

5 APPLICAZIONI

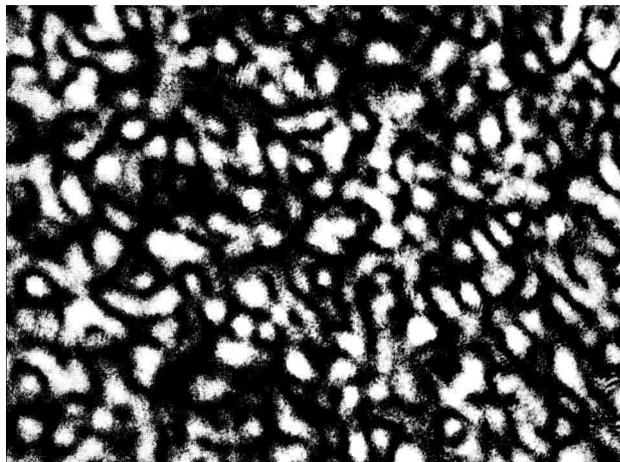
Introduzione

L'interferometria olografica e speckle sono attualmente tra le più avanzate tecniche di analisi utilizzate anche in meccanica grazie alla possibilità di effettuare misure non invasive inerenti a spostamenti, vibrazioni risonanti, rugosità e deformazioni di strutture reali. In particolare si possono citare le analisi di stress nelle prossimità di intagli o incrinature, analisi di tensioni microplastiche sia statiche che dinamiche ecc.

5,1 Speckle.

Quando una superficie otticamente rugosa (cioè con una rugosità confrontabile con la lunghezza d'onda della radiazione che la investe), viene illuminata con la luce coerente di un laser, non appare uniformemente illuminata ma ha un aspetto granulare che viene detto “*speckle*” .

Questa distribuzione apparentemente casuale di intensità (*speckle pattern*) deriva dall'interferenza tra le onde diffuse in tutte le direzioni dalla superficie e raccolte dall'occhio.



La dimensione media σ dei grani di speckle, cioè la media statistica tra regioni adiacenti di massimo e minimo di luminosità, formati su uno schermo posto a distanza L da una regione circolare diffondente di diametro D , è dell'ordine di:

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

e si parla di una “*speckle oggettivo*”.

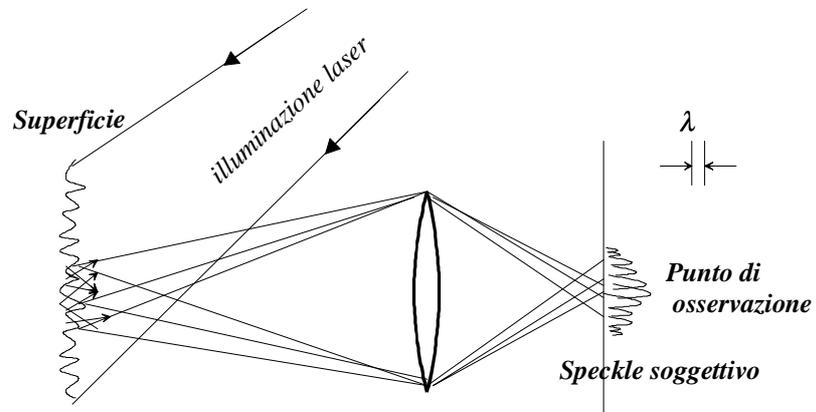
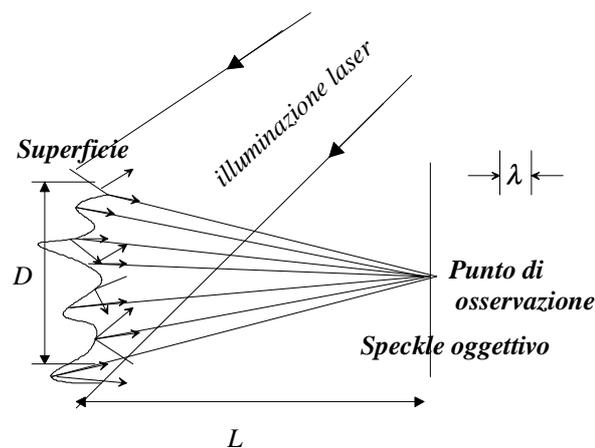
Viceversa se il campo speckle viene raccolto mediante una lente e focalizzata su uno schermo, si parlerà di “*speckle soggettivo*” e la dimensione media σ i grani di speckle dipenderà

dall'apertura numerica $N.A.$ della lente o del sistema ottico ($N.A. = f/D$, $f = \text{fuoco}$, $D = \text{Diametro apertura del sistema ottico}$) e vale:

$$\sigma = 1,22 \frac{\lambda}{N.A.} \frac{M+1}{M}$$

M è il fattore di ingrandimento del sistema ottico. Se il piano della superficie è nel piano focale delle lenti l'immagine si forma all'infinito $M \rightarrow \infty$. La dimensione minima dei grani vale $1,22 \lambda N.A.$

Quello che vediamo, osservando una superficie illuminata con luce laser è uno *speckle soggettivo*.



Lo speckle è una distribuzione di intensità che non è completamente casuale, ma soddisfa una ben determinata statistica. Ciò vuole anche dire che più che parlare di intensità in un punto dello schermo sarebbe più corretto parlare di funzione di distribuzione di intensità $\rho(I)$ (cioè probabilità di avere intensità compresa tra I e $I+dI$). La fase delle luce diffusa da una superficie rugosa può avere variazioni tra $\pm \pi$, e si può dimostrare che la funzione di distribuzione di intensità $\rho(I)$ vale:

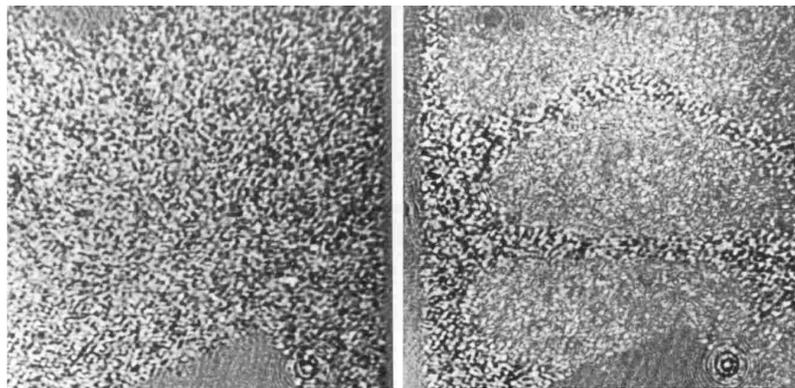
$$\rho(I) = \frac{I}{I_0} e^{-\frac{I}{I_0}} \quad \text{con} \quad I_0 = \text{Intensità media}$$

Le zone scure hanno maggiore probabilità rispetto alle zone di ogni altra brillantezza.

5,2 Interferometria speckle

Lo speckle di una superficie illuminata con luce laser ovviamente disturba l'immagine stessa, tuttavia proprio perché si tratta di un pattern di interferenza legato alla struttura della superficie stessa, può essere sfruttato per fare analisi per quanto riguarda in particolare gli spostamenti o deformazioni (comunque sempre confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione laser) della superficie, sfruttando la sovrapposizione di due campi speckle prodotti dalla superficie, uno preso come riferimento e l'altro preso come campo oggetto, andando a veder quanto sono tra loro ancora correlati. La loro sovrapposizione risulta esser ancora un campo speckle, differente dai due campi componenti, ma statisticamente con le stesse caratteristiche di brillantezza e dimensione

Il più semplice interferometro speckle può essere schematizzato come un interferometro a divisione di ampiezza (tipo interferometro di Michelson) dove uno specchio è stato sostituito dalla superficie da studiare (*fascio oggetto*). Se i due specchi sono fermi sullo schermo si osserva il campo speckle risultante, viceversa se lo specchio oggetto si muove si ha una sovrapposizione *non più coerente* (punto per punto le fasi delle due onde varia casualmente) e il contrasto dei grani di speckle si riduce notevolmente. Un tale dispositivo permette di osservare molto bene per esempio le vibrazioni della superficie. In particolare mentre i nodi della vibrazione continuano ad apparire come un campo speckle ben contrastato, nelle altre zone questo contrasto diminuisce sensibilmente, come mostrato nella figura.



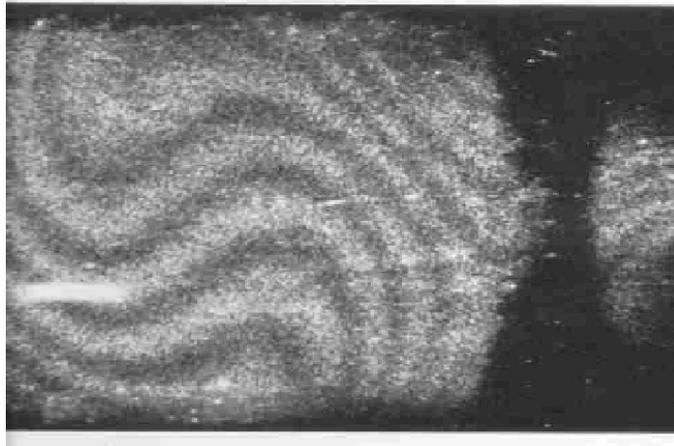
Un tale dispositivo permette solamente un'analisi qualitativa del fenomeno

Un dispositivo analogo dove entrambi gli specchi sono sostituiti da superfici diffondenti, risulta particolarmente adatto allo studio di spostamento out-plane della *superficie oggetto*.

La sovrapposizione coerente dei due campi speckle $F_1(x,y)$ e $F_2(x,y)$ determina un altro campo speckle $F_3(x,y)$ che, come già accennato, è statisticamente simile ai due precedenti e l'intensità

media è la somma delle intensità medie dei due campi. Ora se la superficie 1 trasla rigidamente e parallelamente a se stessa, la fase della luce diffusa varia in ogni punto di una quantità δ in modo che il campo $F_3(\delta)$ risulta diverso punto per punto dal campo $F_3(0)$ in maniera del tutto casuale. Per $\delta = (2n+1)\pi$ si avrà correlazione zero, mentre per $\delta = 2n\pi$ si avrà nuovamente completa correlazione e $F_3(2n\pi) = F_3(0)$. Concettualmente ogni grano di speckle ha subito ciclicamente un completo passaggio da chiaro a scuro fino a ritrovare lo stesso valore.

Allora se si registra, per esempio su una lastra fotografica, il campo $F_3(0)$, si sviluppa la lastra e la si riposiziona esattamente nella stessa posizione, la lastra sviluppata risulta esattamente il negativo dell'immagine sullo schermo e si avrà una scarsa trasmissione dell'immagine (le zone chiare dell'immagine corrispondono alle zone scure sulla lastra e viceversa). Tuttavia se si sposta parallelamente e rigidamente la superficie 1 il campo speckle $F_3(\delta)$, non si sovrappone più esattamente. Questo porta ad un apparente pattern di frange sull'immagine della superficie, come mostrato in figura. Il contrasto delle frange appare generalmente molto meno marcato di un reale pattern di frange.



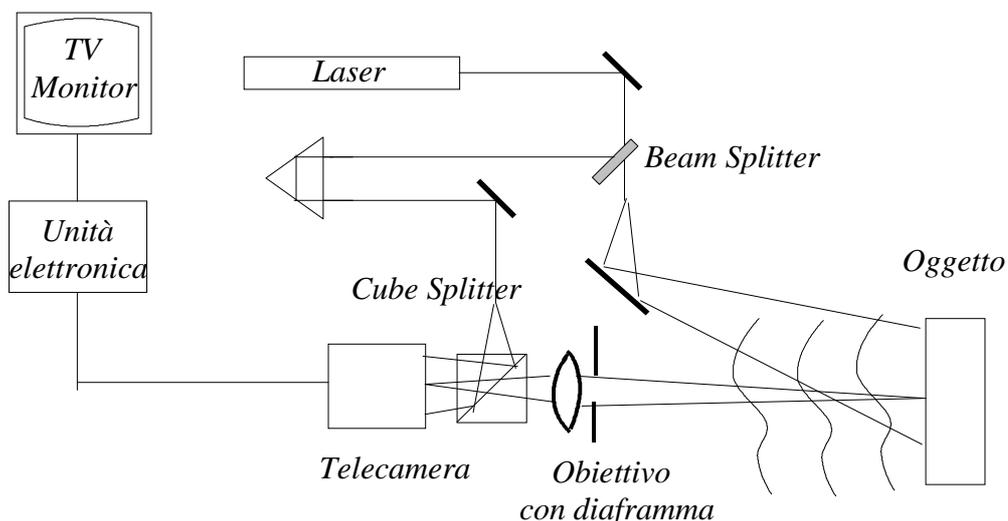
L'accorgimento di sostituire con superficie diffondente anche lo specchio del fascio di riferimento, è legata ad un motivo di praticità. Quando si va a rivedere il sistema in esame attraverso la lastra, direttamente con l'occhio o mediante una macchina fotografica, e il fascio di riferimento è un fascio laser espanso da un obiettivo, si corre il rischio che l'immagine di quest'ultimo, che è un punto luminoso molto intenso, dia fastidio all'occhio o sovraesponga la pellicola. Questo inconveniente potrebbe essere ovviato eliminando l'obiettivo davanti alla lastra fotografica e lasciando che la sovrapposizione dei due campi speckle avvenga direttamente sulla pellicola; questo però farebbe perdere ogni informazione sull'immagine dell'oggetto e il pattern di frange sarebbe difficilmente localizzabile sulla superficie in esame.

Ovviamente con queste tecniche è anche possibile fare misure quantitative degli spostamenti, ma ciò richiede qualche accorgimento non sempre banale anche dal punto di vista matematico.

Solo a titolo informativo, esistono diverse ad altre tecniche basate sull'interferometria speckle e utilizzate per determinare microspostamenti o deformazioni o vibrazioni di superfici rigide e quanto esposto vuole solo illustrare quelli che sono i principi fondamentali su cui queste tecniche si basano. Tra altre tecniche si possono indicare: *l'interferometria in media temporale*, particolarmente adatta allo studio delle vibrazioni; *l'interferometria Shearing* che può essere fatta anche in luce bianca; la *Contouring interferometria* che utilizza due diverse lunghezze d'onda tra le due esposizioni della superficie in esame. In particolare questa tecnica permette di fare delle analisi quantitative, in particolare su superfici inclinate, di deformazioni senza variare altri parametri geometrici, ma richiede l'utilizzo di laser multirighe.

5,3 E.S.P.I

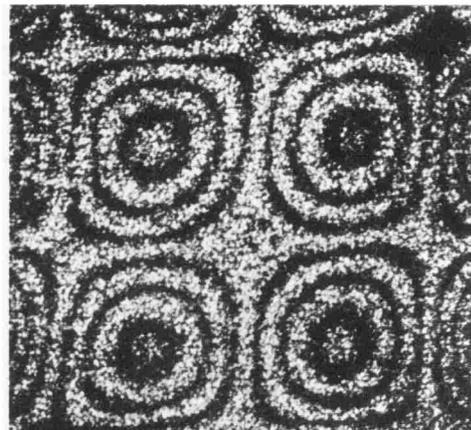
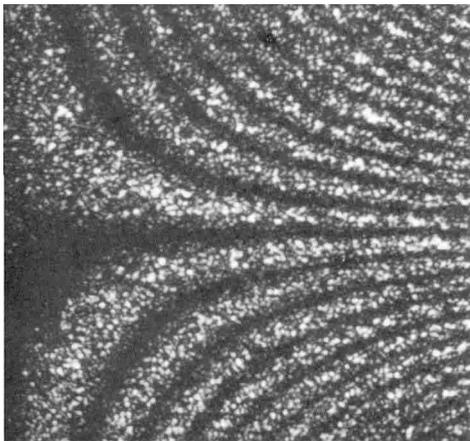
E.S.P.I è l'acronimo di una tecnica interferometrica speckle particolarmente adatta ad applicazioni in ambiente industriale, in quanto non richiede necessariamente banchi antivibranti, e nota come Electronic Speckle Pattern Interferometry. L'immagine dell'oggetto in esame (*fascio oggetto*) illuminato con luce laser, viene raccolto mediante una telecamera sul cui CCD viene inviato anche un *fascio di riferimento*, ottenuto per divisione di ampiezza assieme al *fascio oggetto*, e osservato su un monitor TV.



Il segnale dalla telecamera può passare ad una unità elettronica che memorizza l'immagine e la digitalizza. Questa operazione può essere fatta ripetutamente con la frequenza propria del tempo di formazione dell'immagine (generalmente $1/25$ di sec). Se il sistema in esame evolve nel tempo, per esempio si deforma o vibra, con variazioni sempre paragonabili alle lunghezze d'onda, le immagini successive sono leggermente differenti. Se si memorizza una immagine digitalizzata come

immagine di riferimento (in realtà è diventata una matrice di numeri legati ai toni di grigio dell'immagine) e la si confronta (per esempio per differenza) con le immagini successive, si ottiene una interferenza elettronica tra le immagini. Quello che si osserva sul monitor sarà una immagine dell'oggetto con sovrapposto un apparente pattern di frange in corrispondenza di variazioni di cammino ottico tale da determinare uno sfasamento di $\pi/2$ nella fase del pattern speckle in quel punto.

Una variante, particolarmente adatta per l'analisi di vibrazioni consiste nel non memorizzare nessuna particolare immagine di riferimento, ma osservare l'evoluzione del fenomeno in tempo reale. Il dispositivo elettronico di digitalizzazione in un certo intervallo di tempo (inferiore la $1/25$ di sec), acquisisce, digitalizza e somma un certo numero di immagini, mostrando solamente l'immagine delle media delle immagini acquisite. Se la superficie entra in risonanza si osserveranno delle frange chiare in corrispondenza dei nodi delle vibrazione (sempre fermi in ogni immagine mediata) e delle frange scure in corrispondenza dei ventri. Due esempi delle due tecniche sono mostrati nelle figure seguenti.



5,4 Olografia

L'*olografia* è un metodo di registrazione e ricostruzione di un fronte d'onda basato sulla registrazione di un pattern di frange risultante dalla *sovrapposizione coerente* (quindi con relazione di fase relativa non variabili nel tempo) tra un'onda diffusa dall'oggetto in esame (*fascio oggetto*) e un'onda di riferimento (*fascio di riferimento*) derivato dalla stessa sorgente che illumina l'oggetto in esame. La distribuzione di intensità che ne deriva e che può essere raccolta per esempio su una lastra fotografica opportuna si chiama "*ologramma*". Se un ologramma viene illuminato con il

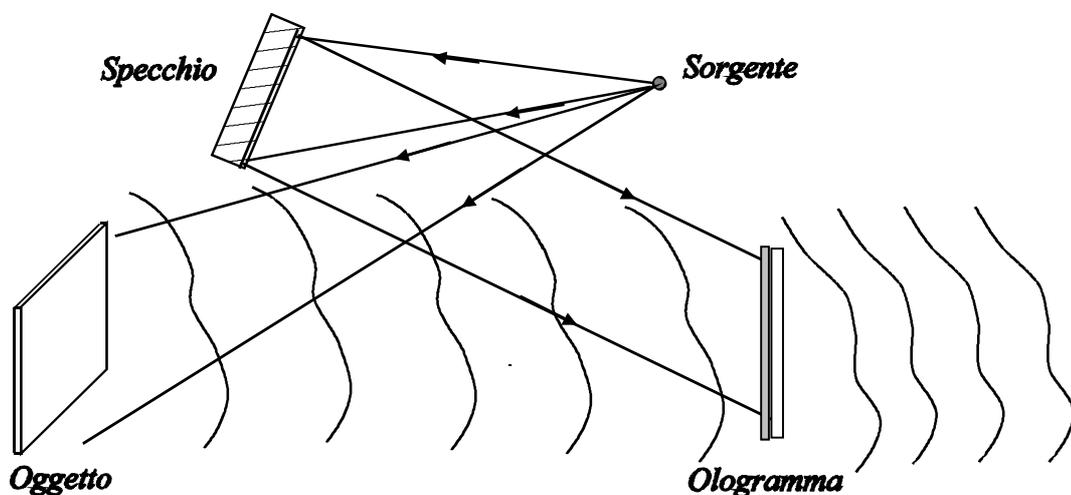
fascio di riferimento originario (cioè la lastra viene sviluppata e illuminata con un fascio laser che è diretto sulla lastra con la stessa inclinazione che aveva il fascio di riferimento all'atto della registrazione dell'ologramma), si ricostruisce il *fronte d'onda oggetto*, cioè la stessa *distribuzione di ampiezza e fase* del *fascio oggetto* all'atto della registrazione, il che vuol dire che si può veder *l'immagine virtuale* del soggetto in esame

Esistono diversi possibili set-up sperimentali per poter registrare un ologramma a seconda delle condizioni sperimentali in cui si lavora, soprattutto per quanto riguarda la creazione del fascio di riferimento, ma per tutti comunque vale una condizione comune e che riguarda la frequenza f o il periodo d del pattern di interferenza che viene registrato. Se α è l'angolo tra i due fasci, vale la relazione:

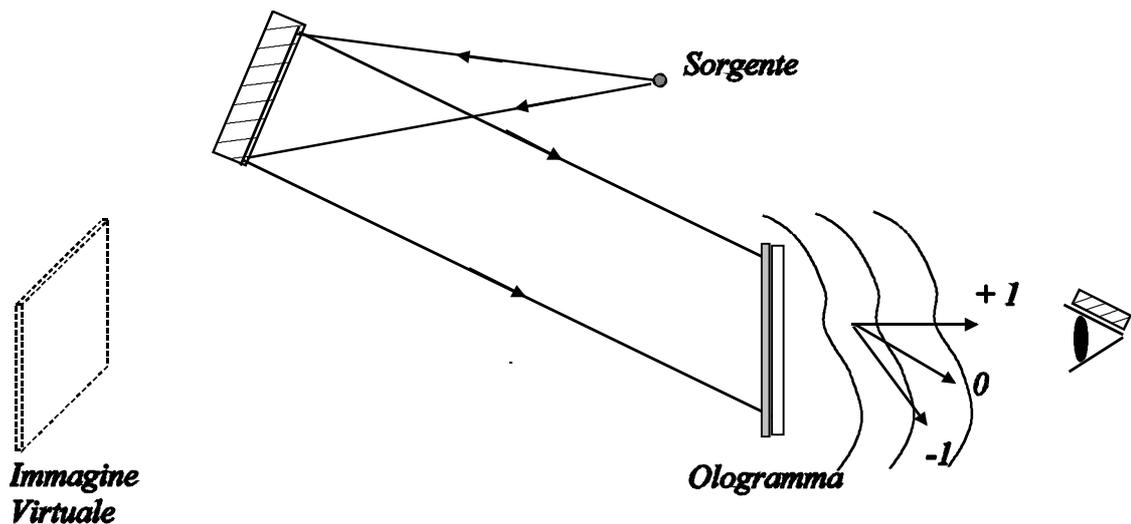
$$f = \frac{1}{d} = 2 \frac{\sin(\alpha/2)}{\lambda}$$

che vale circa 1000 mm^{-1} per cui le lastre olografiche devono avere una sensibilità dell'ordine di 1000 righe a mm . Una volta sviluppato, l'ologramma diventa una specie di *reticolo di diffrazione* in qualche modo modulato dall'oggetto illuminato, con una modulazione di intensità di tipo \cos^2 , tipica dell'interferenza.

La registrazione dell'ologramma deve avvenire in condizioni di buio e l'impressione della lastra viene fatta utilizzando un otturatore (tipo macchia fotografica) con tempo di apertura tale da poter operare nella zona lineare di impressionabilità della lastra. Una lastra sottoesposta presenterà un reticolo poco contrastato, mentre una lastra sovraesposta può presentare delle zone bruciate per cui la modulazione di intensità viene in certi punti saturata e non si ha più la modulazione tipo \cos^2 .



FASE DI REGISTRAZIONE



FASE DI RICOSTRUZIONE

Val la pena osservare che un ologramma, una volta sviluppato può esser visto come una maschera nella quale che ha una certa variazione di *trasmissione* e quindi di indice di rifrazione (si parla di *ologramma di ampiezza*) o come una variazione dello *spessore* dell'emulsione fotografica e quindi di indice di rifrazione (si parla di *ologramma di fase*). Nella pratica, gli ologrammi sviluppati spesso vengono trattati chimicamente in modo da risultare praticamente trasparenti (operazione di *bleaching*) e allora si parlerà solo di *ologramma di fase*.

Le principali caratteristiche di un ologramma rispetto ad una comune fotografia consiste in quanto segue. La fotografia convenzionale riesce a registrare sulla pellicola solo la distribuzione di intensità. Un ologramma contiene informazioni sia riguardanti la distribuzione di intensità di luce diffusa dall'oggetto, ma anche riguardanti la distribuzione di fase dell'onda diffusa dall'oggetto rispetto a quella costante su tutto il fronte d'onda di riferimento. La variazione in ampiezza della luce diffusa è registrata sull'ologramma come variazione del contrasto del pattern di frange, mentre l'informazione circa la fase è legata alla forma e frequenza delle frange di interferenza.

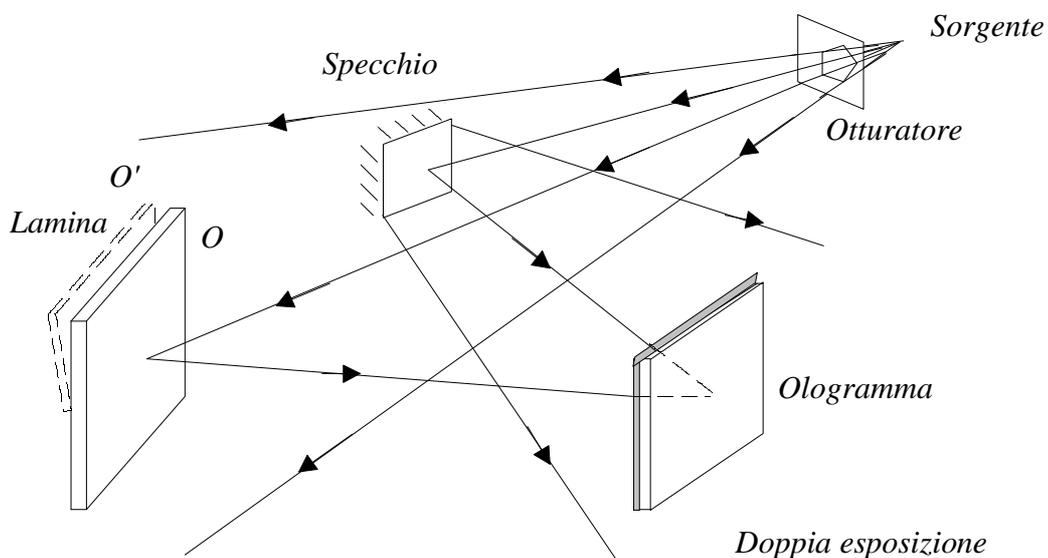
E' importante ricordare che quanti esposto vuole solo illustrare alcuni principi generali e di base dell'olografia e non esaurisce assolutamente tutto quanto relativo alle proprietà e classificazione degli ologrammi e per una più completa trattazione dell'argomento ci si deve riferire ad una letteratura specialistica

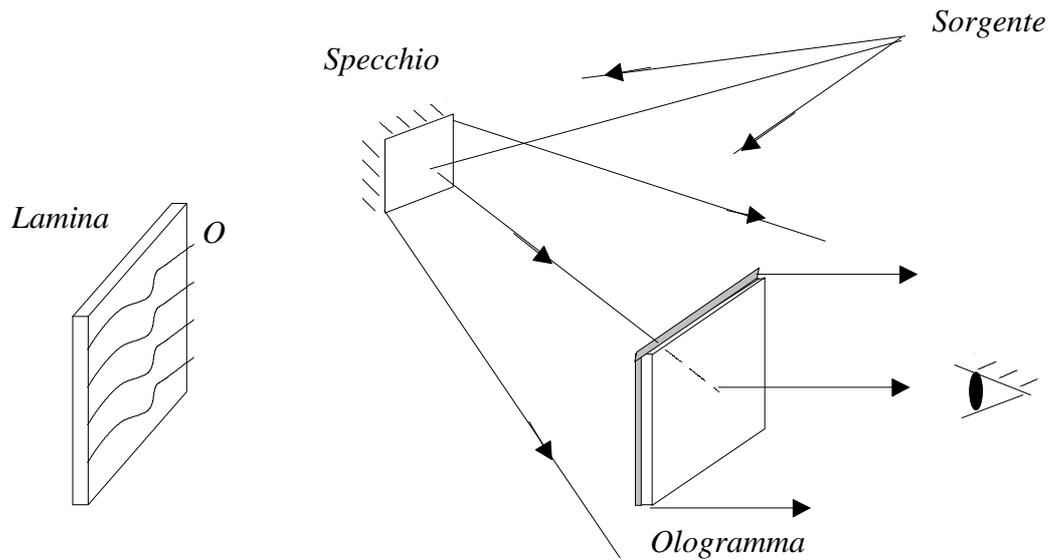
5,5 Interferometria olografica

Anche in questo caso facciamo riferimento a quelli che sono i principi base dell'*interferometria olografica*, senza entrare in particolari dettagli, soprattutto legati alle relazioni analitiche che intervengono in questo campo. E' importante osservare che questa tecnica è un potente strumento di analisi di spostamenti, deformazioni (comunque sempre dell'ordine delle lunghezze d'onda) e vibrazioni risonanti di superfici metalliche diffondenti.

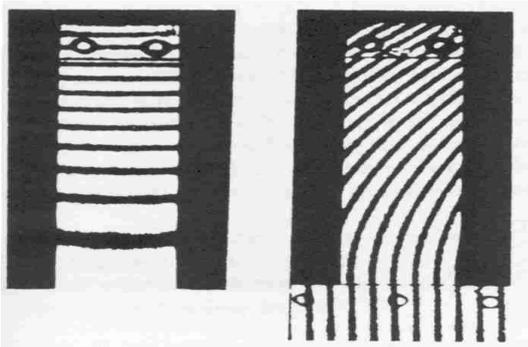
Esistono due metodi olografici interferometri : a) "*interferometria olografica biesposta*", utilizzata in particolare nell'analisi di deformazioni o spostamenti e si riferisce a due istanti successivi e fissi del sistema in esame; b) "*interferometria olografica in media temporale*" particolarmente adatta allo studio delle risonanze di vibrazioni di superfici.

L'*interferometria olografica biesposta* viene realizzata nel modo seguente. Si registra l'ologramma di un oggetto e senza svilupparla si impressiona una seconda volta la stessa lastra, registrando l'oggetto dopo che è stato spostato o sottoposto a qualche stress; solo adesso si sviluppa la lastra. In questo modo si ha l'interferenza tra i due pattern speckle dovuti alle due esposizioni e la cui correlazione dipende dallo spostamento della superficie. Ricostruendo l'ologramma sviluppato si vede l'immagine del soggetto in esame con sovrapposto un pattern di frange. La forma e il passo del sistema di frange sono riconducibili alla deformazione; tanto più sono fitte le frange, tanto più è stato ampio lo spostamento. Lo schema della fase di registrazione del riesposto e di ricostruzione dell'interfreogramma sono mostrati nella figure seguenti:





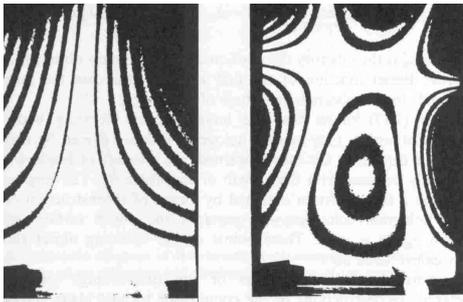
Nella seguente figura è mostrato un *interferogramma olografico*.



L'immagine si riferisce a due istanti successivi e fissi di un bending di superficie metallica

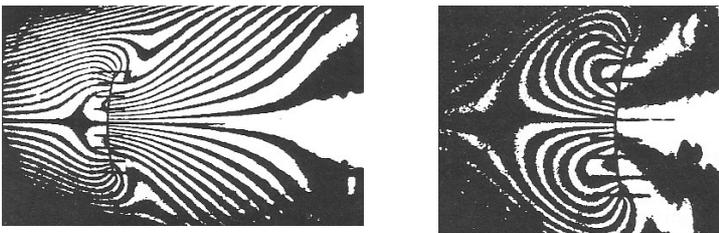
Una variante della tecnica biesposta consiste nel registrare l'ologramma del soggetto in una certa posizione presa come immagine di riferimento. Successivamente si ripone la lastra nella stessa posizione in cui si trovava nella fase di registrazione. Questo può essere fatto utilizzando particolari portalastra dotati di micromanipolatori che permettono spostamenti nelle tre direzioni; lastra sviluppata e oggetto sono illuminati contemporaneamente. Osservando l'oggetto in esame attraverso la lastra sviluppata si può vedere l'oggetto stesso e contemporaneamente si ricostruisce l'ologramma registrato. In questo modo si vede l'oggetto in esame con sovrapposto un pattern di frange, dovuto alla non perfetta sovrapposizione dell'immagine olografica e dell'oggetto visto direttamente. Si agisce sui micromanipolatori del portalastra fino a che le frange scompaiono. Se a questo punto l'oggetto in esame modifica il suo stato, osservandolo attraverso la lastra è possibile seguirne l'evoluzione guardando le variazioni del pattern di frange di interferenza che ricompaiono sull'immagine dell'oggetto. In questo modo è possibile analizzare in tempo reale il processo di deformazione (comunque sempre dell'ordine delle lunghezze d'onda).

Anche nella tecnica di interferometria olografica, “*interferometria in media temporale*“, particolarmente adatta allo studio delle risonanze di vibrazioni di superfici, il processo di vibrazione viene seguito, attraverso l’ologramma di riferimento, nel tempo. Nella figura sono mostrati due modo di vibrazione : un semplice modo *bending* ed un modo *bending-torsionale* di una aletta di turbina.

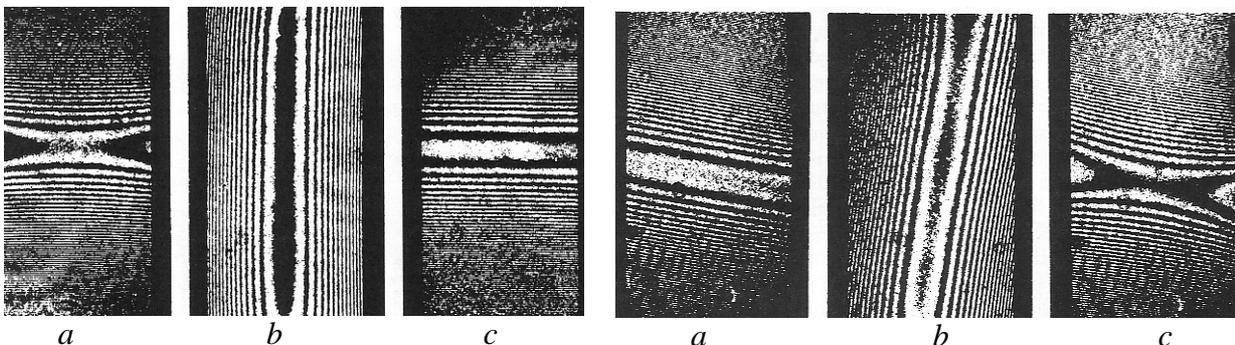


Nella figura sono mostrati due modo di vibrazione : un semplice modo bending ed un modo bending-torsionale di una aletta di turbina.

Per completare questa panoramica è opportuno ricordare che con le tecniche di interferometria olografica, come pure con l’interferometria speckle e la E.S.P.I , possono essere fatta diversi tipi di analisi su materiali. Per esempio vale la pena di ricordare le analisi di difetti all’interfaccia di due metalli uniti tra loro, difetti di saldature, disomogeneità o anisotropie dei materiali. A seconda della sollecitazione a cui viene sottoposto il materiale (banding, riscaldamento, ecc..) si possono manifestare discontinuità del pattern di frange o particolari strutture. Alcuni esempi



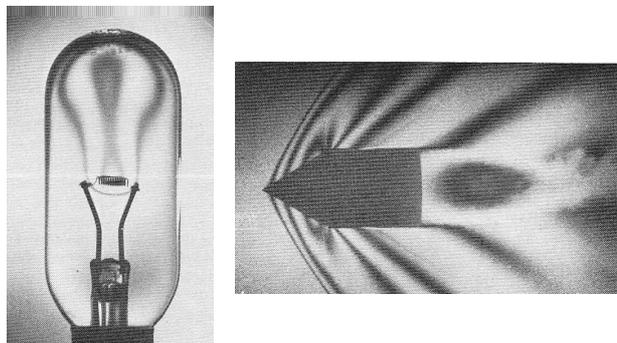
Immagini di un guscio cilindrico che sottoposto a torsione presenta incrinature



Campioni di lamierino metallico rettangolare di spessore 4 mm, delle stesse dimensioni e sottoposti alle stesse sollecitazioni di diverso tipo. Nelle seconde tre la diversa pendenza delle frange è dovuta ad un errore nel taglio del lamierino dalla lastra metallica

E' necessario ricordare che per una valutazione quantitativa degli spostamento non può esser sufficiente un solo interferogramma, in quanto lo spostamento è un vettore, e quindi devono esser fatte ulteriori considerazioni o esposizioni. Questo tipo di analisi richiede un maggior approfondimento dell'argomento e che non può esser fatto in questo breve corso.

Come ultimo esempio di applicazione dell'interferometria lo grafica (ma le stesse cose si potrebbero dire anche per i cari tipi di interferometria speckle), facciamo riferimento al caso di studio di fenomeni molto veloci. Le tecniche di analisi di questi fenomeni sono le stesse dei casi illustrati precedentemente, con la differenza che in questi casi vengono usati *laser pulsati*. Nella figura seguente sono mostrati due esempi di interferogrammi biesposti assai significativi : *a)* il moto convettivo all'interno di una lampadina ; *b)* l'onda d'urto di un proiettile.



A conclusione può essere importante fare la seguente osservazione. L'interferometria olografica presenta immagine molto nitide ed il pattern di frange è sempre ben contrastate in quanto molto meno disturbato dallo speckle della luce diffusa dall'oggetto. L'interferometria speckle presenta sempre immagini meno nitide, a causa dello speckle che viene ingrandito dai dispositivi ottici utilizzati. D'altro canto l'olografia richiede una apparato sperimentale di applicazione assai sofisticato (banchi ottici, necessità del buio in fase di registrazione, sviluppo di lastre ecc..) e quindi viene utilizzata sono per applicazioni in laboratorio. Viceversa l'interferometria speckle si presta assai bene per un utilizzo anche in ambiente di lavoro (in particolare l'E.S.P.I.) e può fare uso di fibre ottiche e quindi trovare applicazione anche nei casi in cui si voglia fare un'analisi in situazioni particolarmente difficili , per esempio all'interno di una struttura chiusa.

Va ancora ricordato che in tutti i casi esiste poi il problema dell'interpretazione delle frange che appaiono. Questo apre tutta una serie di nuove problematiche ed è un campo in piena evoluzione grazie alle nuove tecniche di analisi di immagini e alla possibilità di sempre più facile utilizzo di sofisticati algoritmi di calcolo.