, il passaggio all'acquisizione digitale è stato naturale. Questa via non è molto utile se utilizzata allo scopo di sostituire le mansioni svolte dall'essere umano senza sfruttare le potenzialità dei sistemi informatici, ma usandole solo come surrogato del calcolo matematico.

L'approccio moderno è votato quindi all'uso dei sistemi video sfruttandone le caratteristiche di brillantezza ed intensità, oltre alla possibilità di porre in forma digitale e di memorizzare in un computer le informazioni sperimentali in

maniera veloce ed accurata. Il computer può svolgere calcoli ed elaborazioni sulle immagini digitali e visualizzare graficamente i risultati, ma nasce la necessità di ottenere le informazioni volute da un insieme di dati che altro non è che una mappa rappresentante l'intensità luminosa rilevata dal CCD della telecamera. Tale problema è stringente in particolare nei metodi speckle ed è proprio qui che l'idea della variazione di fase viene maggiormente impiegata con successo.

Il funzionamento di base può essere spiegato pensando di fare interferire un campo proveniente dalla riflessione di un'onda di luce coerente dal modello in esame con un fascio di riferimento: sul piano immagine queste onde, interferendo tra loro, creano un insieme di frange che si spostano perpendicolarmente alla direzione del moto che subisce il corpo in esame. Associato ad ognuno dei due stati prima e dopo lo spostamento, si ha in uscita un segnale avente diverse intensità luminose che differiscono tra loro anche di un angolo di fase. Chiamando I_2 e I_1 le due intensità considerate e φ la variazione di fase che nasce nella seconda acquisizione, la relazione matematica tra tali grandezze è:

$$I_2 = \frac{I_{max} + I_1}{2} + \frac{I_{max} - I_1}{2} \cos\varphi_2$$

Questa singola equazione presenta due variabili incognite che sono la variazione di fase e l'intensità massima, quindi si deve effettuare almeno un'altra acquisizione introducendo uno sfasamento in uno dei due fasci che interferiscono di entità nota, per esempio pari a $-\pi/4$. Si avrà un'ulteriore uscita che porta alla seguente equazione:

$$I_3 = \frac{I_{max} + I_1}{2} + \frac{I_{max} - I_1}{2} \cos\left(\varphi_2 - \frac{\pi}{4}\right)$$

Da qui si nota che il problema è ricondotto ad un sistema di due equazioni in due variabili. Dalla variazione di fase così ricavata si risale allo spostamento dell'oggetto.

L'idea è quindi di inserire un variatore di fase che moduli il fascio di riferimento che interferisce col campo oggetto, dando vita così a intensità luminose che permettono di risalire alla differenza di fase tra le varie acquisizioni che, nel caso dell'interferometria speckle, è legata agli spostamenti o alle loro derivate in seguito al passaggio da struttura scarica a struttura carica. Utilizzando, ad esempio, quattro acquisizioni sfasate di 90° l'una rispetto all'altra il valore dell'intensità luminosa rilevato dal CCD è:

$$\begin{aligned} \text{per } \alpha_1 = 0^\circ & & I_1 &= I_0 + VI_0 \cos \varphi \\ \text{per } \alpha_2 = 90^\circ & & I_2 &= I_0 + VI_0 \cos(\varphi + 90) \\ \text{per } \alpha_3 = 180^\circ & & I_3 &= I_0 + VI_0 \cos(\varphi + 180) \\ \text{per } \alpha_4 = 270^\circ & & I_4 &= I_0 + VI_0 \cos(\varphi + 270) \end{aligned}$$

dove I_0 è la somma delle intensità luminose, V è il contrasto delle frange e φ è la differenza di fase. Combinando le relazioni precedenti si ottiene la fase φ che, essendo variabile tra 0° e 360° per la periodicità della funzione tangente, è denominata fase *frazionaria* (o con termine anglosassone *wrapped*) ed indicata con il simbolo φ_f :

$$\varphi_f = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$$

Si passa quindi dalla fase frazionaria alla fase totale utilizzando la procedura di *identificazione (unwrapping)*, tipica dei metodi a variazione di fase, basata sull'eliminazione dei salti che subisce la fase frazionaria.

Nel caso considerato si può operare nel seguente modo:

1. acquisizione ad oggetto scarico. Si acquisiscono quattro immagini sfasate di 90° l'una rispetto all'altra, cioè I_1, I_2, I_3, I_4 .
2. acquisizione ad oggetto carico. Si agisce nello stesso modo, cioè I'_1, I'_2, I'_3, I'_4 .
3. calcolo della fase frazionaria relativa all'oggetto scarico. Si usa la formula che fornisce φ_f .

4. calcolo della fase frazionaria relativa all'oggetto carico. Si agisce nello stesso modo: $\varphi'_f = \varphi_f + \Delta\varphi_f$.
5. calcolo della differenza di fase frazionaria dovuta al carico: $\Delta\varphi_f = \varphi'_f - \varphi_f$; la figura 2.11 mostra un esempio di mappa di fase frazionaria (modulo 2π) relativa alla componente di spostamento orizzontale (u) in un provino soggetto a flessione pura. La mappa si presenta sotto forme di frange che per distinguerle da quelle ottenute con un procedimento di sottrazione diretto di due immagini (*frange di correlazione*), sono di solito denominate *frange di fase*.
6. eliminazione dei disturbi. Si utilizzano opportuni metodi di filtraggio.
7. calcolo della differenza di fase totale. Si usano a tal fine opportuni procedimenti di identificazione (unwrapping). Si ottiene così la variazione totale della fase: $\Delta\varphi = 2\pi n$, dove n è l'ordine di frangia.
8. calcolo della grandezza di interesse. Spostamenti fuori dal piano, nel piano, rotazioni e deformazioni, a secondo della disposizione sperimentale utilizzata mediante le formule ricavate in precedenza e che di seguito si riportano:

Componente fuori dal piano

$$w = \frac{\lambda}{1 + \cos \theta_i} n$$

Componenti nel piano

$$u = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_i} n_x$$

$$v = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_i} n_y$$

Componenti della rotazione

$$\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda}{2} \frac{n_x}{\delta_x}$$

$$\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda}{2} \frac{n_y}{\delta_y}$$

Deformazione

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\lambda}{2} \frac{n_1 - n_2}{\delta x \sin \theta_i}$$

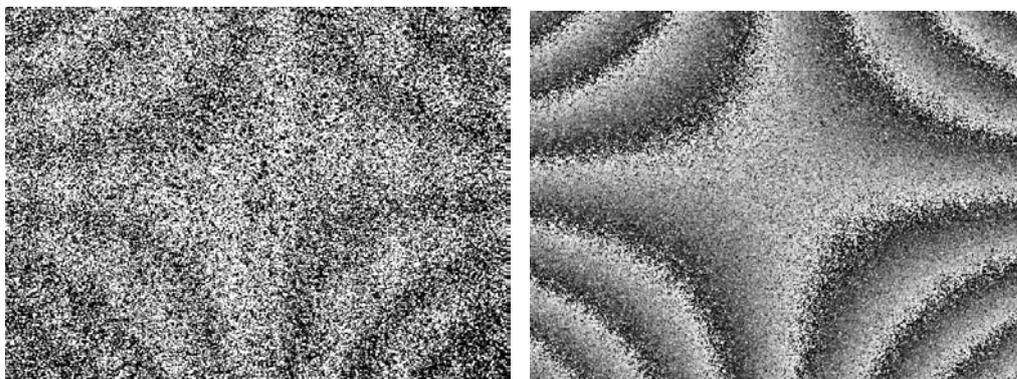


Figura 2.11 - Esempio di frange di correlazione (sin) e frange di fase (des), relative alla componente di spostamento orizzontale u in un provino soggetto a flessione pura

Le disposizioni sperimentali degli interferometri che utilizzano la tecnica a variazione di fase sono molteplici; in ognuna di esse deve essere però presente un dispositivo atto a modulare il salto di fase tra il fascio di riferimento ed il campo oggetto proveniente dal modello. Ciò può essere ottenuto muovendo opportunamente uno specchio, una griglia o ruotando un polarizzatore. La più comune disposizione presenta uno specchietto montato su un trasduttore piezoelettrico che, muovendolo, inserisce lo sfasamento voluto. La figura 2.12 mostra un comune settaggio per la misura degli spostamenti nel piano.

La luce proveniente dal laser viene divisa in due fasci che, deviati in modo opportuno da alcuni specchi, illuminano simmetricamente l'oggetto. In uno dei due fasci sono inseriti un prisma che serve ad eguagliare i cammini ottici dei due fasci (requisito di coerenza spaziale) ed un trasduttore piezoelettrico (PZT = piezo-electric transducer) che, spostando uno specchio, introduce la variazione di fase di un fascio rispetto all'altro. Prima di arrivare sull'oggetto i due fasci sono espansi mediante due obiettivi da microscopio e quindi resi paralleli mediante due lenti convergenti (i raggi paralleli assicurano che l'angolo di incidenza sia costante in tutti i punti dell'oggetto). L'immagine viene acquisita mediante una telecamera (indicata con il simbolo CCD = charged coupled device). Le immagini acquisite sono quindi registrate nella

ricavati diversamente con strutture che vengono attaccate alla superficie del modello, anche se a volte ciò non è strettamente necessario se la superficie presenta un aspetto particolarmente rugoso. Un esempio usuale è quello di ricoprire la superficie dell'oggetto con vernice riflettente: essa consiste in piccole sfere di vetro affogate in un'emulsione che producono punti di luce molto brillante quando fotografata da una posizione vicina alla direzione di illuminazione, mentre nel caso di superfici ruvide si illumina con un angolo piccolo cosicché i picchi e le valli creano delle ombre che possono essere utilizzate come surrogato del campo speckle. Le sfere rappresentano una distribuzione casuale di punti che contengono un'insieme di frequenze limitato dalle dimensioni delle stesse. Comunque, se tali corpi sono di piccole dimensioni, o se si fotografa da sufficiente distanza, la più alta frequenza è limitata solamente dalla risoluzione della camera di ripresa, come nella tecnica laser. Ovviamente bisognerà creare un campo random di sfere sulla superficie dell'oggetto e ciò si può ottenere spruzzando vernice nera su sfondo bianco o viceversa.

Anche in questo caso è possibile parlare di osservazione oggettiva e soggettiva, puntualizzando che per parlare della prima vi sarà la necessità di posizionare la pellicola di ripresa direttamente in contatto con la superficie in esame.

Il principio su cui si basa questo metodo è lo stesso della fotografia speckle, con la puntualizzazione che le macchie sono in questo caso più larghe rispetto a quelle che nascono con l'uso di sorgente di luce coerente ed anche in numero minore: l'analisi a tutto campo che ne scaturisce produce risultati di qualità inferiore. Si possono sfruttare per l'interpretazione dei campi sia le frange di Fourier che di Young, utilizzando le stesse equazioni e settaggi: una volta registrato il campo di macchie, si possono, cioè, ricostruire le frange di interferenza con un laser attraverso le due tipologie dette, anche se è possibile usare anche una sorgente di luce bianca per la stessa osservazione. Se si propende per quest'ultima scelta, è però necessario utilizzare un filtro passa banda per eliminare l'effetto arcobaleno che si crea con l'uso di luce monocromatica, che sfuoca le frange e rende difficile la loro individuazione.

La maggiore differenza con la tecnica a luce coerente è che la struttura a macchie è fissata sulla superficie dell'oggetto, non nello spazio come accadeva precedentemente; di conseguenza i requisiti nei confronti di ottiche di alta qualità sono più forti. Si dovranno avere fotocamere aventi lenti a grande apertura e parimenti, specie per misure su superfici curve, con grandi lunghezze focali per determinare il campo su tutta l'area del modello.

Queste problematiche sono diminuite grazie all'uso delle moderne fotocamere e videocamere, oltre all'impiego di disposizioni particolari che utilizzano specchi che focalizzano l'immagine di tutto il campo speckle sulla lente di ripresa: per questo motivo la fotografia speckle in luce bianca è molto utilizzata soprattutto in ambiente industriale, dove si apprezza anche il vantaggio che presenta tale tecnica di poter essere usata su oggetti che, per grandezza o posizione, non possono essere illuminati dal laser.

2.10. Altre applicazioni

Oltre al rilievo sperimentale di componenti di spostamento e di deformazioni, ci sono anche altri campi dove i metodi speckle vengono utilizzati.

Uno di questi è la misura della rugosità delle superfici, che è di significativa importanza in molti campi dell'ingegneria. La tecnica standard impiegata in questo settore è quella che utilizza il profilometro meccanico, dove una punta molto piccola di diamante viene messa in contatto con la superficie da analizzare. La forza che la tiene sul profilo è molto piccola per non danneggiare il corpo in esame e, seguendo l'estensione delle superficie, si ha in uscita un segnale elettrico che è proporzionale ai picchi ed agli avvallamenti rappresentanti la rugosità. Nonostante questo processo sia estensivamente usato nell'analisi, presenta alcuni inconvenienti che a volte possono portare a preferire altri metodi; infatti due sono i principali difetti presenti: si possono avere danneggiamenti superficiali, in quanto è una tecnica di contatto, oltre ad ottenere una misura solamente della altezza media delle deviazioni superficiali, indipendentemente dal gradiente locale di rugosità

superficiale, cioè non si riescono a discriminare gli effetti locali. Dall'avvento del laser, quindi dallo sviluppo sperimentale del fenomeno speckle, molti scienziati hanno studiato le proprietà statistiche dei campi a macchie, arrivando a determinare vari utilizzi e configurazioni degli interferometri per la misura della ruvidezza. Tutto questo ha reso disponibile un metodo alternativo per tale misurazione, che ha le proprietà di essere non distruttivo, senza contatto ed applicabile in molte circostanze e per molti oggetti, facendo sì che lo sviluppo anche industriale della tecnica speckle in questo campo avesse potenziali elevati di crescita. Per concludere si osserva che le varie tecniche hanno sensibilità diverse con diversi range di misura, per cui sono utili, per le loro caratteristiche, in base alla rugosità stimata del corpo in esame

Un ulteriore utilizzo è quello che permette l'osservazione dei cambiamenti di forma di un corpo. Si sfrutta la disposizione sperimentale che presenta due fasci di luce coerente ed il metodo è particolarmente utile se si impiegano le moderne tecniche ESPI. Ad esempio si possono effettuare analisi dal vivo e continue su prodotti dell'azienda manifatturiera per il controllo di qualità. La differenza di forma tra un oggetto ed un modello di riferimento è visualizzata su uno schermo in forma di frange aventi distanze costanti tra loro e rappresentanti differenze intere di lunghezze d'onda dei fasci che illuminano il corpo in esame. Le tecniche che sommano o sottraggono le intensità luminose, viste nel capitolo relativo all'interferometria elettronica, vengono utilizzate per visualizzare le eventuali differenze di forma, grazie anche all'aiuto offerto dagli applicativi presenti sul mercato.

L'effetto speckle fornisce anche un potente strumento per l'analisi delle vibrazioni e, per alcune applicazioni, è più utile delle tecniche olografiche. Le disposizioni sperimentali a tale scopo non necessitano di essere così stabili come per l'olografia ed il metodo è applicabile ad un largo campo di intensità. L'elaborazione in tempo reale è veloce e pratica per le applicazioni ingegneristiche e, soprattutto con le tecniche elettroniche, l'analisi sperimentale fornisce insiemi di frange che rappresentano le intensità delle vibrazioni distribuite lungo tutto il modello e che permettono di individuare le linee nodali. Se il movimento vibratorio è molto veloce, più di un quarto della lunghezza d'onda del laser utilizzato, il contrasto degli speckle diventa molto

scadente, ma si ha il vantaggio che le regioni che rappresentano i nodi delle vibrazioni rimangono visibili, permettendo un'analisi veloce ed efficace.

Nel campo ingegneristico una delle potenziali applicazioni, lungi dall'essere ancora appieno sfruttata, è l'analisi di fratture, distorsioni e cricche che possono essere presenti negli strati superficiali di strutture complesse o estese. Questo metodo non distruttivo è molto utile per superfici rugose, oppure nel caso in cui l'oggetto da analizzare sia molto lontano dal punto d'osservazione oppure difficilmente raggiungibile. Ci si basa sull'impiego di tecniche interferometriche che spesso utilizzano due fasci di luce coerente e tecniche elettroniche per la visualizzazione e l'interpretazione delle frange che nascono dal set-up sperimentale. La loro analisi permette di identificare punti nei quali sono presenti difetti superficiali, come quelli precedentemente accennati ed i moderni software permettono l'estrapolazione di numerose osservazioni, rendendo visibile sullo schermo i dati in numerosi modi, che vanno da semplici grafici bidimensionali che rappresentano spostamenti sul piano, a immagini tridimensionali che ricalcano l'andamento reale della zona dove è presente il difetto.

Con il termine *speckle imaging* ci si riferisce all'ultima tecnica portata ad esempio che sfrutta l'effetto suddetto. Il settore che impiega tali metodi è l'astronomia e il termine di *speckle imaging* si indica una grande varietà di tecniche osservative ad alta qualità basate su varie tecnologie, tra cui la *shift-and-add* (chiamata anche *image stacking*) o l'interferometria a macchie; esse consentono di incrementare notevolmente la risoluzione dei telescopi di terra che altrimenti presenterebbero problematiche relative all'interpretazione dei fenomeni osservati.

L'insieme di tecniche che fanno capo alle disposizioni sperimentali in esame hanno portato ad un vasto numero di scoperte, tra cui migliaia di stelle doppie, che, secondo le osservazioni precedenti, parevano essere stelle singole e le prime immagini di macchie sulla superficie di altre stelle oltre il nostro sole. Gran parte di queste tecniche sono tutt'ora largamente in uso, in particolar modo per fornire immagini dettagliate degli oggetti particolarmente brillanti. Il fine dello *speckle imaging* è quello di ricavare delle immagini a breve esposizione allo scopo di rimuovere gli effetti distorsivi causati dall'atmosfera

che non permettono un'osservazione realistica se non in condizioni eccezionalmente perfette. Infatti la risoluzione limite di un telescopio è direttamente proporzionale alla grandezza dello specchio principale e ciò si nota in modo particolare nelle immagini di oggetti distanti, che appaiono frammentate in piccole macchioline che prendono il nome di dischi di Airy, mentre gli oggetti meno distanti non sono soggetti a questo fenomeno. Questi difetti sono dovuti alle perturbazioni causate dai moti dei gas che costituiscono l'atmosfera, il che fa sì che il disco di Airy si frammenti in una serie di dischi più piccoli, tutti di simili dimensioni, che ricoprono un'area più vasta del precedente disco. Tale frammentazione è dovuta alle irregolarità dell'onda incidente che variano da alcuni centimetri fino ad alcune decine e la cui forma varia rapidamente. Rilevandola con tempi di esposizione brevi, il fronte può essere considerato "congelato" e l'immagine registrata consisterà di un elevato numero di piccoli punti distribuiti casualmente: il campo speckle, appunto. Attraverso l'acquisizione di fronti d'onda successivi e quindi di immagini a macchie, è possibile ottenere frange che forniscono informazioni sulla luminosità delle stelle, sul centro di massa di sistemi di stelle doppie e sulle macchie solari. Con l'uso dei moderni interferometri, che sfruttano i principi illustrati nel presente capitolo, i telescopi più grandi possono visualizzare non solo gli oggetti più deboli, in quanto captano una maggiore quantità di luce e la riflettono in specchi più grandi, ma di visualizzare altrettanto bene anche gli oggetti più piccoli e distanti. Con lo speckle imaging è altresì possibile ricreare l'immagine originale, prima dei disturbi atmosferici, tramite tecniche di fotoritocco.

2.11.Commenti

In conclusione, a parte i sopraccitati esempi che in parte esulano dalla trattazione in esame, gli speckle possono essere efficacemente utilizzati per le misure di deformazioni e spostamenti. L'interferometria e l'utilizzo della tecnica detta shearography offrono infatti rispettivamente la possibilità di rilevare spostamenti superficiali e deformazioni.

Questi metodi sono superiori a quelli che sfruttano i principi Moiré, in quanto non necessitano di griglie sulla superficie dell'oggetto ed hanno una sensibilità superiore. Inoltre hanno i seguenti vantaggi nei confronti dell'interferometria olografica: ad eccezione del metodo con due fasci, non necessitano di isolamento dalle vibrazioni ed il requisito di avere un'elevata coerenza temporale della luce in termini di distanza non è pressante, permettendo l'utilizzo di diversi tipi di laser; inoltre si possono ricavare le componenti di spostamento nel piano in maniera indipendente, così come la misura delle deformazioni è diretta e non passa attraverso operazioni di derivazione. Ancora, si può variare la sensibilità in modo altamente controllabile e su un campo esteso ed in ultimo le analisi sperimentali possono essere condotte in ambienti anche ad elevata illuminazione.

Gli svantaggi delle tecniche qui presentate vertono nella poca qualità delle frange ottenute e nei limiti imposti alle rotazioni e agli spostamenti totali che possono essere misurati.

Comunque la tecnica speckle, sia che utilizzi luce coerente che luce bianca, possiede grandi potenziali di sviluppo che possono portarla ad essere uno strumento sempre più utile nella metrologia e nei metodi di indagine industriali.

Capitolo 3

Metodi a correlazione di immagini digitali

3.1. Introduzione

Le misure di spostamenti e deformazioni sono sempre state importanti in molti campi dell'analisi sperimentale, sia per la loro determinazione, sia per ricavare lo stato tensionale di oggetti, le caratteristiche di un certo materiale, la valutazione delle vibrazioni o la ricerca di altri parametri. I metodi ottici come la fotoelasticità, le tecniche Moiré, l'interferometria olografica, sono molto utili nell'indagine a tutto campo di tali grandezze, soprattutto nei metodi punto per punto che fanno largamente uso di estensimetri. I risultati delle indagini a tutto campo constano in una grande mole di dati, la cui analisi manuale è tediosa e laboriosa, portando a tempistiche non applicabili ai ritmi richiesti dalle moderne indagini scientifiche ed industriali; inoltre l'analista compie un esame soggettivo dei risultati ottenuti, quindi l'esperimento paga anche questo ulteriore limite.

Con lo sviluppo e la disponibilità di computer sempre più potenti ed a prezzi sempre più concorrenziali, è nata negli anni '80 una tecnica ottica che sfrutta l'aiuto dei calcolatori elettronici per l'acquisizione, la registrazione e l'analisi dei dati sperimentali chiamata anche metodo a correlazione di immagini digitali o DIC (*digital image correlation*).

La tecnica DIC è stata applicata alla misura di spostamenti e deformazioni ed ha il vantaggio di essere un sistema semplice e diretto, che evita la laboriosa interpretazione manuale delle frange d'interferenza; oltre ad essere veloce ed accurata, permette di estrarre informazioni che rischiano di essere soppresse quando sono utilizzati metodi convenzionali. E' particolarmente utile nell'analisi di grandi quantità di dati che diventerebbero ingombranti nei processi manuali e può portare alla creazione di nuovi metodi analitici.

L'utilizzo dei personal computer nella meccanica sperimentale risale già agli anni '60, ma dopo due decenni si iniziarono ad utilizzare schermi televisivi e videocamere per riprendere gli oggetti esaminati. Si passò dalla registrazione di griglie Moiré del modello deformato sovrapponendo griglie elettroniche di riferimento per ottenere una mappa che ne descrivesse il contorno, allo sviluppo di metodi di elaborazione delle immagini per analizzare le frange fotoelastiche. Negli anni sono state sviluppate disposizioni sperimentali ed algoritmi per il rilevamento di spostamenti nel piano, fuori dal piano, vibrazioni e ricostruzione della forma di un corpo: dal 1983 M.A. Sutton e altri stanno lavorando sulla Digital Image Correlation, che prevede l'uso di tecniche digitali sia per l'acquisizione che per l'elaborazione delle immagini. Nella tecnica digital speckle displacement measurement (DSDM), sviluppata a partire dal 1990 da D.J. Chen e i suoi collaboratori, l'autore focalizza la sua attenzione sulla trasformata di Fourier delle immagini deformate e indeformate. L'idea è quella di separare le componenti in ampiezza e fase degli spettri delle immagini per poi ricombinarli. L'ultimo metodo sviluppato negli ultimi anni è stato sviluppato da M. Sjö Dahl, e fa uso del teorema della correlazione per valutare i campioni della funzione di cross-correlazione nei medesimi punti della griglia considerata sull'immagine indeformata.

Quindi lo studio di immagini digitali per l'analisi delle deformazioni è ormai da alcuni anni all'attenzione della comunità scientifica, questo grazie alla possibilità di poter ottenere delle misure senza dover fisicamente interagire con il provino o con il pezzo in esame; si tratta dunque di tecniche non invasive il cui potenziale è estremamente elevato considerando la diminuzione dei costi dei componenti hardware e la crescita delle prestazioni dei processori. Tecniche di post-elaborazione sono largamente usate su immagini a frange generate per effetto moiré, da materiali fotoelastici o metodi interferometrici. Queste metodi hanno un'ottima risposta nel campo delle grandi deformazioni, sono invece poco utilizzabili per le piccole deformazioni in cui si richiede un'accuratezza maggiore.

L'utilizzo diretto delle immagini digitali è stato dunque impiegato proprio per misurare le piccole deformazioni, anche perchè presentano una notevole

praticità unita ad una notevole accuratezza e riproducibilità dei risultati, con diverse strategie ma con un denominatore comune: l'immagine speckle.

Le tecniche speckle sono estremamente interessanti poiché utilizzano l'immagine di un campo random per effettuare l'analisi. Rispetto agli usuali metodi che adottano griglie impresse sulla superficie del materiale (elettroincisione, fotoincisione, etc), le tecniche speckle utilizzano come marker una serie di macchie con dimensione e distribuzione casuale. Nelle tecniche in cui l'effetto speckle viene ottenuto tramite laser, la superficie dell'oggetto si presenta con una struttura granulosa, mentre nel caso di tecniche in luce bianca, che al giorno d'oggi sono le più sfruttate, l'uso di un campo speckle fisicamente esistente sulla superficie rende l'esperienza estremamente più semplice da preparare ed eseguire. Questo infatti, può essere preparato artificialmente verniciando la superficie di bianco e quindi nebulizzando con uno spray una vernice nera, oppure può essere presente sotto forma di una naturale rugosità della superficie da esaminare, che viene fatta risaltare tramite un'adeguata illuminazione radente.

Questo capitolo illustrerà i principi e alcune tra le disposizioni sperimentale della tecnica a correlazione di immagini digitali e mostrerà i componenti utilizzati nell'analisi delle grandezze cercate, riferendosi, come visto, prevalentemente all'utilizzo di campi speckle, la cui creazione e significato sono stati descritti precedentemente.

3.2. Principi di funzionamento

La tecnica di correlazione di immagini digitali si inserisce nell'ambito della più ampia *Computer Vision*, cioè dell'insieme di metodologie che riguardano l'estrapolazione, memorizzazione, elaborazione e presentazione di qualsiasi oggetto attraverso un sistema computerizzato. La DIC consente di determinare spostamenti e deformazioni mediante il confronto delle immagini del componente in esame, acquisite rispettivamente nello stato indeformato e, in seguito all'applicazione del carico, deformato.

Come accadeva nelle tecniche speckle, il tutto può essere applicato al caso piano per la misura delle grandezze relative, ed al caso generale

tridimensionale. Per la spiegazione dei principi sui quali poggia il metodo, si farà riferimento alla prima fattispecie, cioè al caso bidimensionale.

Come accennato, si impiegano due immagini speckle, che sono state catturate dal CCD della videocamera, rappresentative dei due stati suddetti; si parte quindi dall'oggetto e si ottiene un segnale analogico in ingresso. Si utilizza poi un convertitore che lo trasforma in segnale digitale per l'elaborazione successiva, previa memorizzazione su opportuno supporto, e che caratterizza tali figure attraverso differenti livelli di intensità luminosa. Il personal computer compirà poi tutta una serie di operazioni correlando, con l'aiuto di algoritmi, le due immagini e fornirà un segnale in uscita che può essere un file, una visualizzazione sul monitor, oppure una serie di pagine stampate. Un esempio di schema sperimentale per il caso 2D è mostrato in figura 3.1, dove la videocamera è ortogonale al piano oggetto.

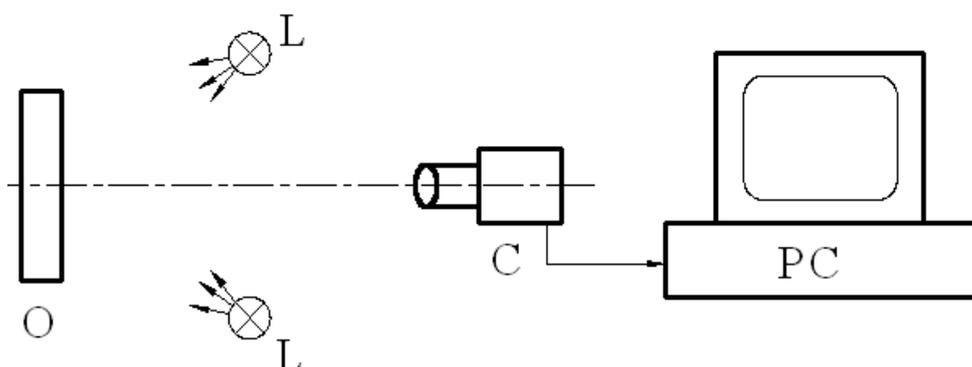


Figura 3.1 – Schema del set-up sperimentale per la tecnica DIC/2D

Le due immagini acquisite dalla videocamera C sono chiamate immagine di riferimento e deformata. Esse vengono digitalizzate e opportunamente paragonate per determinare il campo di spostamenti e deformazioni. In particolare, dopo la loro ripresa, si digitalizza l'immagine e per determinare lo spostamento del generico punto P dell'immagine di riferimento che, a seguito della deformazione, si sposta nel punto P* dell'immagine deformata, si considera:

- nell'immagine di riferimento, la distribuzione dell'intensità luminosa I in un intorno di P

- si ricerca, nell'immagine deformata, quella sub-immagine la cui distribuzione I^* più si avvicina a I
- si determina di conseguenza la posizione del punto deformato P^* , quindi il suo spostamento rispetto a P .

Nel paragonare la sub-immagine di riferimento con quella deformata si tiene conto, in generale, sia degli spostamenti rigidi sia delle deformazioni; a tal fine la seconda viene opportunamente deformata (durante il procedimento di correlazione che si vedrà) utilizzando le formule della meccanica del continuo. Così nella figura 3.2, che si riferisce al caso di un provino soggetto a trazione semplice, il paragone è effettuato tra la sub-immagine di riferimento, che si considera quadrata, e la sub-immagine deformata che qui risulta rettangolare. In generale il paragone è effettuato tra una sub-immagine quadrata e una sub-immagine che, per effetto delle deformazioni e degli scorrimenti, ha la forma di un parallelogramma, cioè nell'ipotesi di piccoli spostamenti

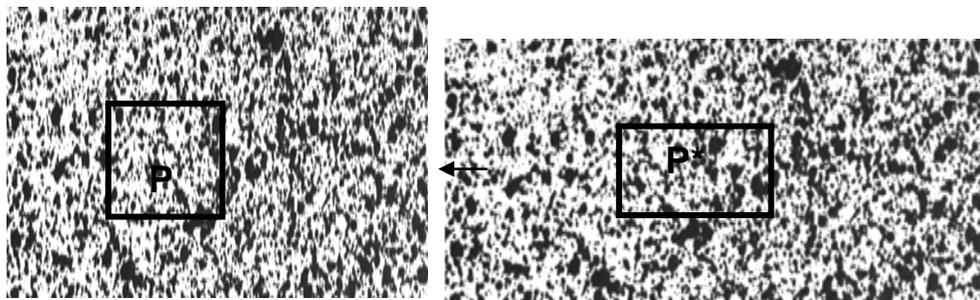


Figura 3.2 - Correlazione tra le immagini di un provino soggetto a trazione: intensità I nell'intorno del punto P appartenente alla sub-immagine di riferimento (sin), intensità I^* nell'intorno del punto P^* appartenente alla sub-immagine deformata (des)

3.3. Elaborazione delle immagini

Le immagini acquisite dal sistema di ripresa sono in forma analogica, quindi devono essere trasformate in digitali, usando un convertitore.

Per digitalizzare un'immagine, la sua luminosità è rilevata in punti detti di campionatura, ottenuti dall'intersezione di linee verticali ed orizzontali con le

quali si immagina di suddividere idealmente la figura in esame. La luminosità di tale insieme discreto di punti, così campionata, formerà una pseudo immagine che non rappresenta più la figura rilevata, ma ne è il rispettivo in segnale digitale.

Uno dei metodi atti a questa operazione utilizza due campi formati da 525 linee che scansionano l'immagine una di seguito all'altra, partendo con un ritardo tra loro pari ad un sessantesimo di secondo; l'intensità di questi segnali di scansione rappresenta la luminosità delle linee che percorrono la figura in maniera continua dall'alto al basso, quindi l'uscita consisterà di un andamento continuo di un'onda elettrica con un certo potenziale che varia. A questo punto entra in gioco il convertitore che trasforma questa quantità in un insieme discreto di dati e li memorizza nei supporti atti a tale scopo. I valori digitalizzati sono chiamati "livelli di grigio" oppure "scale di grigio", perché il voltaggio è alto quando la linea che scansiona l'immagine è sul bianco, mentre è basso quando è sul nero, da qui la denominazione. In un sistema ideale la relazione tra luminosità e segnale elettrico è lineare, ma ciò non accade per i sistemi reali, infatti bisogna considerare la non linearità del sensore dell'immagine e del convertitore digitale: nei moderni mezzi hardware impiegati, una volta stimato il reale andamento delle due grandezze correlate, si può agire a monte, presentando i risultati non affetti dal problema, soprattutto per le condizioni di massimo e di minimo del segnale in corrispondenza delle quali si presentano gli scostamenti maggiori dall'andamento reale.

Dopo la digitalizzazione, l'oggetto è espresso come un'immagine che consiste di valori in corrispondenza dei punti di discretizzazione che sono chiamati pixel: in corrispondenza di ogni pixel si ha un livello di grigio. Il numero totale dei punti varia a seconda della risoluzione desiderata e della capacità di elaborazione del sistema: così per informazioni a 6 bit si hanno 64 pixel, mentre a 12 bit se ne hanno 4096 in direzione orizzontale e verticale. Bisogna considerare anche se la loro dimensione è la stessa, quindi un pixel quadrato fornisce la stessa grandezza nelle due direzioni, risultando essere un'ottima unità di misura. Come detto un maggiore numero fornisce risoluzione più alta e un'immagine più realistica, anche se si aumenterà la

quantità di memoria richiesta dal sistema e la velocità di elaborazione diminuirà. Di conseguenza, in base all'esigenza dell'analisi sperimentale che si vuole fare, si deve ragionare sul migliore compromesso tra questi fattori che deve essere scelto, valutando il fatto che, di solito, la scala di grigio è un valore compreso tra 2 e 256, ricordando che più di 64 livelli sono necessari all'occhio umano per discriminare un'immagine naturalmente. Nonostante questo, molte analisi ingegneristiche sono eseguite con molti meno livelli, sufficienti, però, a fornire le informazioni necessarie. Attraverso software, poi, tali informazioni sono presentate all'operatore sotto forma di dati comprensibili all'occhio umano.

3.4. Correlazione delle immagini

Dopo aver acquisito l'immagine di riferimento e quella deformata utilizzando una telecamera, svolta l'operazione di digitalizzazione delle suddette immagini, si deve rappresentare in maniera continua il livello di grigio che rappresenta l'intensità luminosa per ogni pixel attraverso opportuni metodi di interpolazione. Questa operazione è necessaria per ottenere una stima corretta degli spostamenti e delle deformazioni, soprattutto nell'operazione di confronto delle sub immagini, altrimenti si avrebbero andamenti discreti troppo discordanti se si paragonassero solo i livelli di grigio. I metodi di interpolazione dei valori dei vari pixel che formano l'immagine sono quelli bilineare, bi-cubico e b-spline, esulando da questa trattazione una loro spiegazione e giustificazione dell'uso dell'una o dell'altra tecnica.

Si è visto che per paragonare una qualsiasi sub-immagine di riferimento con quella deformata, si tiene conto degli spostamenti rigidi e delle deformazioni, in modo tale da ipotizzare che la seconda abbia la forma di un parallelogramma: in pratica si applicano le formule della meccanica del continuo trascurando le derivate prime delle deformazioni, quindi nell'ipotesi di piccoli spostamenti. Se ci riferiamo al caso bidimensionale, quindi, il procedimento sopra descritto può essere illustrato in riferimento alla figura 3.3,

considerando nel corpo indeformato un punto P di coordinate x,y . Nel corpo deformato, al punto P corrisponde il punto P^* di coordinate x^*,y^* date da:

$$x^* = x + u$$

$$y^* = y + v$$

dove u,v sono le componenti dello spostamento subito dal punto P nel passare dalla configurazione di riferimento a quella deformata.

Sempre a seguito della deformazione, un elemento rettilineo infinitesimo PQ , le cui componenti nel piano siano dx e dy , si trasforma nel segmento P^*Q^* di componenti dx^* e dy^* che sono legate alle componenti indeformate dx e dy dalle seguenti relazioni:

$$dx^* = dx + u_Q - u_P$$

$$dy^* = dy + v_Q - v_P$$

dove le componenti dello spostamento u_Q e v_Q del punto Q sono legate alle componenti u_P e v_P relative al punto P dalle seguenti relazioni:

$$u_Q = u_P + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy$$

$$v_Q = v_P + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy$$

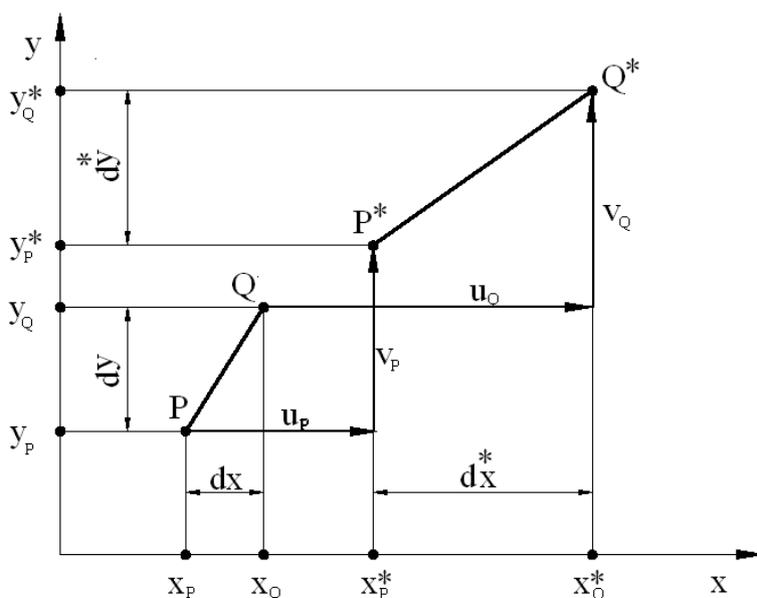


Figura 3.3 - Spostamenti subiti da un elemento lineare: da PQ nel corpo indeformato a P^*Q^* nel corpo deformato

Di conseguenza le relazioni diventano:

$$dx^* = dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy$$

$$dy^* = dy + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy$$

Da queste ultime due si nota come la sub-immagine si deformi in seguito al carico imposto al corpo che è rappresentato. In base a quanti e quali componenti di deformazione sono presenti si avranno diverse forme della sub-immagine deformata, considerando anche che quella di riferimento sia piccola in modo da trascurare le derivate seconde degli spostamenti, che non trasformerebbero quella deformata in un parallelogrammo con i lati rettilinei.

Tornando alla correlazione, le due immagini speckle rilevate una prima e l'altra dopo la deformazione, attraverso l'obiettivo sono proiettate sul sensore di una telecamera CCD interfacciata con una scheda d'acquisizione che è installata direttamente su di un computer.

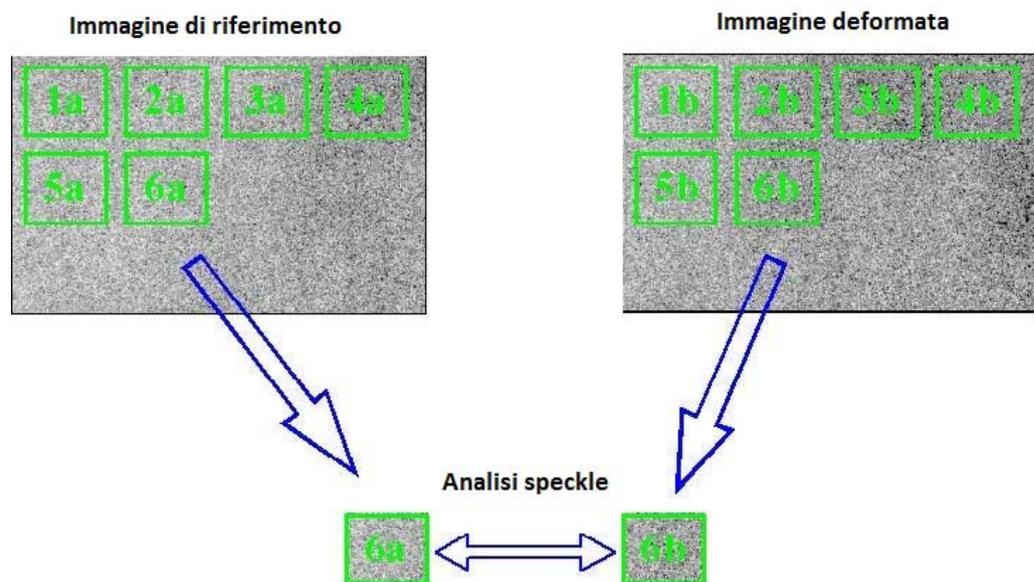


Figura 3.4 – Estrazione di una sub-immagine

Le immagini catturate vengono quindi memorizzate su quest'ultimo come matrici di elementi con valori compresi, ad esempio, tra 0 e 255, a causa del campionamento dei livelli di grigio delle immagini, che può essere pensato ad

otto bit. Successivamente, le immagini memorizzate vengono suddivise in sottoinsiemi, ciascuno dei quali presenta dimensioni di un numero preciso di pixel: ogni coppia di sottoimmagini corrispondenti, viene isolata ed esaminata dall'algoritmo che effettua l'analisi di correlazione, come indicato in figura 3.4.

Con riferimento alle intensità luminose, si consideri nell'immagine di riferimento una sub-immagine centrata nel punto $P(x,y)$ e si indichi con $Q(x+dx, y+dy)$ il generico punto della stessa (figura 3.5).

Le intensità luminose, come sopra definite, nei punti P e Q dell'immagine di riferimento sono:

$$I(P) = I(x, y)$$

$$I(Q) = I(x + dx, y + dy)$$

Analogamente le intensità luminose dei corrispondenti punti P^* e Q^* dell'immagine deformata risultano:

$$I^*(P^*) = I^*(x^*, y^*)$$

$$I^*(Q^*) = I^*(x^* + dx^*, y^* + dy^*)$$

dove le coordinate x^*, y^* sono legate alle coordinate x, y dalle relazioni viste nello spostamento rigido e dove le componenti dx^* e dy^* sono legate alle componenti dx e dy dalle stesse equazioni precedenti.

Supponendo che la deformazione non alteri il valore dell'intensità luminosa deve aversi:

$$I^*(Q^*) = I(Q)$$

Quest'ultima relazione mostra che si tratta di trovare nell'immagine deformata quella sub-immagine deformata la cui distribuzione di intensità luminosa corrisponde a quella della sub-immagine di riferimento: è questo il principio alla base della correlazione digitale. Si trascurano gli effetti del rumore, in quanto trascurabili, soprattutto con l'uso dei moderni filtri.

Si ipotizza la sub-immagine tanto piccola da considerare costanti le derivate degli spostamenti, di conseguenza le deformazioni della sub-immagine sono costanti ed essa si trasforma in un parallelogramma. Le coordinate di Q^* si possono esprimere, tenendo conto delle relazioni precedenti, in funzione dalle componenti di spostamento del punto P e dalle loro derivate rispetto a x e y , cioè:

$$x_Q^* = x_Q + u_p + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_P dy$$

$$y_Q^* = y_Q + v_p + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_P dy$$

dove:

$$dx = x_Q - x_P$$

$$dy = y_Q - y_P$$

La ricerca della relazione che impone l'uguaglianza delle intensità luminose si può anche scrivere, quindi, nel modo seguente:

$$I^*(Q^*) = I^* \left[x_Q + u_p + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_P dy, y_Q + v_p + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_P dx + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_P dy \right] = I(Q) = I(x_Q, y_Q)$$

Bisogna quindi di determinare per ogni sub-immagine le seguenti sei grandezze che compaiono nella relazione:

$$u_p, v_p, \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_P, \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_P, \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_P, \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_P$$

in modo tale che risulti soddisfatta l'uguaglianza delle intensità luminose delle due sub-immagini (deformata e non deformata).

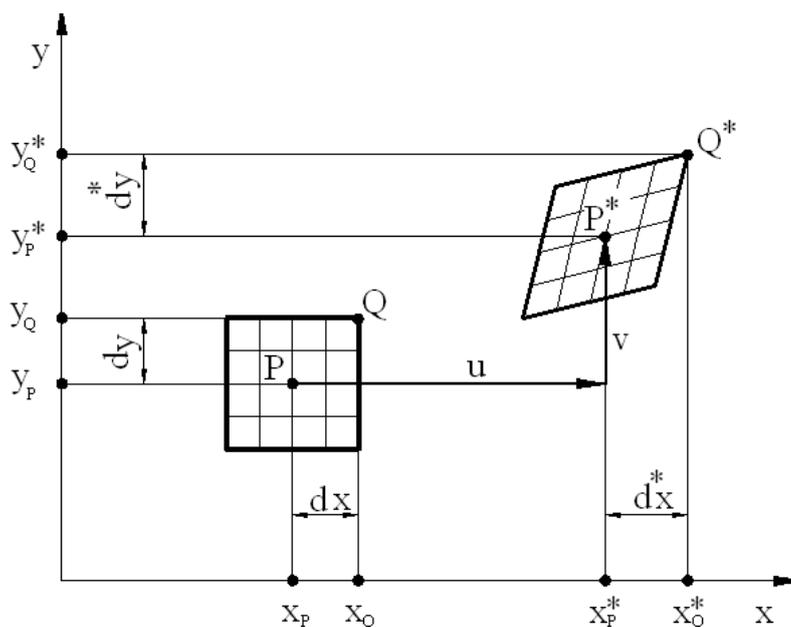


Figura 3.5 – Spostamento e deformazione della generica sub-immagine dalla configurazione indeformata centrata in P a quella deformata centrata in P*

Naturalmente, a causa degli inevitabili errori, l'uguaglianza delle intensità luminose non sarà soddisfatta completamente; per ottenere la correlazione tra sub-immagine di riferimento e sub-immagine deformata bisogna pertanto minimizzare, per ogni sub-immagine centrata in P, una funzione errore definita per esempio come:

$$E_p = \sum_i [I^*(Q_i^*) - I(Q_i)]^2$$

dove i indica il generico punto della sub-immagine centrata in P.

Più spesso si considera il *coefficiente di correlazione normalizzato* definito come:

$$C_p = \frac{\sum_i [I^*(Q_i^*) - I(Q_i)]}{(\sum_i I^*(Q_i^*)^2)^{1/2} \cdot (\sum_i I(Q_i)^2)^{1/2}}$$

Il coefficiente di correlazione varia tra 1 (correlazione completa) e 0 (correlazione nulla); esso, essendo normalizzato, è poco sensibile alle variazioni di intensità luminosa. La funzione da minimizzare risulta pertanto:

$$E_p = 1 - C_p = 1 - \frac{\sum_i [I^*(Q_i^*) - I(Q_i)]}{(\sum_i I^*(Q_i^*)^2)^{1/2} \cdot (\sum_i I(Q_i)^2)^{1/2}}$$

La funzione E_p , che rappresenta quindi la funzione di correlazione cercata, varia tra 0 (correlazione completa) e 1 (correlazione nulla). I valori delle sei grandezze rappresentanti movimenti e deformazioni che minimizzano tale funzione, forniscono la migliore stima degli spostamenti e delle relative derivate, in corrispondenza del punto P.

Esistono diversi algoritmi che calcolano la funzione di correlazione e che quindi permettono di risalire alle grandezze cercate; i più comuni ed utilizzati sono il metodo delle approssimazioni successive (*coarse-fine search*) ed il metodo di Newton-Raphson. Si tratta di procedimenti iterativi basati, di solito, sulla stima iniziale dello spostamento rigido e delle deformazioni, relativi al centro P di una sub-immagine.

Oltre a questi sono allo studio moltissimi procedimenti che cercano di migliorarli e velocizzarli, cercando di non perdere nessuna informazione nell'analisi; si può dire che, oramai, per ogni tipo di studio sperimentale, soprattutto se esso è di grande importanza, si cerca di progettare un metodo che si considera essere il migliore nella circostanza, cercando poi di estenderlo in altri casi, fino alla possibilità di farne un prodotto che possa essere interessante dal punto di vista industriale. In questo studio si cercherà, a titolo puramente esemplificativo, di descrivere per sommi capi il metodo delle approssimazioni successive, per illustrare le varie operazioni che il calcolatore esegue per la determinazione della funzione di correlazione.

In tale procedimento si ricerca inizialmente la correlazione tra sub-immagine deformata e sub-immagine di riferimento considerando la sola traslazione rigida. Successivamente si considera l'effetto delle deformazioni ($\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial y$) e si ricerca la correlazione tra le sub-immagini tenendo conto di entrambe. Infine si ricerca la correlazione delle sub-immagini tenendo sia della traslazione rigida, delle deformazioni e degli scorrimenti ($\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$). Schematicamente la procedura completa è quella di seguito descritta con riferimento alla figura 3.6.

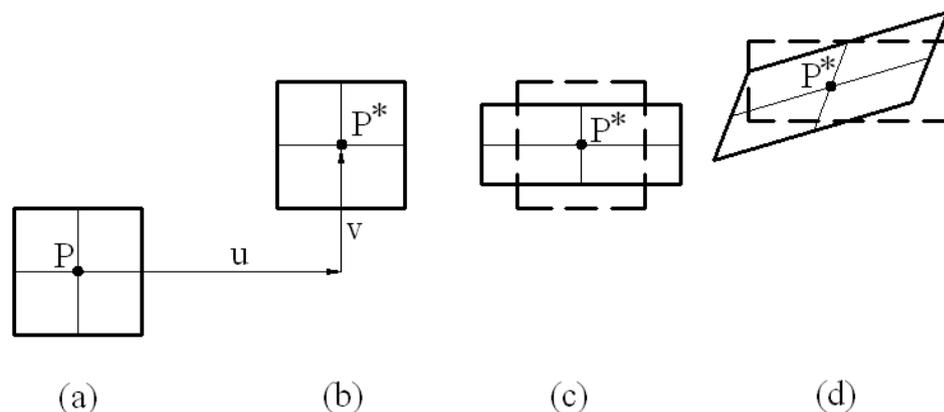


Figura 3.6 - Metodo delle approssimazioni successive: (a) sub-immagine di riferimento, (b) sub-immagine traslata rigidamente, (c) sub-immagine deformata per effetto delle sole estensioni, (d) sub-immagine deformata anche per effetto degli scorrimenti mutui.

Si considera solo la traslazione rigida della sub-immagine centrata nel punto P trascurando le derivate che vengono poste uguale a zero (figura 3.6b); minimizzando quindi la funzione di correlazione determinata alla fine del paragrafo precedente, si determinano le componenti di prima approssimazione

dello spostamento del punto P, indicate con u_I e v_I . Fissati i valori degli spostamenti (u_I e v_I) si considerano le derivate dirette ($\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial y$), che sono quelle che danno il contributo prevalente alle deformazioni normali (figura 3.6c) mentre si considerano nulle le derivate miste ($\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$); minimizzando di nuovo la funzione di correlazione si determinano i valori di prima approssimazione delle derivate dirette, indicate con $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_1, \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_1$. A questo punto, mantenendo costanti i valori $u_1, v_1, \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_1, \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_1$ delle componenti degli spostamenti e delle derivate dirette, si considerano le derivate miste ($\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$), che sono quelle che danno il contributo prevalente agli scorrimenti mutui (Figura 3.6d); minimizzando ancora, si determinano i valori di prima approssimazione delle derivate miste, indicate con $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_1, \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_1$. Si ripete la procedura descritta, considerando gli spostamenti u e v variabili in un intorno di u_I e v_I mentre le derivate si considerano costanti ai valori di prima approssimazione, poi si considerano le derivate dirette variabili in un intorno di $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_1, \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_1$ e le altre grandezze costanti. Infine le derivate miste variabili in un intorno di $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_1, \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_1$ e le altre grandezze costanti.

La procedura continua fino a quando si ottiene la convergenza, cioè la differenza dei valori ottenuti in passi successivi è inferiore ad un valore prefissato. Si ottiene così l'insieme delle sei grandezze, rappresentanti spostamenti, deformazioni e scorrimenti, relative alla sub-immagine centrata nel punto P. La procedura viene quindi ripetuta per le altre sub-immagini in cui è stata suddivisa la superficie del corpo in esame: alla fine, in base al software in dotazione, si ottiene una visualizzazione delle misure effettuate nel corso dell'esperimento.

3.5. Correlazione delle immagini: Stereo Correlation

Il metodo fino a qui esaminato fornisce risultati relativi a casi bidimensionali. La *Stereo Correlation* è un approccio più generale, perché permette di ottenere informazioni tridimensionali su spostamenti e deformazioni, combinando una ripresa da più punti e un'elaborazione che tiene conto dei dati provenienti da essi; si cerca di misurare coordinate di punti relativi a diverse configurazioni, in relazione ad un sistema di riferimento globale. A questo proposito si registrano immagini multiple del modello in esame ricavate da differenti punti di vista e quindi accoppiate con l'utilizzo di algoritmi.

Nel caso tridimensionale si utilizzano due telecamere in modo da osservare l'oggetto da due direzioni differenti (figura 3.7); si ottiene così una visione binoculare simile a quella umana. La tecnica a correlazioni di immagini tridimensionale può essere applicata anche a superfici non piane che subiscono spostamenti fuori dal piano: essa dà informazioni riguardanti sia la forma del corpo, sia il campo di spostamenti in tre dimensioni.

Per ciò che riguarda la forma del corpo si paragonano le sub-immagini corrispondenti riprese dalle due telecamere con il corpo in uno stato di riferimento che può essere, per esempio, quello indeformato, mentre per ciò che riguarda il campo degli spostamenti si paragonano le sub-immagini relative al corpo indeformato con quelle relative al corpo deformato.

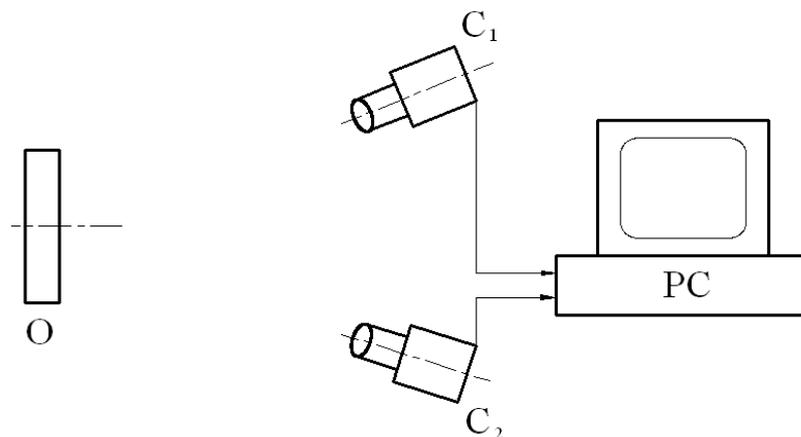


Figura 3.7 - Schema del set up sperimentale per la tecnica DIC/3D
(O=oggetto, C₁ - C₂ =telecamere, PC= personal computer)

La figura seguente mostra, a titolo di esempio, le immagini di un provino soggetto a un certo carico di trazione riprese dalle due telecamere.

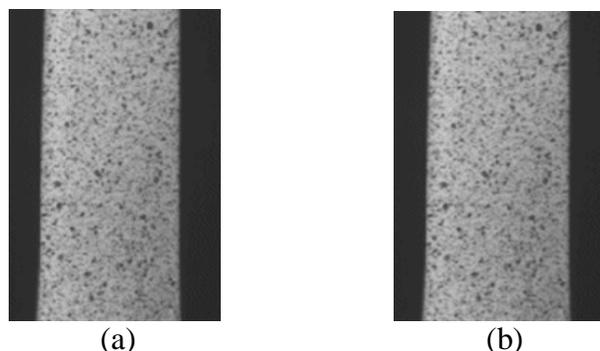


Figura 3.8 – Immagini di un provino, ad un certo livello di carico di trazione, riprese dalle due telecamere di un sistema DIC/3D [(a) telecamera di sinistra, (b) telecamera di destra]

Nella Stereo Correlation di norma si utilizzano sette sistemi di riferimento per la determinazione dei dati, tre dei quali sono mostrati in figura 3.9 e più precisamente: un sistema di riferimento globale, XYZ , posto in genere in corrispondenza del provino, tre sistemi di riferimento per ciascuna telecamera, $X_c Y_c Z_c$ ($c = camera$), con origine nel centro della lente, $X_i Y_i$ ($i = immagine$) con origine nel centro del piano immagine, corrispondenti a $X_c Y_c$, ma spostate in direzione z di una lunghezza uguale alla distanza focale f , $X_s Y_s$ ($s = sensore$) con origine in un angolo del piano immagine, corrispondenti a $X_i Y_i$, ma spostati, nelle direzioni x e y , di distanze uguali alle coordinate del centro del piano immagine.

Le telecamere utilizzate permettono la rilevazione delle immagini ad alta velocità e, dal momento che questa è di solito più alta di quella di registrazione del PC, si abbinano al sistema circuiti integrati che permettono elevate velocità di immagazzinamento dati. Di solito vengono preferiti sensori allo stato solido, come quelli CCD (charge couple device), che garantiscono una buona accuratezza, piccoli ingombri, stabilità e insensibilità a variazioni di temperatura. Inoltre hanno lunga durata, consumano poco ed operano con potenze basse; come rovescio della medaglia si potrebbe avere la nascita di frange moiré dovute all'interferenza tra i pixel del sensore e quelli del monitor.

Le caratteristiche della telecamera dipendono da parametri intrinseci e da parametri estrinseci. I parametri intrinseci, che definiscono le caratteristiche proprie della telecamera, sono la distanza focale f della lente, le coordinate del

centro dell'immagine (C_x, C_y), il fattore di dispersione della lente k , l'*aspect ratio* dei pixel, λ , mentre quelli estrinseci, che definiscono la posizione di ciascuna telecamera e quindi dipendono dalla particolare scelta della disposizione sperimentale, sono: gli angoli α di rotazione attorno all'asse Z_c (*swing angle*), β di rotazione attorno all'asse X_c (*tilt angle*) e γ di rotazione attorno all'asse Y_c (*pan angle*, si veda la figura 3.9); ugualmente estrinseci sono le coordinate X_0, Y_0, Z_0 che definiscono la posizione del centro della lente della telecamera.

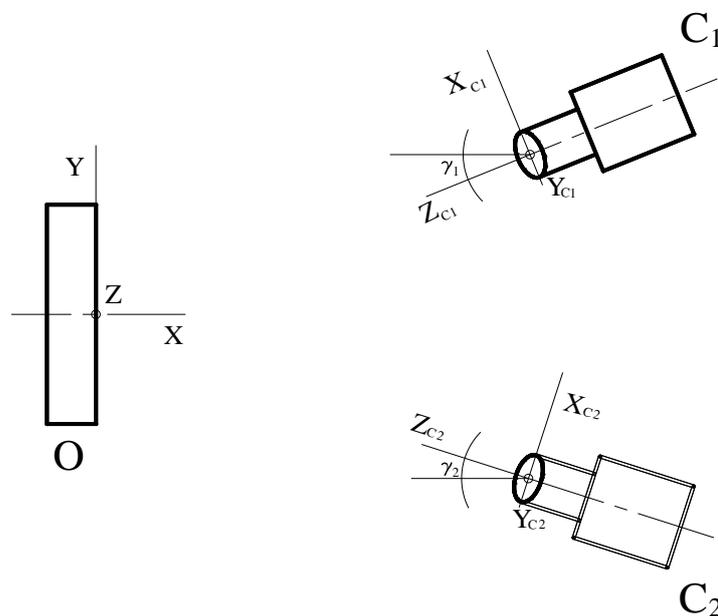


Figura 3.9 – Alcuni sistemi di riferimento utilizzati nella DIC-3D

Nella letteratura tecnica e nei manuali che accompagnano le pratiche utilizzate nella meccanica sperimentale, sono reperibili le relazioni analitiche che legano le coordinate di un punto dell'oggetto (X, Y, Z) alle coordinate bidimensionali nel piano del sensore (X_s, Y_s).

Si fa notare che l'utilizzo di una sola telecamera non consente di determinare le coordinate spaziali (X, Y, Z) di un punto P nel piano oggetto, perché ad un determinato punto nel piano immagine P_i corrispondono infinite posizioni del punto nello spazio e in particolare tutti i punti che si trovano sulla retta che unisce il punto P_i al centro della lente. L'uso di due telecamere consente di eliminare tale ambiguità, come si osserva in figura 3.10.

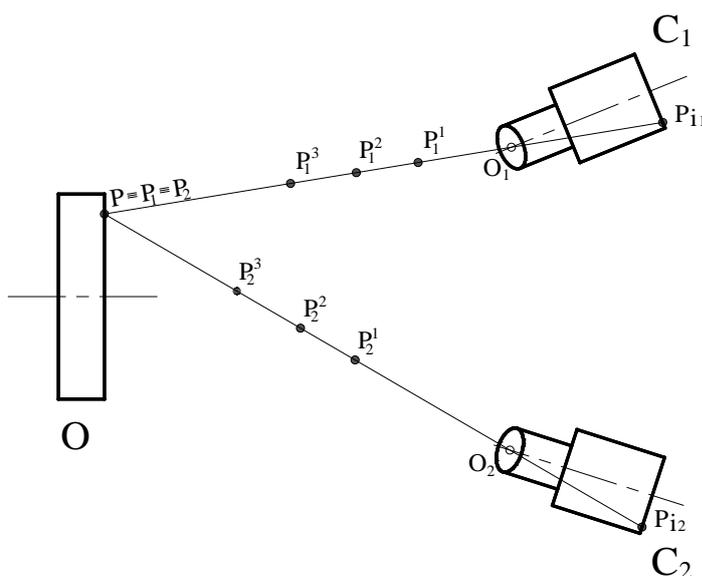


Figura 3.10 – L'uso di due telecamere consente di determinare la posizione del punto P le cui immagini sono P_{i1} e P_{i2}

La precisione della tecnica tridimensionale dipende dall'accuratezza con la quale sono determinati i parametri intrinseci ed estrinseci delle due telecamere. A tal fine si utilizzano dei reticoli di taratura aventi geometria nota con precisione, opportunamente disposti di fronte alle telecamere. Per le procedure di taratura si fa uso delle informazioni sperimentali contenute nella bibliografia specializzata e di manuali di impiego dei vari sistemi commerciali riguardanti la DIC-3D.

Si esaminano ora le due tipologie di rilevamenti sul campo effettuate di norma con l'uso della Stereo Correlation, cioè, come accennato precedentemente, la determinazione della forma di un corpo e del campo di spostamenti.

Nel primo caso la superficie dell'oggetto deve presentare, come per la tecnica bidimensionale, una distribuzione casuale di punti neri su fondo bianco. Completata la taratura delle telecamere si acquisiscono, mediante le due telecamere, le immagini del corpo nello stato indeformato. L'oggetto si considera costituito da un numero elevato di superfici piane di piccole dimensioni, una sorta di elementi finiti. Al generico piano p corrispondono le sub-immagini SI_1 e SI_2 acquisite rispettivamente dalle telecamere C_1 e C_2 (Figura 3.11). Ovviamente la correlazione di queste due sub-immagini è massima, ma in generale non si conosce la posizione del piano p che deve

essere determinata utilizzando la correlazione delle immagini. A tal fine, con riferimento alla stessa figura 3.11, per primo si considera una stima p_s del piano p incognito, corrispondente alla sub immagine SI_1 ripresa dalla telecamera 1; si determina poi, nella telecamera 2, la sub immagine SI_2^s corrispondente al piano p_s . In ultimo si cambia la posizione del piano p_s fino a quando la correlazione tra le sub immagini SI_1 e SI_2^s è massima: la correlazione è massima quando il piano p_s coincide con il piano p la cui sub immagine è SI_2

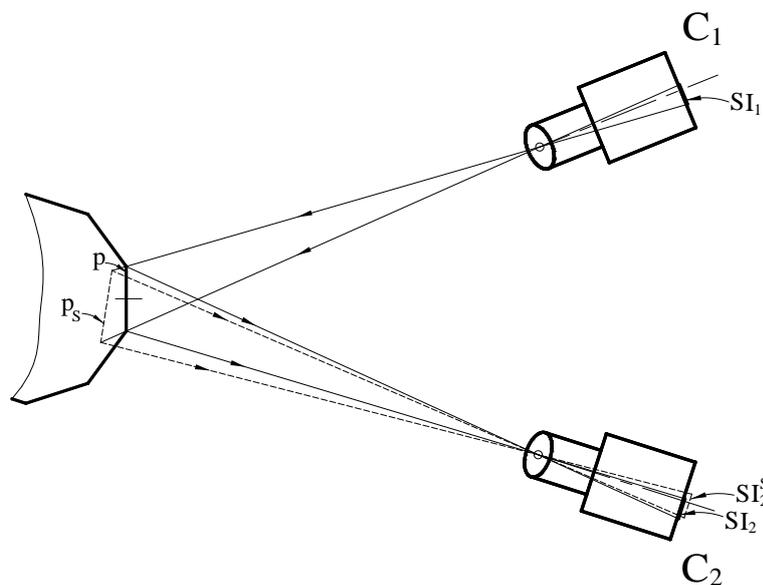


Figura 3.11 – Determinazione del generico piano elementare p costituente il corpo

Si può utilizzare il seguente procedimento per determinare completamente la forma dell'oggetto (Figura 3.12): si considera la sub immagine SI_1 (con centro in Ps_1 - punto nel piano del sensore) relativa all'immagine I_1 acquisita dalla telecamera 1 al tempo t_1 (corpo indeformato), poi si ricerca, utilizzando i procedimenti di correlazione, nell'immagine I_2 acquisita dalla telecamera 2 al tempo t_1 (corpo indeformato) la corrispondente sub immagine SI_2 (con centro in Ps_2); utilizzando le relazioni che legano i punti dell'oggetto ai punti del sensore accennate precedentemente, si determina il punto P (di coordinate X, Y, Z) del corpo corrispondente ai punti $Ps_1 (X_{s1}, Y_{s1})$ e $Ps_2 (X_{s2}, Y_{s2})$ che si trovano rispettivamente nel piano dei sensori relativi alle telecamere 1 e 2. A questo punto, ripetendo la procedura per le altre sub immagini, si determina la forma del corpo indeformato nella sua interezza.

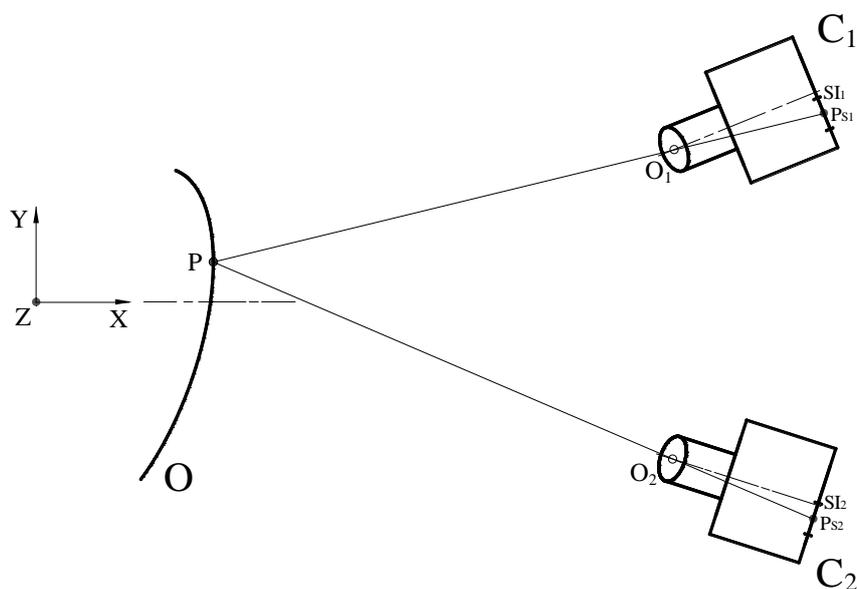


Figura 3.12 – Determinazione della forma

Per quello che riguarda il rilievo del campo di spostamenti del corpo oggetto di studio, come nel caso precedente, dopo la taratura delle telecamere, si acquisiscono le immagini dell'oggetto al tempo t_1 (I_1, I_2 - stato indeformato) e al tempo t_2 (I_1', I_2' - stato deformato).

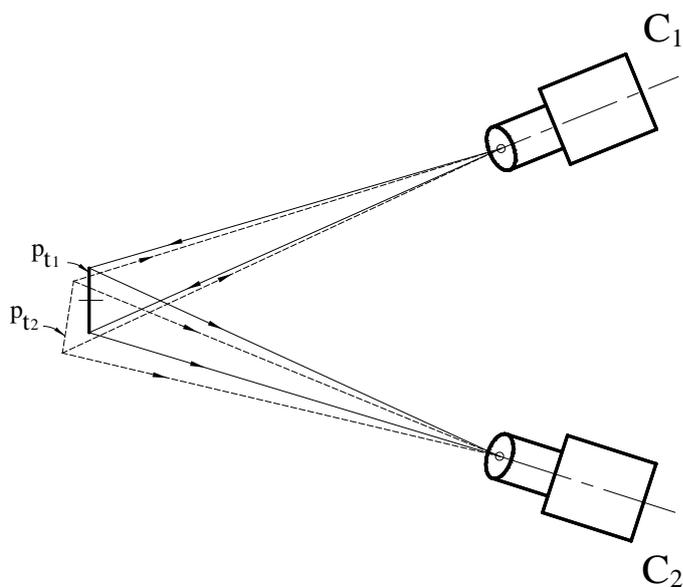


Figura 3.13 – Determinazione del campo degli spostamenti

La figura 3.13 mostra il generico piano p , costituente il corpo, prima (p_{t1}) e dopo la deformazione (p_{t2}). Si indicano con $SI_{1/t1}$ la sub-immagine acquisita

dalla telecamera 1 al tempo t_1 (indicata per brevità SI_1), $SI_{2/t1}$ la sub-immagine acquisita dalla telecamera 2 al tempo t_1 (indicata per brevità SI_2), relative al piano p_{t1} (stato indeformato al tempo t_1); $SI_{1/t2}$ la sub-immagine acquisita dalla telecamera 1 al tempo t_2 (indicata per brevità SI_1'), $SI_{2/t2}$ la sub-immagine acquisita dalla telecamera 2 al tempo t_2 (indicata per brevità SI_2') relative al piano p_{t2} (stato deformato al tempo t_2). Utilizzando la correlazione tra le immagini, con procedimento analogo a quello descritto nel caso precedente di determinazioni della forma di un corpo, si ricava sia il piano indeformato sia il campo degli spostamenti.

Un esempio di metodologia del procedimento può essere la seguente: si considera la sub immagine SI_1 (con centro in Ps_1 - punto nel piano del sensore) relativa all'immagine I_1 acquisita dalla telecamera 1 al tempo t_1 (corpo indeformato); si ricerca, utilizzando i procedimenti di correlazione, nell'immagine I_1' acquisita dalla telecamera 1 al tempo t_2 (corpo deformato) la corrispondente sub immagine SI_1' (con centro in $P's_1$) e nell'immagine I_2 acquisita dalla telecamera 2 al tempo t_2 (corpo deformato) la corrispondente sub immagine SI_2' (con centro in $P's_2$).

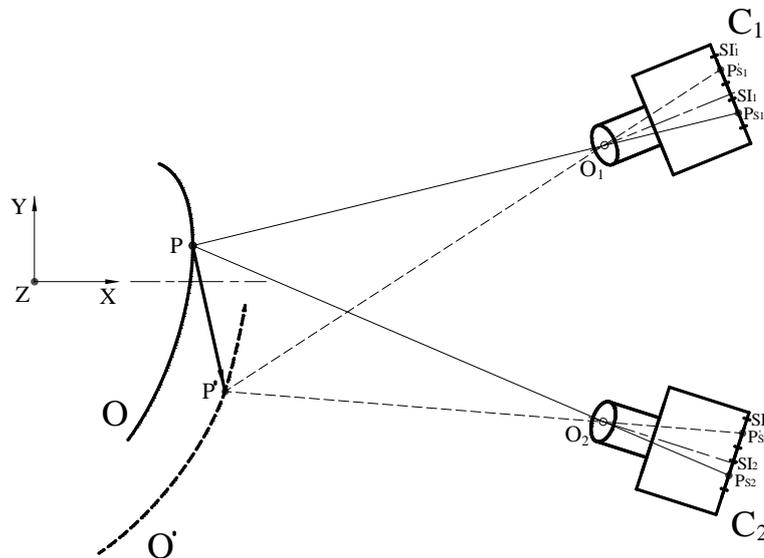


Figura 3.14 – Determinazione del campo degli spostamenti (O = corpo indeformato, O' = corpo deformato)

A questo punto, utilizzando le relazioni che legano i punti dell'oggetto e dei sensori, si determina il punto P' (di coordinate X', Y', Z') del corpo

deformato corrispondente ai punti $P's_1 (X'_{s1}, Y'_{s1})$ e $P's_2 (X'_{s2}, Y'_{s2})$ che si trovano rispettivamente nel piano dei sensori relativi alle telecamere 1 e 2. Ripetendo la procedura per le altre sub immagini si determina la forma del corpo deformato ed il campo degli spostamenti (u, v, w) dalle posizione di punti P' e P relative al corpo deformato e indeformato.

3.6. Cenni sulle tecniche sperimentali

All'inizio del capitolo si è visto che la superficie da analizzare può essere illuminata mediante un laser o in luce bianca. Nel primo caso la distribuzione random dell'intensità luminosa è data direttamente dallo speckle caratteristico dell'illuminazione in luce coerente; in tal caso la tecnica, che rappresenta la versione a campo intero della fotografia speckle, è indicata di solito come DSC (*Digital Speckle Correlation*). Nel caso, più usuale, di illuminazione in luce bianca è richiesta una preparazione adeguata della superficie consistente nell'applicazione di una distribuzione casuale di punti neri su fondo bianco. In genere si procede applicando un sottile strato di smalto bianco e, a spruzzo o mediante pennello, vernice nera sullo strato precedente già essiccato o, in alternativa, applicazione di toner in polvere (del tipo per fotocopiatrice) sullo smalto bianco ancora fresco.

E' opportuno sottolineare che la distribuzione dei punti neri deve essere obbligatoriamente casuale in modo tale che la distribuzione dell'intensità luminosa nella generica sub-immagine in esame sia unica, cioè non duplicata in altre sub-immagini; in caso contrario il procedimento di correlazione cade in difetto, non essendo in grado di distinguere con certezza la sub-immagine in esame dalle altre aventi la stessa distribuzione di intensità luminosa. Per ottenere una buona accuratezza i punti neri devono essere di dimensioni tali da occupare, sul CCD della telecamera, un'area superiore al pixel, per esempio circa 3x3 o 5x5 pixel per evitare il fenomeno dell'*oversampling* dell'immagine. E' infatti facile rendersi conto che per determinare spostamenti inferiori al pixel, detti spostamenti sub-pixel, le dimensioni degli speckle devono essere grandi rispetto a quelle del pixel stesso. La figura 3.15 illustra questo concetto

con riferimento, a semplice esempio, ad un insieme di 2x2 pixel. La figura 3.15 a-b mostra il caso di speckle piccoli, considerati circolari per semplicità, rispetto alle dimensioni dei pixel. In questo caso uno spostamento sub-pixel (figura 3.15b) non produce nessun segnale, dato che esso dipende dal valore medio dell'intensità nel pixel che rimane costante se, come in questo caso, gli speckle si muovono all'interno dei quattro pixel (1,2,3,4) di appartenenza iniziale. La figura 3.15 c-d si riferisce invece al caso di speckle grande; in questo caso uno spostamento sub-pixel produce una variazione di intensità nei quattro pixel (1,2,3,4) occupati dallo speckle con conseguente segnale.

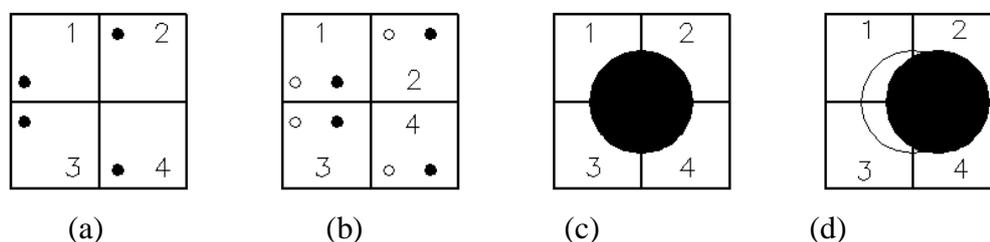


Figura 3.15 – Effetto delle dimensioni degli speckle sul segnale. Speckle piccoli (a-b): uno spostamento sub-pixel degli speckle [da (a) a (b)] non produce segnale; speckle grande (c-d): uno spostamento sub-pixel dello speckle [da (c) a (d)] produce segnale

Alcuni studi hanno determinato che la dimensione degli speckle dovrebbe essere due o tre volte quella dei pixel, quando rilevati dalla videocamera, al fine di ottenere una soddisfacente correlazione utilizzando la tecnica delle approssimazioni successive. Altri algoritmi di correlazione, invece, porgono differenti risultati, a testimonianza che l'estensione delle macchie ricavate sulla superficie dipende anche dal tipo di metodo utilizzato e dalla precisione desiderata. Infatti, ad esempio, una tecnica che prende il nome di FAS (*Fast and Simple*), e che si propone di sostituire il precedente metodo ottenendo risultati in modo più veloce, anche se con una precisione leggermente minore, dipende dalle dimensioni degli speckle in maniera differente. Attraverso la determinazione della deformazione di un provino sottoposto a trazione di un valore prefissato, disegnando diversi campi su di esso, si è notato che i dati sperimentali erano attendibili, rispetto al dato teorico di deformazione, quando la dimensione degli speckle cadeva in un intervallo tra due e dieci volte la grandezza dei pixel. Si è inoltre trovato che anche il tipo di deformazione, quindi di carico, ha la sua influenza: nel caso di scorrimenti, le dimensioni ottimali per tale algoritmo sono da quattro a sette volte l'estensione di un pixel.

I principi generali di questo fenomeno vertono, come già visto, nell'oversampling dell'immagine.

Il tipo di preparazione a cui si è accennato prima, eseguita per ottenere l'effetto speckle, dipende essenzialmente dalle dimensioni della superficie da osservare: infatti, fissata in base a quanto detto sopra la dimensione degli speckles sul CCD, la loro dimensione sulla superficie aumenta all'aumentare della superficie stessa.

Per quello che riguarda il metodo di acquisizione delle immagini, durante i vari stati nei quali si trova l'oggetto in esame, si nota che gli spostamenti fuori dal piano possono introdurre errori a causa della variazione del fattore di ingrandimento della lente. Per minimizzare tale effetto bisogna aumentare la distanza della telecamera dalla superficie dell'oggetto; ciò richiede l'impiego di obiettivi con grande lunghezza focale. A titolo orientativo si riscontra in talune applicazioni l'impiego di obiettivi con focale da 200mm (e in taluni casi anche l'impiego di lenti addizionali) e di distanze tra superficie dell'oggetto e telecamera dell'ordine di 1 o 2m. Le prestazioni dipendono dalle caratteristiche del CCD della telecamera: si riscontrano applicazioni effettuate impiegando CCD sia con l'usuale risoluzione di 512x512 pixel sia con risoluzioni superiori, dell'ordine, per esempio, di 2048x2048 pixel.

In fase di elaborazione dei risultati sperimentali si scelgono le dimensioni della sub-immagine che deve essere tanto grande da assicurare una distribuzione dell'intensità luminosa unica cioè non riprodotta in altre sub-immagini; indicativamente le dimensioni della sub-immagine sono comprese tra 15x15 pixels e 50x50 pixels. Generalmente le sub-immagini successive presentano una certa sovrapposizione (*overlapping* delle immagini): ad esempio una sub-immagine 15x15 pixel che si sposta, passando alla successiva sub-immagine, di 12 o 15 pixel ha rispettivamente un overlapping di 3 o 0 pixel.

Le prestazioni dei sistemi a correlazione di immagini digitali dipendono, per ciò che riguarda l'hardware, dai componenti utilizzati e dal set-up sperimentale: in commercio esistono svariate apparecchiature e software per i metodi DIC operanti sia in campo piano (2D) sia in campo tridimensionale (3D).

3.7. Esempi di applicazioni commerciali

Grazie al veloce sviluppo dell'informatica e della tecnologia ottica applicata alle videocamere e anche all'affidabilità che i sistemi che utilizzano i metodi DIC garantiscono, sono tante le applicazioni che si trovano in commercio, perché alla disposizione sperimentale in sé viene affiancato dai costruttori un insieme di opzioni che rendono lo strumento di base più o meno evoluto. Inoltre quasi tutte le grandi case che producono tali dispositivi sviluppano software da vendere in abbinamento o singolarmente per l'elaborazione delle immagini. Quindi si assiste ad una miriade di prodotti e metodi che non permettono, ovviamente, di decidere a priori quale marchio sia il migliore in assoluto: intervengono spesso altri fattori, quali il contenimento dei costi, l'effettivo risultato che si vuole ottenere in termini di sensibilità e precisione, il tipo di misura che si vuole effettuare, oltre alla possibilità di reperire velocemente eventuali ricambi o avere una puntuale assistenza tecnica.

In questo paragrafo si presenteranno soluzioni osservate sui siti e sugli opuscoli dei produttori che sono sembrate più significative.

Un'azienda che si occupa, tra le altre cose, della produzione di strumenti ottici, è LaVision, fondata nel 1989 in Germania. LaVision effettua ricerca in numerosi ambiti: aerospaziale, automobilistico, metallurgico e idrodinamico. I suoi prodotti servono per l'analisi dei fluidi, della meccanica dei materiali, del comportamento di spray, di prodotti della combustione e di gestione dei fluidi in motori endotermici. Per quello che riguarda il campo di interesse del presente elaborato, l'azienda ha progettato il modello *StrainMaster* (figura 3.16), utilizzato nella determinazione delle caratteristiche dei materiali, nell'analisi della fatica e della meccanica della frattura e per test non distruttivi. Il pacchetto può essere venduto con optional quali microscopi elettronici e software grafici, è facile da utilizzare e viene modellato e progettato in base alle richieste del cliente, sia esso una grande industria o un ateneo. Si possono avere set-up sia con singola videocamera per misure 2D, che con doppia per misure 3D e il sistema utilizza algoritmi FFT (*Fast Fourier Transform*) per l'elaborazione dei dati. Altri optional, oltre ai precedenti, permettono di

applicare lo strumento allo studio dei fluidi e della propagazione delle cricche nelle strutture.

Le caratteristiche del sensore CCD arrivano ad una risoluzione di 4000x2600 pixel, informazioni fino a 16 bit, sensibilità dell'ordine di 0,01 pixel e interfaccia MS Windows con processore Dual Core.

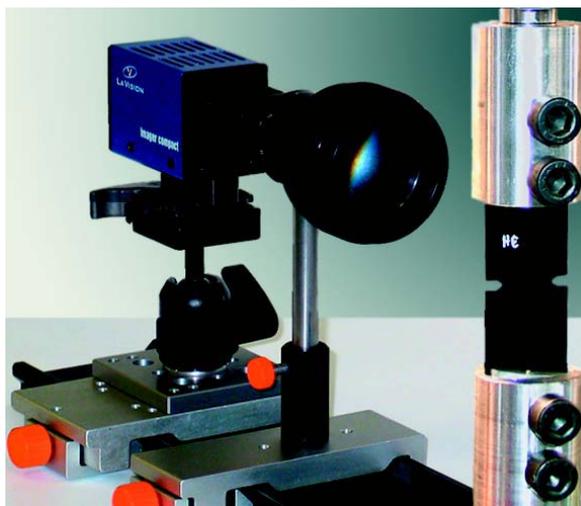


Figura 3.16 – StrainMaster 2D di LaVision

Nel campo della metrologia ottica opera anche la Dantec Dynamics, una tra le società leader del mercato, nata nel 1992 con sede a Copenaghen, in Danimarca e con filiali ed uffici in tutto il mondo. La Dantec si occupa di sistemi ottici per l'ottimizzazione dei progetti soprattutto nell'idrodinamica ed aerodinamica, oltre all'analisi di gas e liquidi e prodotti di combustione, della dimensione di particelle ed infine della misura di tensioni, deformazioni, vibrazioni e dello svolgimento di test non distruttivi. Per quello che riguarda gli ultimi campi di interesse, l'azienda ha sviluppato un insieme di strumenti che compongono la serie "Q". Si hanno, ad esempio, il Q-100, il Q-300 ed il Q-400 per la misura di deformazioni e spostamenti, il Q-500 e Q-600 per le vibrazioni, ed il Q-800 per le prove non distruttive sui componenti meccanici. Dantec si fa forte del fatto di aver progettato uno strumento per ogni esigenza di misura.

Ad esempio il Q-300 (figura 3.17), un sistema che applica la tecnica 3D ESPI molto facile da utilizzare: si attacca la videocamera alla macchina di

prova attraverso supporti, si calibra il tutto e si utilizza poi l'illuminazione laser, si registrano le immagini a differenti valori di carico imposto all'oggetto in esame, infine si elaborano e valutano i risultati.

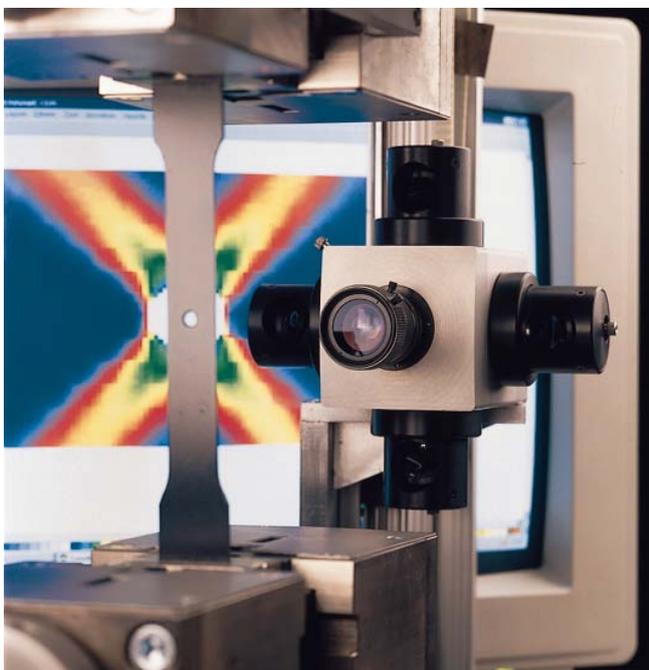


Figura 3.17 – Sistema Q-300 Dantec Dynamics

Il sistema permette l'analisi a tutto campo dello stato deformativo senza la necessità di marcare la superficie, in quanto si utilizza luce coerente. Si possono determinare deformazioni locali longitudinali e trasversali, oltre a poter sfruttare lo strumento nell'analisi della frattura e nello studio del comportamento di materiali compositi, la sensibilità varia da $0,03\mu\text{m}$ a $0,1\mu\text{m}$, la distanza di lavoro è variabile fino ad 1m, mentre il CCD ha una risoluzione di 1380×1035 pixel.

Il Q-100 (figura 3.18) è un'applicazione molto versatile che si contraddistingue per la possibilità di essere impiegata su tutti i tipi di superfici e componenti: fornisce informazioni tridimensionali sulle deformazioni, permettendo un'analisi dettagliata degli effetti dei carichi imposti. Si possono eseguire veloci misure in aree critiche, negli angoli, nei giunti saldati, potendo applicare il Q-100 su qualsiasi particolare, ottenendo anche una forte integrazione tra i dati sperimentali e le tecniche CAD-CAM, grazie ai moderni

software sviluppati dalla Dantec. Le specifiche tecniche di questo strumento sono il peso ridotto, 370 grammi, una risoluzione fino a $0,1\mu\text{m}$ per gli spostamenti e fino a 5 unità di deformazione, ed un range fino ad un decimo di millimetro per la misura.



Figura 3.18 – Sistema Q-100 Dantec Dynamics

Presentato per comprendere meglio la tecnica tridimensionale sviluppata nel presente studio, si cita il Q-400 (figura 3.19), che utilizza due videocamere, quindi un sistema stereo: dopo aver preparato la superficie in esame attraverso l'applicazione di un campo random di speckle (illuminazione in luce bianca), conoscendo i parametri ottici della disposizione sperimentale, si possono ricostruire forma e spostamento della superficie, anche fuori dal piano. La Dantec ha altresì sviluppato un metodo di calibrazione del sistema ottico che permette la regolazione in soli otto passi. Il modello suddetto, con poche variazioni ed optional, può essere applicato anche al rilievo delle vibrazioni, fornendo deformazioni e spostamenti tridimensionali. I sensori CCD sono di solito di 1624×1234 pixel, l'area di lavoro può essere compresa tra poche decine di millimetri quadrati, fino a qualche metro quadrato e il campo di deformazioni rilevabile varia in base alla disposizione sperimentale, fino a $1\mu\text{m}$.

Molto significativo è anche il modello Q-800 che utilizza la shearography, usato per le prove non distruttive: si effettuano veloci ispezioni su giunti, materiali compositi, saldature e permette scansioni di superfici di notevole estensione in pochi minuti, ad esempio nella ricerca di cricche e danneggiamenti nelle superfici di aeromobili (fusoliera, flaps, slats, ecc.). Il CCD ha una risoluzione di 1392x1040 pixel, la velocità di analisi è di circa 1 metro quadrato ogni 20 secondi ed il peso è contenuto: solo 1,2Kg compresi gli zoom ottici.



Figura 3.19 – Sistema Q-400 Dantec Dynamics per l'analisi tridimensionale

Tutti questi strumenti sono impiegati su una vasta varietà di materiali, da quelli metallici, alle leghe non metalliche, ai compositi, al legno ed ai moderni materiali utilizzati in ingegneria biomedica.

Anche la Correlated Solution si occupa di DIC; nata nel 1998 per commercializzare le tecnologie sviluppate dall'università della Carolina negli Stati Uniti, ora ha moltissimi clienti sparsi in tutto il mondo. I suoi prodotti di punta sono il Vic2D ed il Vic3D. Sono entrambi strumenti che sfruttano il principio di correlazione di immagini digitali: il primo può misurare spostamenti e deformazioni nel piano, su modelli di dimensioni che variano da meno di 1mm a più di 10m. Si utilizza illuminazione in luce bianca, quindi l'unica cosa da fare è creare il campo speckle sull'oggetto. Non c'è bisogno di calibrazione e l'elaborazione è effettuata in modo da analizzare i dati in tempo reale. Il Vic3D (figura3.20) è l'analogo del precedente, ma permette di rilevare

le grandezze nello spazio: come prestazioni è analogo al Vic2D, ma richiede una semplice procedura di calibrazione; in ogni caso tutti i sistemi possono sempre essere personalizzati in base alle esigenze del cliente.

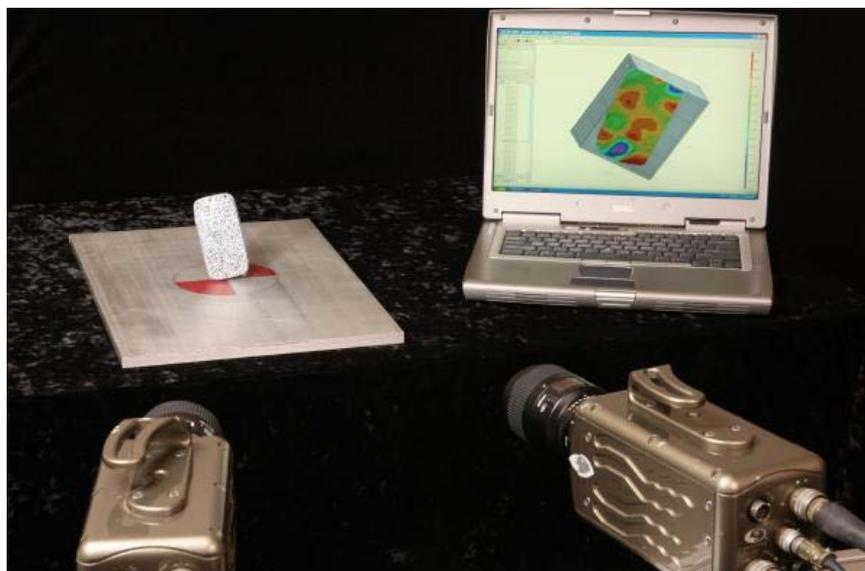


Figura 3.20 – Esempio di set-up sperimentale che utilizza il Vic3D

La Gom, nata nel 1990 in Germania, sviluppa e distribuisce sistemi ottici di misura aventi come principale obiettivo la digitalizzazione 3D, la rilevazione delle componenti di spostamento e deformazione nello spazio, oltre al controllo di qualità. Tra i suoi prodotti si cita l'ARAMIS, un sistema ottico per la misura di deformazioni tridimensionali. Ci sono varie versioni, ovviamente, ma si differenzia dal fatto che può anche rilevare velocità ed accelerazioni durante lo spostamento del corpo che si sta studiando. Alcune applicazioni sono la caratterizzazione del comportamento dei materiali e le prove non distruttive su componenti meccanici.

3.8. Commenti e sviluppi futuri

L'elaborazione delle immagini è già oggi largamente utilizzata nelle indagini a tutto campo di deformazioni e spostamenti, facendo risparmiare tempo e fornendo accurati risultati sperimentali, oltre a permettere l'implementazione di nuovi metodi di analisi. Videocamere e computer

integrati aumentano le loro potenzialità giorno dopo giorno, diventando sempre più indispensabili alla ricerca, diminuendo parallelamente gli ingombri ed i costi e garantendo un sempre più facile utilizzo: nel tempo sempre più personale, anche di limitate conoscenze dei metodi ottici, potrà elaborare le informazioni e interpretarle, grazie anche all'impiego di software di simulazione aventi interfacce uomo-macchina estremamente semplici ed intuitive. La tecnica DIC sarà avvantaggiata in futuro anche con l'arrivo di sensori sul mercato che permetteranno di aumentare il numero di pixel oggi usati nella rilevazione delle immagini, estendendo così la risoluzione e la sensibilità: questo sarà, ovviamente, accompagnato da una pari progressione degli elaboratori e processori, che riusciranno a sfruttare algoritmi sempre più precisi e veloci. Anche gli schermi televisivi, che nel passato non possedevano una buona risoluzione, stanno lasciando il posto a monitor ad alta definizione dove il risultato dell'indagine sperimentale è presentato a video in maniera accurata.

Tutto questo progredire permette, e permetterà, di analizzare problemi multi-dimensionali, funzione del tempo, dello spazio, della fase e di altre variabili e di effettuare rilevamenti in tempo reale di immagini in movimento anche a grande velocità.

I risultati sperimentali non coincidono sempre, anche oggigiorno, a quelli ottenuti con tecniche FEM (*Finite Element Method*) o BEM(*Boundary Element Method*), a causa, ad esempio, di inaccurate condizioni al contorno o errate equazioni costitutive. Sono, però, allo studio, e presenti anche in applicazioni già disponibili, sistemi che combinano accurati metodi della meccanica sperimentale utilizzando anche l'elaborazione delle immagini, come l'FTMGM (*Fourier Transform Moiré and Grid Method*) usato con il FEM o il BEM, per produrre risultati molto più precisi stimando le condizioni al contorno e le equazioni costitutive che descrivono un problema, attraverso metodi inversi.

Analisi molto accurate di dati sperimentali a tutto campo saranno, quindi, sempre più possibili e disponibili, e stati tensionali e deformativi saranno determinati sempre più precisamente combinando le tecniche già presenti con quelle di elaborazione digitale delle immagini che progrediscono ogni giorno.

Capitolo 4

Conclusioni e commenti

La meccanica sperimentale ha subito nel corso del XX secolo e nei primi anni del terzo millennio notevoli trasformazioni ed implementazioni, legate allo sviluppo dei metodi di analisi, alla scoperta di nuovi materiali e tecniche e al progredire dell'elettronica e dell'informatica. Molti passi sono stati fatti dalla nascita dei primi laboratori di prova e dall'utilizzo quasi esclusivo delle tecniche estensimetriche. La nascita dell'industria moderna legata all'automazione, le forme sempre più complesse dei componenti, la necessità di diminuire i tempi e i costi delle indagini sperimentali, associate alla richiesta di affidabilità elevata e di competitività, hanno spinto i ricercatori a sviluppare metodi di indagine che permettessero di superare i limiti intrinseci dei metodi utilizzati fin dall'inizio del secolo scorso.

In questo ambito i metodi ottici hanno rappresentato una svolta importantissima: le indagini punto a punto potevano essere superate da altre su larga scala, si potevano finalmente eseguire prove sia sul campo, ma anche su modelli e prototipi e l'esperimento diventava efficiente e veloce. Fino agli anni '50 la fotoelasticità era la più utilizzata, ma dalla scoperta dei raggi X e soprattutto del laser, si svilupparono i metodi interferometrici che sfruttavano l'ottica coerente, trovando un'ulteriore spinta dall'implementazione e miglioramento continuo dei metodi digitali.

Il presente elaborato ha cercato di illustrare due particolari tecniche utilizzate nella moderna analisi delle tensioni, introducendo le caratteristiche ed i fenomeni fisici sui quali esse poggiano, i vari sviluppi e tipologie, le analogie e le applicazioni moderne, soprattutto in campo industriale.

Si è così presentato il fenomeno che prende il nome di *effetto speckle*, un comportamento noto da molto tempo, ma che con l'invenzione del laser negli anni '60 ha acquistato una grande importanza, divenendo la base di molti metodi sperimentali moderni. Si è visto che la presenza delle macchie caratteristiche di questo comportamento nascono in diversi modi, in base al tipo di illuminazione del corpo in esame: naturalmente, con luce coerente, oppure artificialmente con diverse tecniche viste, se si impiega luce bianca. Si è notato che notevole importanza assume la rugosità della superficie dell'oggetto, garantendo l'interferenza delle onde di luce coerente.

Le varie tecniche che sfruttano tale fenomeno fisico, come spiegato nel capitolo relativo, forniscono indicazioni circa spostamenti e deformazioni del modello esaminato, dalle quali si può risalire allo stato tensionale che è presente in seguito a carichi meccanici o termici. A seconda delle varie disposizioni sperimentali, si possono misurare spostamenti nel piano, fuori dal piano, deformazioni e rotazioni. Le moderne tecniche sfruttano l'interferenza di onde per ottenere tutte le informazioni e l'utilizzo di personal computer e ausili elettronici sempre più performanti permettono di immagazzinare, elaborare e visualizzare una mole elevata di dati, anche in tempi brevi, che ben rispondono alle necessità dell'industria di oggi. Si è visto che ci sono molti tipi di interferometri che grazie alla nascita dei campi speckle permettono di essere applicati ai vari casi che si presentano all'analista, e che assume sempre più importanza la possibilità di avere mezzi ottici ed informatici evoluti.

I moderni sistemi sono basati sull'interferometria speckle a variazione di fase che rappresenta il massimo dello sviluppo di tale tecnica, abbinando telecamere e mezzi hardware e software in grado di fornire tutte le informazioni volute in breve tempo. Si è anche osservato che l'impiego di luce bianca abbinata all'effetto speckle sta diventando molto importante, perché elimina tutte le problematiche a livello di potenza richiesta e di pericolosità connesse con l'utilizzo del laser, oltre ai limiti che questi ha per l'illuminazione di particolari estesi o di forma complicata.

I metodi speckle, oltre che al campo di applicazione che riguarda la determinazione di spostamenti e deformazioni, possono essere impiegati per altre analisi, come la misura della rugosità di superfici, la visualizzazione delle

forme di oggetti, lo studio dei fenomeni vibratori, dell'atmosfera e dei corpi celesti.

La seconda tecnica sperimentale descritta è fortemente legata all'elettronica e all'informatica. I metodi ottici che analizzano i componenti che vengono prodotti ai giorni nostri, forniscono una mole enorme di dati che è impossibile elaborare oggettivamente ed in tempi ragionevoli in maniera manuale; per questo la tecnica a *correlazione di immagini digitali* assume notevole importanza nella meccanica sperimentale. Come si è visto, la DIC può essere considerata l'evoluzione computerizzata del metodo speckle, in quanto esso si presta particolarmente a tale scopo: i campi speckle che nascono dall'illuminazione degli oggetti sono i migliori mezzi di caratterizzazione delle superfici, fornendo marker unici, grazie alla loro distribuzione casuale, che consentono di elaborare digitalmente le immagini. Fondamentalmente la tecnica in questione rileva e memorizza i pattern speckle nelle configurazioni assunte dal corpo nei vari stati deformativi e compie una suddivisione delle immagini ottenute, ricavandone una sorta di elementi finiti digitali. I vari algoritmi applicati al sistema si prefiggono ciò, oltre a riconoscere, nelle diverse immagini, quelle sub-immagini che presentano la stessa intensità luminosa a meno di un piccolo errore sempre presente: grazie a questa operazione, è possibile risalire agli spostamenti e alle deformazioni, sempre grazie all'azione di calcolo dei processori. Come si nota, è importantissimo il set-up sperimentale, così come le caratteristiche delle videocamere, memorie, computer e monitor: su questi ultimi i risultati sono presentati in una veste grafica di facile interpretazione e versatilità. Analogamente agli interferometri precedentemente accennati, è possibile determinare forma della superficie, spostamenti nel piano e fuori dal piano, deformazioni e scorrimenti.

In sintesi, la moderna meccanica sperimentale fa sempre più uso dei metodi ottici, in quanto essi superano i limiti di quelli tradizionali, che non forniscono informazioni a tutto campo e sono inefficaci per l'analisi di componenti complicati sollecitati in maniera complessa: risultano quindi inadeguati per la misura su prototipi e modelli, oggi largamente usati nella metrologia. Quindi le tecniche ottiche assumono notevole rilevanza e tra loro quelle speckle: la fotoelasticità impiegata fin dall'inizio del secolo scorso, è applicabile

solamente a corpi trasparenti e piani, quindi necessita della realizzazione di modelli di materiale diverso dal corpo in esame e del trasferimento su esso di tutti i risultati ottenuti, inserendo difficoltà alla determinazione degli stati tensionali soprattutto nel caso tridimensionale; per tali motivi il metodo non si impiega più, se non su materiali trasparenti.

Le tecniche moiré hanno come grosso limite il fatto di dovere attaccare una griglia direttamente sulla superficie esaminata, con tutte le problematiche che ne conseguono di sensibilità, posizionamento, accessibilità e caratteristiche costruttive delle griglie stesse.

Le tecniche interferometriche, olografiche, moiré o speckle, permettono notevoli passi avanti, ma la prima presenta difficoltà connesse all'uso delle lastre fotografiche e la seconda usa sempre le griglie: le tecniche speckle garantiscono il superamento di tutti questi problemi e assieme alle tecniche digitali, forniscono la risposta alle moderne esigenze della meccanica sperimentale.

Utilizzando i campi speckle si aumenta la sensibilità di misura, spesso non si necessita di isolamento dalle vibrazioni, si può lavorare con diversi tipi di laser e con sorgenti di luce incoerente, si ricavano componenti di spostamento in maniera disaccoppiata, così come le deformazioni, che sono rilevate direttamente, oltre a permettere un'elevata possibilità di applicazione ad una vasta gamma di problematiche, dal componente meccanico, alla fusoliera di un aeromobile, all'osservazione astronomica. L'utilizzo delle tecniche digitali permette risparmio di tempo ed evita la perdita di informazioni sperimentali, anche se ci si trova in presenza di grandi quantità di dati, oltre a fornire risultati di facile interpretazione e altamente integrabili con tecniche numeriche quali, ad esempio, metodi ad elementi finiti; inoltre lo sviluppo delle videocamere e dei processori agevola tale impiego nell'analisi dei componenti.

In definitiva, la meccanica sperimentale moderna all'avanguardia sfrutta come metodo di analisi la combinazione dell'effetto speckle e della correlazione di immagini digitali e questo è testimoniato dalla grande varietà di prodotti commerciali presenti sul mercato degli strumenti di misura.

Bibliografia

Ajovalasit A. (2009), *Analisi sperimentale delle tensioni con la fotomeccanica*, Aracne Editrice, Roma.

Baldi A., Jacquot P., *Applicazione della tecnica speckle per la misura delle tensioni residue su provino in materiale composito: messa a punto della tecnica e risultati sperimentali*, Articolo 178.

Będzinski R., *Application of the optical methods in experimental analysis of stress, strain and displacements*.

Broggiato G. B., Campana F., Sasso M., *Utilizzo della correlazione digitale tra immagini speckle per la misura di forma di oggetti in movimento*, articolo 158

Casavola C., Lamberti L., Pappalettere C. (2009), *Applications of optical interferometry to engineering measurements at different scales*, Nova Science Publishers.

Cloud G.L. (1968), *Improvement in use of photometric methods of measurement of birefringence*, Experimental mechanics, 8, 3: 138-41.

Cloud G.L. (1975), *Practical speckle interferometry for measuring in-plane deformations*, Applied Optics, 14, 4: 878-84.

Cloud G.L. (1998), *Optical methods of engineering analysis*, Cambridge university press, Cambridge.

Conley E., Cloud G. (1990), *White-light speckle for measuring geophysical surface motions*, MD:Society experimental mechanics, Baltimore.

Conley E., Cloud G. (1991), *Resolution experiments using the white-light speckle method*, Applied optics, 30, 7: 795-800.

Creath, K. (1985), *Phase shifting speckle interferometry*, Applied optics, 24: 3053-8.

Dainty J.C. (Ed. 1984), *Laser speckle*, Springer, Berlin.

Dally J.W., Riley W.F. (1965), *Experimental stress analysis*, McGraw-Hill, New York.

Doyle, J.F. (2004), *Modern experimental stress analysis: completing the solution of partially specified problems*, Wiley, New York.

Durelli A.J., Riley W.F. (1965), *Introduction to photomechanics*, Englewood Cliffs, New Jersey.

Erf R.K. (Ed. 1978), *Speckle metrology*, Academic press, New York.

Francon M. (1979), *Laser speckle and application in optics*, Academic Press, New York.

Gasvik K.J. (1995), *Optical metrology*, John Wiley & Sons, New York.

Giancane S., Panella F.W., Dattoma V. (2008), *Localizzazione e valutazione del danneggiamento mediante tecnica di correlazione di immagini*, AIAS XXXVII convegno nazionale, 10-13 settembre 2008, università di Roma “La Sapienza”

Goodman J. W. (2007), *Speckle phenomena in optics: theory and applications*, Roberts and Company Publishers.

Hetenyi M. (Ed. 1950), *Handbook of experimental stress analysis*, Wiley & Sons, New York.

Hild F., Roux S. (2005), *Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties*, Submitted to *Strain*, June 2005.

Hung P., Voloshin A.S. (2003), *In-plane strain measurement by digital image correlation*, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., July-September 2003, Vol. XXV.

Hung Y., Der Hovanesian J. (1972), *Full-field surface-strain and displacement analysis of three-dimensional objects by speckle interferometry*, *Experimental mechanics*, 12, 10: 454.

Hung Y., Hu C., Taylor C. (1974), *Surface measurements by speckle-moiré and speckle-shearing interferometry*, *Experimental mechanics*, 14: 281.

Jones R., Wykes C. (1983), *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge university press, Cambridge.

Kobayashi A.S. (Ed 1993), *Handbook on experimental mechanics*, VCH, New York.

Leendertz J. (1970), *Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect*, Journal of physics, 39: 214.

Rastogi P.K. (Ed. 1999), *Photomechanics*, Springer, Berlin.

Rastogi P.K. (Ed. 2000), *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, Wiley, New York.

Shchepinov V.P., Pisarev V.S. (1996), *Strain and stress analysis by holographic and speckle interferometry*, Wiley, New York.

Stenson K.A. (1975), *A review of speckle photography and interferometry*, Optical Engineering, 14: 482-9.

Stetson K.A. (1974), *Analysis of double-exposures speckle photography with two-beam illumination*, J. Opt. Soc. Amer. 64, 6.

Sutton M.A., McNeill S.R., Bruck H.A. (1989), *Determination of deformation using digital correlation with the Newton-Raphson method for partial differential corrections*, Experimental Mechanics, 29, 261.

Sutton M.A., McNeill S.R., Jang J., Babai M. (1983), *Determination of displacements using an improved digital correlation method*, Image Vis. Comput..

Sutton M.A., Orteu J-J, Schreier H.W., *Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications.*

Tiziani H. (1972), *Analysis of mechanical oscillations by speckling*, Applied optics, 11, 12: 2911.

Vest C.M. (1979), *Holographic interferometry*, John Wiley & Sons, New York.

Vitkovich D. (Ed. 1966), *Field analysis: experimental and computational methods*, Van Nostrand, London.

Williams, D.C. (Ed. 1993), *Optical methods in engineering metrology*, Chapman & Hall, London.

Wyant, J.C. (1982), *Interferometric optical metrology, basic systems and principles*, Laser Focus, May 1982: 65-71.

Pagine Web

130.251.121.2/DidRes/Fisica/Appl.pdf

http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation

[\[dee.poliba.it:8000/Opto/Sistemi% 20Optoelettronici% 20Integrati/SOI% 20Capitololo6.pdf\]\(http://dee.poliba.it:8000/Opto/Sistemi%20Optoelettronici%20Integrati/SOI%20Capitololo6.pdf\)](http://ftp-</p>
</div>
<div data-bbox=)

<http://oldweb.ct.infn.it/~pappalal/Olografia/Testo/Interferometria.pdf>

<http://www.correlatedsolutions.com>

http://www.correlatedsolutions.com/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=71

<http://www.dantec-ettemeyer.com>

<http://www.gom.com>

<http://www.image-instruments.de/ADASIM>

<http://www.lavision.com>

<http://www.lavision.de/products/strainmaster.php>

<http://www.limess.com>

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=12413&objectType=File>

<http://www.mckeeon.caltech.edu/ae104/DIClecture.pdf>

<http://www.tesionline.com/PDF/3015/3015p.pdf>

<http://www.tesionline.com/PDF/5736/5736p.pdf>

<http://www.trilion.com/Products/aramis.html>