

SULLA INTERFEROMETRIA OLOGRAFICA DIGITALE

A. Baldi, R. Ambu, F. Bertolino, F. Ginesu

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Cagliari, Piazza d'Armi - 09123 Cagliari (CA), e-mail: baldi@iris.unica.it

SOMMARIO

L'interferometria olografica è una tecnica ottica di indagine ben nota che consente di misurare gli spostamenti di un provino con relativamente poche difficoltà. Nella sua forma classica, essa utilizza come supporto di registrazione una lastra fotografica di alta sensibilità ma nulla vieta, almeno in linea di principio, l'uso di supporti diversi o addirittura la registrazione diretta con telecamera digitale. Quest'ultima opzione, benché soggetta a forti limitazioni a causa della scarsa risoluzione spaziale del sensore, sta diventando una scelta praticamente obbligata perché i maggiori produttori di lastre hanno chiuso le loro linee di produzione.

L'obiettivo del lavoro è quindi la definizione delle potenzialità della olografia digitale per verificare se, malgrado le limitazioni che essa presenta, sia comunque applicabile alla misura di deformazioni di oggetti di interesse meccanico.

I risultati ottenuti mostrano alcuni elementi di criticità nell'uso della tecnica, legati alla particolare configurazione ottica richiesta; essi, tuttavia, in futuro potrebbero essere ridotti dal miglioramento dell'hardware di acquisizione, in particolare dalla diminuzione delle dimensioni del pixel della telecamera e dall'incremento della risoluzione dinamica del sensore.

ABSTRACT

The holographic interferometry is a well-known experimental technique which allows for measuring the displacements field of a sample in a relatively simple way.

In its classical implementation, this technique uses high sensitivity photographic plates as recording media; nevertheless there is no reason why a different recording support, for example a CCD camera, can not be used (obviously in this case the reconstruction step has to be performed in numerical form).

Since most of the industries producing holographic plates have stopped their lines, the digital version of holographic interferometry is becoming more than an option: this work aims to establish the limitation and the technical aspects that have to be taken into account when using a camera as the recording media. In fact, the low spatial resolution of the hardware requires special precaution to be taken both while building the setup and while performing the measurement.

1. INTRODUZIONE

L'interferometria olografica è una tecnica ben nota [1], di relativamente semplice applicazione, che consente di misurare spostamenti submicrometrici di un provino sia in campo statico che in campo dinamico. Nella sua forma più semplice, infatti, essa richiede soltanto la realizzazione di un ologramma del pezzo scarico: dal confronto delle piccole differenze esistenti tra l'oggetto virtuale (ricostruito illuminando l'ologramma) e l'oggetto reale sotto carico, nasce un quadro di frange di interferenza, dalla cui analisi è possibile risalire agli spostamenti subiti dall'oggetto.

Nella sua forma classica, la tecnica utilizza per la registrazione dell'ologramma una lastra fotografica con emulsioni di alta risoluzione spaziale (3000–10000 linee per mm), ma concettualmente nulla vieta l'utilizzo di supporti diversi o addirittura la diretta acquisizione tramite fotocamera digitale. In quest'ultimo caso, ovviamente, la ricostruzione dell'ologramma ed il confronto interferenziale delle due configurazioni dovrà essere eseguito per via numerica.

L'utilizzo dell'acquisizione digitale, potenzialmente molto interessante per l'eliminazione delle fasi di sviluppo e fissaggio delle lastre, è tuttavia ostacolata da problemi di risoluzione che anche con le migliori telecamere esistenti oggi in commercio è ancora molto lontana da quella garantita dai supporti fotografici. Ciò pone notevoli limitazioni all'applicabilità della tecnica e richiede l'utilizzo di angoli di sensibilità molto stretti (2–3 gradi). Per contro la crescente difficoltà di reperimento delle lastre (i maggiori produttori fotografici hanno chiuso le relative linee di produzione) sta rendendo quasi impossibile l'utilizzo di questa tecnica sperimentale per l'assenza di supporti di registrazione adeguati.

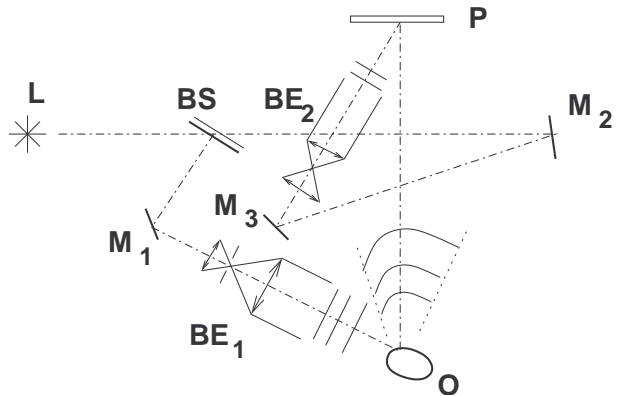


Fig. 1. Set up per olografia

2. LA OLOGRAFIA DIGITALE

2.1 L'olografia "classica"

Nella sua forma classica, un setup olografico è relativamente semplice (fig. 1): il fascio di luce coerente proveniente dal laser **L** viene diviso in due parti dal beam splitter **BS** ed inviato su un ramo, verso l'oggetto (tramite lo specchio **M**₁ ed il beam expander **BE**₁) e sull'altro verso la lastra olografica (attraverso gli specchi **M**₂ ed **M**₃ ed il beam expander **BE**₂). Il fronte luminoso "riflesso" dall'oggetto, interagisce con l'onda di riferimento dando luogo ad una figura interferenza. L'ologramma è essenzialmente la registrazione sulla lastra olografica **P** della sola intensità (infatti non è possibile registrare direttamente la fase). Se si indica con $r(x,y)$ l'onda di riferimento e con $o(x,y)$ quella proveniente dall'oggetto, l'intensità sarà pari a

$$H(x, y) = |r(x, y) + o(x, y)|^2 = |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 + r^*(x, y)o(x, y) + r(x, y)o^*(x, y) \quad (1)$$

dove si è utilizzato l'asterisco per indicare il complesso coniugato.

Se, dopo aver rimosso l'oggetto, si illumina l'ologramma con la sola onda di riferimento, il fronte uscente sarà proporzionale ai 4 termini presenti nella (1). Di questi, il primo non è altro che un termine uniforme corrispondente al fascio di riferimento (non diffratto), il secondo

corrisponde al campo speckle dell'oggetto (in pratica la sua autocorrelazione), il terzo ed il quarto non sono altro che l'immagine reale e virtuale dell'oggetto.

I primi due termini, essenzialmente dei disturbi, non costituiscono un serio problema nell'olografia classica mentre possono diventare molto importanti per l'olografia digitale.

2.2 Ricostruzione numerica: integrale di Fresnel

Se al posto della lastra olografica **P** si pone una telecamera, non è possibile eseguire la ricostruzione semplicemente illuminando l'ologramma con il fascio di riferimento; viceversa se ne deve simulare numericamente l'effetto.

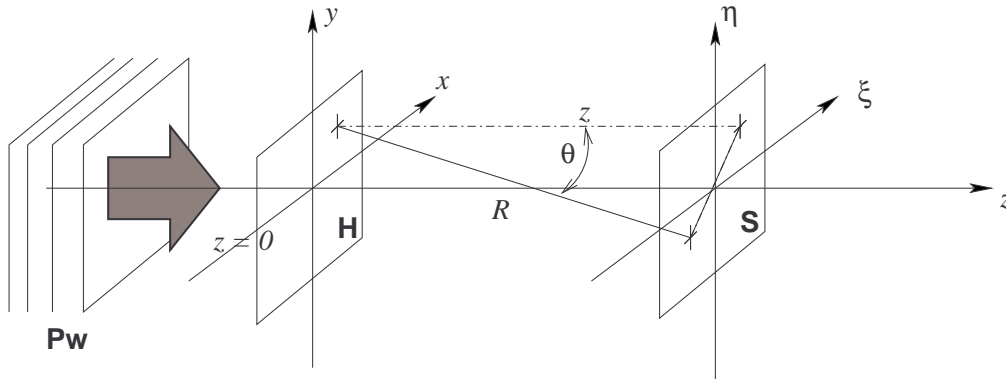


Fig. 2. Configurazione di riferimento per la ricostruzione digitale di un ologramma

Si consideri quindi la fig. 2, dove si è supposto di porre virtualmente l'ologramma **H**, registrato tramite la telecamera, in corrispondenza del piano $z = 0$. Questo verrà illuminato tramite un'onda piana **Pw** e darà luogo ad una figura di diffrazione sul piano dello schermo **S** posto a distanza z dall'ologramma.

In un punto dello schermo, supposto distante dall'ologramma, il campo può essere stimato come sovrapposizione delle onde sferiche emesse da tutti i punti di $H(x,y)$ [2-5]:

$$E(\xi, \eta, z) = \frac{i E_0}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} H(x, y) \frac{e^{-ikR}}{R} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy \quad (2)$$

dove si è indicato con R la distanza tra il punto sorgente ed il punto in esame, con θ l'angolo di visibilità, con k il rapporto $2\pi/\lambda$ e con E_0 l'intensità media dell'onda incidente.

Il calcolo della (2), il cosiddetto integrale di *Fresnel-Kirchhoff*, è però estremamente pesante a causa della doppia integrazione che deve essere condotta per ogni punto in esame. Se però le dimensioni dell'ologramma e dello schermo sono piccole rispetto alla distanza z (ossia $|x| \ll z$, $|y| \ll z$, $|\xi| \ll z$, $|\eta| \ll z$), allora l'angolo θ diventa piccolo ed il suo coseno può essere considerato pari ad 1. Inoltre sotto queste ipotesi anche R non differisce molto da z , per cui il rapporto $1/R$ può essere sostituito con $1/z$ ed al posto di R nell'esponente si può porre il primo termine della sua espansione in serie di Taylor:

$$R = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2} = z \sqrt{1 + \frac{(\xi - x)^2}{z^2} + \frac{(\eta - y)^2}{z^2}} \cong z + \frac{(\xi - x)^2}{2z} + \frac{(\eta - y)^2}{2z} \quad (3)$$

Sostituendo la (3) nella 2 si ottiene infine l'approssimazione di *Fresnel* all'integrale di *Fresnel-Kirchhoff*:

$$E(\xi, \eta, z) = \frac{i E_0 e^{-ikz}}{\lambda z} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} H(x, y) e^{-i \frac{k}{2z} [(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]} dx dy$$

ossia, sviluppando i prodotti,

$$E(\xi, \eta, z) = \frac{i E_0}{\lambda z} e^{-i \frac{\pi}{\lambda z} (\xi^2 + \eta^2)} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} H(x, y) e^{-i \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)} e^{i \frac{2\pi}{\lambda z} (\xi x + \eta y)} dx dy \quad (4)$$

Il termine che moltiplica all'integrale della (4) può essere completamente omissivo in quanto la parte reale va solo ad aggiungere un fattore di scala all'intensità e la parte immaginaria uno sfasamento costante al campo di fase. Poiché quel che interessa, sia per la fase che per l'intensità, sono le variazioni relative, entrambi questi fattori risultano quindi insignificanti.

Un'attenta analisi dell'integrale presente nella (4) permette di notare che esso è, a parte un fattore sferico di fase, una trasformata inversa di Fourier. Ciò consente di ridurre il processo di ricostruzione a due o tre semplici passi:

1. moltiplicazione della funzione di trasmittanza $H(x,y)$ (l'ologramma) per il fattore sferico $\exp[-i\pi (x^2 + y^2)/(\lambda z)]$;
2. calcolo della trasformata inversa di Fourier della funzione così ottenuta;
3. (opzionale) moltiplicazione per il fattore di scala.

Il risultato della trasformata inversa di Fourier è ovviamente una funzione complessa, per cui punto per punto è possibile stimare sia la fase che l'ampiezza:

$$I(\xi, \eta, z) = |E(\xi, \eta, z)| = \{\text{Re}[E(\xi, \eta, z)]\}^2 + \{\text{Im}[E(\xi, \eta, z)]\}^2$$

$$\phi(\xi, \eta, z) = \arctan \frac{\text{Im}[E(\xi, \eta, z)]}{\text{Re}[E(\xi, \eta, z)]} \quad (5)$$

Le (5) mostrano il vantaggio dell'olografia digitale sugli altri metodi sperimentali: è infatti possibile risalire al campo di fase direttamente con una sola immagine.

In pratica la funzione di trasmittanza viene campionata su di una matrice (i pixel della CCD) per cui le formule 2-5 devono essere riscritte in forma discreta: gli integrali devono essere trasformati in sommatorie e la trasformata di Fourier deve essere sostituita da una DFT. Il risultato sarà una matrice (complessa) che discretizza la $E(\xi, \eta, z)$ sullo schermo. Le dimensioni del pixel dello schermo risulteranno essere (si veda anche l'eq. 9)

$$\Delta \xi = \frac{z \lambda}{M \Delta x} \quad \Delta \eta = \frac{z \lambda}{N \Delta y} \quad (6)$$

dove si è presa in considerazione una matrice di N righe ed M colonne.

La stessa trattazione può essere condotta anche nel caso di fascio di riferimento sferico. I risultati sono essenzialmente identici a parte la comparsa di un ulteriore termine che moltiplica la trasmittanza nella eq. 4 (il complesso coniugato della fase del fronte sferico incidente).

Occorre osservare che in letteratura [7] è stato proposto un approccio alternativo all'esecuzione diretta dei prodotti presenti nella (4), basato sul teorema della convoluzione. Il risultato però richiede due trasformate dirette di Fourier ed una inversa; per di più, poiché la trasformata inversa riporta l'immagine dal dominio delle frequenze a quello dello spazio, la

dimensione del pixel dello schermo risulta essere $\Delta\xi = \Delta x$ ossia l'immagine risulta essere osservata tramite una finestra delle dimensioni del sensore della telecamera.

2.4 Inserimento di una lente e rotazione nello spazio dell'oggetto

La ricostruzione numerica tramite la (4) ha tutte le caratteristiche della ricostruzione "classica", in particolare le informazioni spaziali sono preservate. Ciò permette alcune interessanti manipolazioni. In particolare se l'angolo di incidenza del fascio di ricostruzione non è più parallelo all'asse Z , ma è ruotato nello spazio, l'immagine ricostruita risulterà anch'essa ruotata. Ciò consente di osservare l'oggetto da punti di vista diversi, cosa possibile solo con un ologramma. Questo effetto è estremamente semplice da ottenere perché una rotazione del fascio di riferimento ha solo l'effetto di aggiungere un termine lineare alla fase. In quanto tale può essere modellata come

$$\phi(x, y, \vartheta, \varphi) = e^{i\frac{2\pi}{\lambda}x\sin\vartheta} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}y\sin\varphi} \quad (7)$$

dove ϑ e φ sono le rotazioni rispettivamente attorno all'asse Y ed X .

La ricostruzione numerica permette anche di inserire una lente virtuale nell'immagine. Infatti una lente sferica di lunghezza focale f può essere modellata come un termine del tipo

$$l(x, y) = e^{i\frac{\pi}{\lambda f}(x^2+y^2)} \quad (8)$$

Tale termine si comporta come una lente posta in corrispondenza del piano dell'ologramma per cui, nota la distanza tra ologramma e schermo, è possibile scegliere la lunghezza focale adatta all'ingrandimento voluto.

3 REALIZZAZIONE PRATICA E LIMITI DELLA OLOGRAFIA DIGITALE

L'utilizzo diretto di un setup quale quello illustrato in fig. 1 per la realizzazione di un ologramma digitale, presenta notevoli difficoltà. Le dimensioni dei pixel del sensore, infatti, impongono severi limiti alla tecnica, che devono essere presi in considerazione al fine di ottenere risultati soddisfacenti.

Nelle normali telecamere, un pixel (ammesso che sia quadrato, cosa tutt'altro che scontata) ha dimensioni tra i 6 ed i 10 μm ; ciò vuol dire che non potranno essere risolte più di 80 linee per millimetro (intendendo per linea la coppia bianco/nero). Prendendo in considerazione l'equazione del reticolo di diffrazione, si ottiene quindi

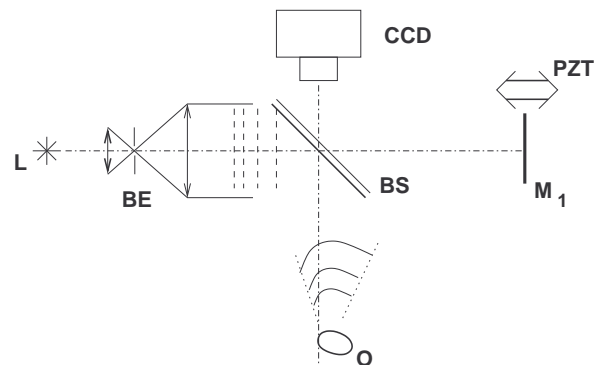


Fig. 3. Setup per olografia digitale

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\lambda}{2\Delta x} \quad S_{\max} = \frac{\lambda z}{2\Delta x} \quad (9)$$

dove ϑ_{\max} è l'angolo massimo di visione e S_{\max} è la dimensione massima ammissibile dell'oggetto.

Sostituendo valori tipici per i parametri appaiono subito i limiti della tecnica: per fare un esempio la dimensione massima ammissibile per un oggetto posto alla distanza di un metro, il cui ologramma è registrato con una telecamera con pixel da 8 μm ed illuminato con un laser HeNe ($\lambda=632.8$ nm), risulta pari a 39.55 mm, ossia un angolo di visione di poco più di 2 gradi. A causa di questi limiti, per l'olografia digitale si tendono ad utilizzare setup simili a quelli tipici della interferometria classica. Un tipico esempio è riportato in fig. 3: il fascio proveniente dal laser **L** viene espanso dal beam expander **BE** per poi essere diviso in due dal beam splitter **BS**. Una parte va ad incidere sullo specchio **M₁** creando così il fascio di riferimento, mentre l'altra va ad illuminare l'oggetto **O**. L'ologramma, frutto della ricombinazione dei fasci operata dal beam splitter, è infine registrato dalla telecamera **CCD**. Tale configurazione consente di avere un fascio di riferimento perfettamente in asse e quindi di massimizzare la dimensione dell'oggetto osservabile. Si noti che questi è posto nello schema di fig. 3 leggermente fuori asse: si tratta di una scelta ben precisa in quanto l'immagine ricostruita contiene tutti i termini della eq. (1) e per di più essa è il risultato di una trasformata di Fourier. La ricostruzione conterrà, quindi, un'area centrale fortemente luminosa (corrispondente al primo termine della eq. (1) sovrapposta, nel caso di oggetto perfettamente in asse, all'immagine reale ed a quella virtuale (termini 3 e 4) ed avvolta da una nuvola speckle. Anche se è possibile eliminare, almeno parzialmente, i due termini di fondo, non è però possibile eliminare l'immagine virtuale (rovesciata) per cui, nel caso sia possibile, è opportuno disporre l'oggetto leggermente fuori asse.

3.1 Eliminazione del fondo

La presenza del termine non diffratto rende spesso completamente invisibile un ologramma: nelle figure 4 e 5, è ad esempio riportata la ricostruzione di uno stesso ologramma con e senza la rimozione del fondo. Nel primo caso l'oggetto (un dado) è facilmente riconoscibile, mentre nel secondo esso è completamente mascherato dall'intenso picco centrale.

Poiché il termine non diffratto deriva dai primi due termini della (1), sono possibili due strategie per la sua eliminazione [8–10]: registrando separatamente il fascio di riferimento (primo termine della (1)) e dell'oggetto (secondo termine) è possibile, prima della ricostruzione, sottrarli alla matrice di trasmittanza ottenendo così una soppressione molto efficace del termine “continuo”. Se non si è disposti ad acquisire due ulteriori immagini, si può osservare che il termine di ordine 0 della trasformata di Fourier corrisponde ad un valore medio aggiunto a tutti gli elementi della matrice. Calcolando quindi la media della matrice di trasmittanza e sottraendola a quest'ultima

$$H'(i, j) = H(i, j) - \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M H(i, j) \quad (10)$$

è possibile eliminare il (solo) termine costante.

Si noti che la (10) porta a valori negativi dell'intensità. Ciò è fisicamente impossibile, ma perfettamente trattabile da un punto di vista numerico (questa osservazione è valida anche nel caso si sottraggano direttamente le immagini del fascio oggetto e del fascio di riferimento).

3.2 Utilizzo del Phase Shifting

Osservando la figura 3, si sarà notata la presenza di un attuatore piezoelettrico che movimentava lo specchio **M₁**. Esso consente di eseguire un phase shifting ed utilizzare questa tecnica per la ricostruzione dell'ologramma[11–13]. Movimentando il fascio di riferimento è infatti possibile avere una ricostruzione accurata del fascio oggetto sia per quel che riguarda la fase che

l'ampiezza. E' quindi possibile ricostruire per via numerica l'ampiezza complessa che verrà utilizzata come funzione di trasmittanza all'interno dell'integrale di Fresnel.

Questo approccio è vantaggioso in quanto la ricostruzione del fascio oggetto non dipende dalla forma del fascio di riferimento—uno dei problemi dell'olografia digitale— per di più l'assenza del fascio di riferimento porta alla soppressione sia del termine continuo ad esso collegato che alla scomparsa dell'immagine virtuale (il campo speckle dell'oggetto ovviamente rimane). Per contro tale approccio è vantaggioso solo se si desidera ricostruire la forma degli oggetti [14–17]: l'utilizzo dell'integrale di Fresnel per il calcolo del campo di fase (come è spesso necessario nella maggior parte delle tecniche ottiche di misura) ha poco senso, visto che questo è già noto come risultato del phase shifting.

4 APPLICAZIONI

Varie sono le applicazioni possibili della olografia digitale. Essa infatti consente, oltre alla trasposizione numerica di tutte le metodologie di analisi tipiche della interferometria olografica, anche l'utilizzo di approcci completamente nuovi, impossibili da realizzare con le normali tecniche ottiche. Ad esempio la conoscenza dei campi di fase permette, nel caso della interferometria olografica, lo sviluppo di un approccio alternativo in cui il calcolo del campo di deformazione viene effettuato direttamente a partire dalla differenza dei campi di fase senza passare attraverso la loro combinazione.

Prima di affrontare qualche esempio di misura, è però opportuno partire dall'algoritmo di ricostruzione: le figure 4 e 5 mostrano il risultato dell'utilizzo della (4) per la ricostruzione dell'ologramma di un semplice oggetto (un dado). Si noti che esse corrispondono agli stessi dati di partenza, ma sono state ottenute con e senza sottrazione dei termini di fondo (fig. 6–8).

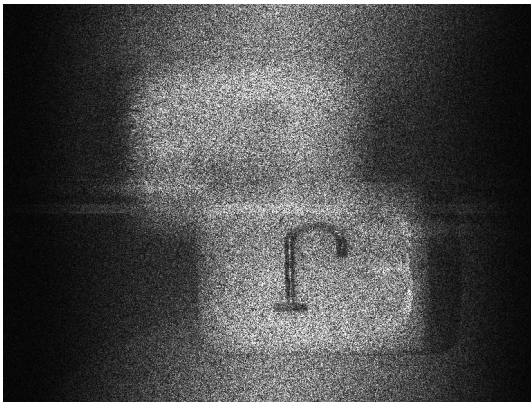


Fig. 4. Ricostruzione di un ologramma con sottrazione del fondo. Si noti l'immagine virtuale rovesciata e parzialmente sovrapposta all'immagine reale.

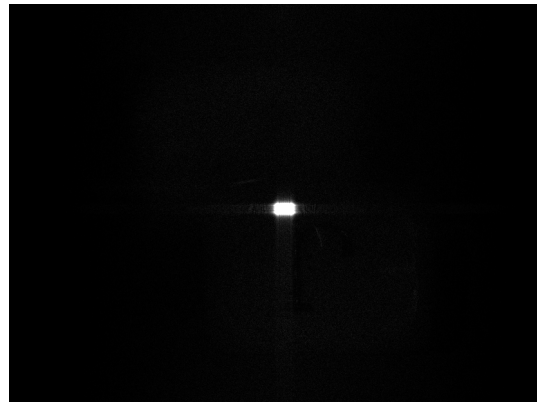


Fig. 5. Ricostruzione dello stesso ologramma di fig. 4 senza soppressione del fondo

Nella fig.4 è possibile riconoscere, parzialmente sovrapposta alla immagine reale, anche l'immagine virtuale (ovviamente capovolta). Nel caso della fig. 5, invece, il termine corrispondente al valor medio è così alto da oscurare tutti gli altri; l'immagine del dado non è che una vaga ombra.

Si noti che la ricostruzione è stata possibile benché la dinamica dell'ologramma sia decisamente bassa (figg. 6 e 7) e il fascio di riferimento presenti vari termini spuri, dovuti alla presenza di polvere ed ad un sistema di frange legato ad una riflessione interna al beam splitter.

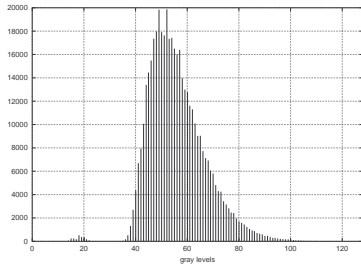


Fig. 6. Istogramma dell'ologramma relativo alle figg. 4 e 5.

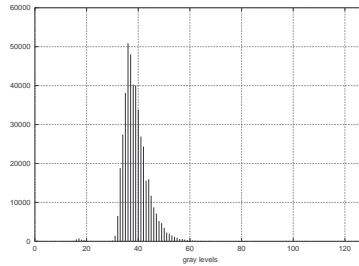


Fig. 7. Istogramma del fascio oggetto relativo alle figg. 4 e 5

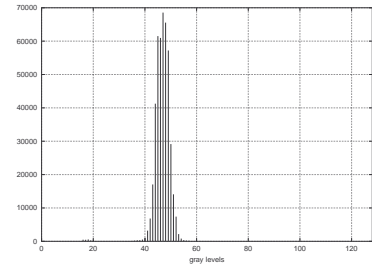


Fig. 8. Istogramma del fascio di riferimento relativo alle figg. 4 e 5.

Le figure 9 e 10 mostrano invece un esempio di interferometria olografica, in particolare la fig. 9 mostra il campo di frange legato agli spostamenti fuori dal piano di una zona di una flangia fissata su 3 punti e caricata al proprio centro, mentre la fig. 10 mostra uno dei due ologrammi utilizzati per la ricostruzione. Il campo di fase (modulo due π) è stato ottenuto come sottrazione della fase estratta da due ologrammi registrati prima e dopo l'applicazione del carico. Così come accade per l'interferometria speckle, ognuno dei campi di fase è ovviamente caotico ma la loro differenza è deterministica e legata allo spostamento fuori dal piano del provino.

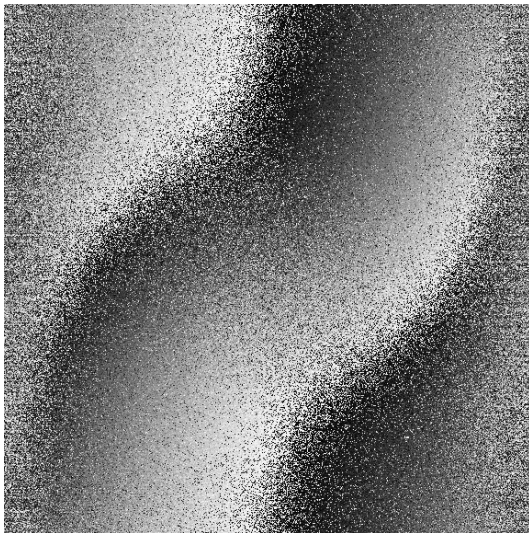


Fig. 9. Phase modulo 2π ottenuto per interferometria olografica digitale.



Fig. 10. Uno dei due ologrammi utilizzati per il calcolo del campo di fase illustrato in 9.

5 CONCLUSIONI

L'interferometria olografica digitale presenta, nei confronti delle tecniche classiche (interferometria classica, speckle interferometria, interferometria olografica "fotografica"), aspetti positivi e negativi. In particolare, tra gli aspetti positivi possiamo ricordare che

- § la particolare metodologia di trattamento dei dati consente di ottenere direttamente fase ed intensità con una sola immagine;
- § la sensibilità del metodo è dettata dalla configurazione geometrica del sistema e dalle caratteristiche della sorgente, mentre non dipende dal tipo di registrazione. Essa è quindi identica a quella della interferometria olografica classica;
- § la disponibilità del campo di fase consente metodologie di ricostruzione impossibili da realizzare con la tecnica "analogica"; ad esempio è relativamente semplice calcolare la

fase risultante in una applicazione di interferometria olografica come differenza della ricostruzione separata di due ologrammi.

Per contro molti sono gli aspetti negativi:

- § la tecnica, specialmente se utilizzata nella sua versione standard (acquisizione di una sola immagine senza far uso del phase shifting) è estremamente sensibile al corretto allineamento del setup. Anche il bilanciamento dell'intensità relativa dei fasci è estremamente delicato in quanto il fascio di riferimento è quasi sempre molto più intenso del campo speckle proveniente dall'oggetto abbattendo in tal modo la modulazione;
- § le dimensioni massime dell'oggetto sono limitate dalle dimensioni del pixel della telecamera. E' teoricamente possibile inserire una lente negativa per ampliare il campo, ma questo rende ancora più critico l'allineamento;
- § l'ologramma contiene sia l'immagine reale che la virtuale rendendo in tal modo impossibile l'utilizzo dell'intero campo visivo disponibile. Anche se questo problema può essere superato facendo uso della tecnica del phase shifting, questa soluzione priva però la metodologia del suo principale vantaggio rispetto alle altre tecniche, cioè della possibilità di una ricostruzione con una sola immagine;
- § la tecnica si basa sulla conoscenza a priori della forma del fascio di riferimento. La qualità della ricostruzione è quindi fortemente vincolata da quanto la forma del fascio si discosta dal suo modello teorico; si noti che questo problema non viene risolto dalla sottrazione dell'intensità del fascio di riferimento perché la figura di interferenza registrata nell'ologramma è comunque stata ottenuta come interferenza del fascio oggetto con un campo distorto, risultandone quindi comunque affetta;
- § la ricostruzione ha esattamente le stesse caratteristiche speckle di un ologramma fotografico per cui, se utilizzato semplicemente come metodo di registrazione, l'olografia digitale presenta gli stessi problemi della tecnica analogica. Si noti che l'utilizzo del phase shifting in questo caso non è di alcun vantaggio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C.M. Vest, Holographic Interferometry, Wiley, 1979.
- [2] Th.M. Kreis, Holographic Interferometry: Principles and Methods, Wiley-VCH, 1996.
- [3] G. Pedrini, H.J. Tiziani, Y. Zou, "Speckle size of digitally reconstructed wavefronts of diffusely scattering objects", *J. Mod. Opt.*, **43**, No.2 (1996), pp.395-407.
- [4] Th. Kreis, "Digital Holography for Metrologic Applications", *Proceedings of the International Conference on Interferometry in speckle light: Theory and Applications*, Lausanne, P. Jacquot and J.M. Fournier (Eds.), pp. 205-212, Springer 2000.
- [5] U. Schnars, W.P.O. Jüptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", *Meas. Sci. Technol.* **13** (2002) R85-R101.
- [6] I. Yamaguchi, S. Ohta, J.Kato, "Surface Contouring by Phase-Shifting Digital Holography and Noise Reduction", *Proceedings of the International Conference on Interferometry in speckle light: Theory and Applications*, Lausanne, P. Jacquot and J.M. Fournier (Eds.), pp.249-256, Springer 2000.
- [7] Th.M. Kreis, "Frequency analysis of digital holography with reconstruction by convolution", *Opt. Eng.* **41** (8), pp. 1829-1839, (2002).
- [8] C. Liu, Y. Li, X. Cheng, Z. Liu, F. Bo, J. Zhu, "Elimination of zero-order diffraction in digital holography", *Opt.Eng.* **41** (10), (2002), pp.2434-2437.
- [9] Th.M. Kreis, W.P.O. Jüptner, "Suppression of the dc term in digital holography", *Opt. Eng.* **36** (8),(1997), pp. 2357-2360.

- [10]E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge, “Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography”, *Appl.Opt.*,**39**, No.23 (2000), pp. 4070–4075.
- [11]I. Yamaguchi, T. Zhang, “Phase-Shifting digital holography”, *Opt. Lett.*, **22**, No. 16, (1997), pp. 1268–1270.
- [12]T. Zhang, I. Yamaguchi, “Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography”, *Opt. Lett.*, **23**, No. 15, (1998), pp. 1221–1223.
- [13]S. Lai, B. King, M.A. Neifeld, “Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography”, *Opt. Comm.*, **173** (2000), pp. 155–160.
- [14]G. Pedrini, P. Fröning, H.J. Tiziani, F. Mendoza Santoyo, “Shape measurement of microscopic structures using digital holograms”, *Opt. Comm.*, **164** (1999), pp. 257–268.
- [15]G. Pedrini, S. Schedin, H.J. Tiziani, “Lensless digital-holographic interferometry for the measurement of large objects”, *Opt. Comm.*, **171** (1999), pp. 29–36.
- [16]B. Javidi, E. Tajahuerce, “Three-dimensional object recognition by use of digital holography”, *Opt. Lett.*, **25**, No. 9, (2000), pp. 610–612.
- [17]F. Le Clerc, L. Collot, M. Gross, “Numerical heterodyne holography with two-dimensional photodetector arrays”, *Opt. Lett.*, **25**, No. 10, (2000), pp. 716–718.
- [18]L. Xu, J. Miao, A.K. Asundi, “Properties of digital holography based on in-line configuration”, *Opt.Eng.* **39** (12), (2000), pp. 3214–3219.