

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Tecniche Olografiche e Relative Applicazioni

Relatore:
Prof. Marco Cuffiani

Presentata da:
Giulia Santini

Correlatore:
Dott. G. Marco Dallavalle

Sessione II
Anno Accademico 2014/2015

Indice

INTRODUZIONE	- 2 -
1.1 LO SVILUPPO DELL’OLOGRAFIA	- 3 -
1.2 TRATTAZIONE TEORICA⁵	- 3 -
1.3 TIPOLOGIE DI OLOGRAMMI^{7,8}	- 7 -
1.4 TECNICHE DI REGISTRAZIONE	- 8 -
1.4.1 OLOGRAMMA A RIFLESSIONE FUORI ASSE	- 9 -
1.4.2 OLOGRAMMA A TRASMISSIONE FUORI ASSE	- 10 -
1.5 INTERFEROMETRIA OLOGRAFICA E SPECKLE	- 10 -
1.5.1 SPECKLE	- 10 -
1.5.2 INTERFEROMETRIA OLOGRAFICA	- 11 -
1.5.3 APPLICAZIONI	- 12 -
2.1 APPARATO SPERIMENTALE	- 13 -
2.1.1 BANCO OTTICO	- 13 -
2.1.2 LASER	- 16 -
2.1.3 LASTRE OLOGRAFICHE E REAGENTI PER LO SVILUPPO	- 16 -
2.2 CONFIGURAZIONI USATE E RISULTATI	- 18 -
2.2.1 OLOGRAMMI A RIFLESSIONE	- 18 -
2.2.2 OLOGRAMMI A TRASMISSIONE	- 21 -
3.1 INTRODUZIONE ALL’OLOGRAFIA DIGITALE	- 24 -
3.2 APPLICAZIONI	- 26 -
3.2.1 INTERFEROMETRIA OLOGRAFICA DIGITALE	- 26 -
3.2.2 MICROSCOPIA OLOGRAFICA DIGITALE	- 27 -
3.2.3 ANALISI DELLE PARTICELLE	- 28 -
3.2.4 OLOGRAFIA ENDOSCOPICA	- 28 -
3.2.5 ALTRE APPLICAZIONI AL DI FUORI DELL’AMBITO SCIENTIFICO	- 29 -

Introduzione

Olografia è una parola composta dai termini olo- e -grafia. Il primo, usato come prefisso, deriva dal greco ολος, “tutto” e ha significato di tutto, intero, totale o interamente. Il secondo termine, usato come suffisso, deriva dal greco γραφη, “scrivere”, e significa scrittura, disegno, descrizione, trattato e simili. Pertanto il termine olografia indica un metodo di descrizione, grafica o iconografica, completa di un oggetto.

L’olografia è una tecnologia finalizzata alla memorizzazione e successiva riproduzione di un’informazione ottica tridimensionale attraverso la registrazione di un fine intreccio di frange di interferenza su di una lastra o pellicola olografica opportuna. Le frange vengono generate dall’incontro di un fascio di luce coerente, detto *fascio* o *onda di riferimento*, con il fronte d’onda diffuso da un’oggetto illuminato dallo stesso fascio coerente, detto *onda oggetto*. Le lastre (tipicamente costituite da alogenuri d’argento), dopo essere state sviluppate chimicamente, possono diffrarre un fascio di luce coerente uguale all’onda di riferimento usata per realizzare l’ologramma, ricostruendo l’onda oggetto desiderata.

Rispetto alla tradizionale fotografia, nella quale molte informazioni relative all’oggetto fotografato vanno perse, l’olografia è in grado di restituire un’immagine virtuale con caratteristiche di profondità e prospettiva proprie della tridimensionalità dell’oggetto. La suddetta “tridimensionalità” attribuita all’immagine olografica, tuttavia, è un abuso di linguaggio e converrebbe intenderla come “effetto di parallasse dell’immagine”.

Le tecniche fotografiche tradizionali permettono di registrare unicamente l’intensità luminosa dell’onda oggetto: tutte le informazioni riguardanti la fase del fascio vanno perse e l’immagine risultante appare bidimensionale. La tecnica olografica si fonda su uno stratagemma: dalle informazioni di intensità luminosa delle frange di interferenza generatesi dall’incontro tra i due fasci è possibile ottenere le informazioni sull’ampiezza dell’onda oggetto e dalla distanza tra queste frange le informazioni sulla fase.

Questa tesi si pone come obiettivo l’illustrazione dei principi di due principali tecniche olografiche: a trasmissione e riflessione, la successiva applicazione di queste tecniche in laboratorio ed infine una trattazione di tecniche di olografia digitale e le relative applicazioni tecnologiche in vari campi.

1. Principi di base della Olografia

1.1 Lo sviluppo dell'olografia

L'olografia fu teorizzata nel 1947 dallo scienziato ungherese Dennis Gabor (1900-1979), che, utilizzando la luce "verde" dello spettrogramma di una lampada a vapori di mercurio, all'epoca la migliore sorgente di luce coerente, realizzò su pellicole fotografiche i primi, rudimentali ologrammi, nella cui realizzazione l'onda oggetto e l'onda di riferimento erano parallele¹. Questi, tuttavia, contenevano distorsioni e immagini spurie a causa della scarsa coerenza della luce utilizzata e dunque l'olografia non ebbe sviluppi significativi fino ai primi anni '60, quando vennero costruiti i primi laser, sorgenti di luce monocromatica coerente, ideali per l'olografia ottica.

E. Leith e J. Upatnieks, negli Stati Uniti, si resero conto che l'olografia poteva essere usata come strumento per la riproduzione di immagini tridimensionali ed effettuarono esperimenti in questo senso, presentando nel 1964 i primi ologrammi del tipo a trasmissione², dai quali si otteneva un'immagine tridimensionale con l'illuminamento obliquo della lastra (tra le direzioni dei fronti dell'onda oggetto e l'onda di riferimento c'è un angolo maggiore di zero), il cui vantaggio è rappresentato dalla separazione, sulla lastra olografica, delle immagini reale e virtuale.

Intanto, in Unione Sovietica, dal 1958, Y. Denisyuk effettuava analoghi esperimenti, pubblicandone i risultati nel 1962. Successivamente, sviluppò la tecnica degli ologrammi a riflessione a luce bianca che potevano essere riprodotti usando una comune lampada ad incandescenza o la luce solare³.

Nel 1967, Goodman e Lawrence suggerirono la cattura elettronica di un ologramma, la successiva digitalizzazione e ricostruzione numerica che avrebbero dato origine alla olografia digitale⁴. Ovviamente, all'inizio, i tempi di lavorazione erano dell'ordine di ore, fu solo alla metà degli anni '90, quando si diffusero computer abbastanza potenti e sensori elettronici con risoluzione più alta, che i tempi si ridussero a pochi secondi e la tecnica si diffuse rapidamente in molteplici campi scientifici e non.

1.2 Trattazione Teorica⁵

La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica oppure come una corrente di particelle chiamate fotoni. La diffrazione ed interferenza, che sono i fenomeni alla base dell'olografia, sono descritte perfettamente dal modello ondulatorio, per cui in questo scritto tratteremo la luce esclusivamente come un'onda.

La luce come onda elettromagnetica è descritta da un campo magnetico e un campo elettrico che oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda e perpendicolarmente tra loro. Si può usare l'uno o l'altro campo per descrivere l'onda nel tempo e nello spazio; nella nostra trattazione utilizzeremo solamente il campo elettrico $\vec{E}(\vec{z}, t)$.

La propagazione della luce è descritta dall'equazione d'onda, ricavata dalle equazioni di Maxwell. Nel caso in esame abbiamo da considerare un fascio di luce laser coerente e polarizzata, per la quale, ovvero, il campo elettrico oscilla su di un singolo piano, per cui è sufficiente considerare l'equazione d'onda scalare,

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Dove μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto, ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto e z è la direzione di propagazione delle onde.

La soluzione complessa di quest'equazione può essere scritta come

$$E(\vec{z}, t) = a \cdot e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{z} + \varphi_0)},$$

in cui $\omega = 2\pi\nu$, se ν è la frequenza di propagazione dell'onda, è detta pulsazione dell'onda elettromagnetica; $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$, in cui λ è la lunghezza d'onda e \vec{n} è un vettore unitario diretto nella direzione di propagazione dell'onda, è definito vettore d'onda.

La parte reale di questa soluzione,

$$E(\vec{z}, t) = a \cdot \cos(\omega t - \vec{k}\vec{z} + \varphi_0),$$

descrive il campo elettrico nel tempo e nello spazio.

La rappresentazione complessa ci torna utile in quanto siamo in grado di fattorizzarla in una parte spaziale e in una parte temporale:

$$E(z, t) = a \cdot e^{i(\omega t)} \cdot e^{-i(\vec{k}z - \varphi_0)}$$

La parte temporale può essere trascurata, in quanto, essendo la frequenza delle onde elettromagnetiche che costituiscono la luce visibile $\nu \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, per qualsiasi tecnica di rilevazione della luce, il risultato è la media (indipendente dal tempo) su di un numero enorme di oscillazioni. La cosiddetta ampiezza complessa,

$$A = a \cdot e^{-i\varphi},$$

con $\varphi = \vec{k}\vec{z} - \varphi_0$, dipende quindi solo dalla coordinata spaziale \vec{z} .

Le informazioni riguardanti la fase dell'onda vengono perse quando essa colpisce un materiale fotosensibile, l'unica informazione che viene registrata è l'intensità luminosa:

$$I = \varepsilon_0 c \langle E^2 \rangle_t$$

Per le onde piane,

$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c A^2$$

Per l'onda in esame, descritta dalla sola ampiezza complessa, l'intensità può essere scritta semplicemente

$$I = |A|^2,$$

in quanto, in molte applicazioni pratiche, il fattore costante $\frac{1}{2} \varepsilon_0 c$ può essere ignorato.

Due onde elettromagnetiche si definiscono coerenti se la loro differenza di fase è costante nel tempo e hanno la stessa frequenza. Invece definire un fascio di luce coerente di per sé (come quello generato da un laser) equivale a dire che la luce emessa mantiene una coerenza con il fascio sinusoidale teorico. In questo ambito si definisce *lunghezza di coerenza* di un laser la distanza massima dalla sorgente a cui il fascio generato si può considerare coerente⁶.

Quando due onde A_1 e A_2 coerenti, interferiscono, l'ampiezza complessa risultante in ogni punto equivale alla somma delle singole ampiezze complesse.

L'intensità è dunque

$$\begin{aligned} I &= |A_1 + A_2|^2 \\ &= (A_1 + A_2)(A_1 + A_2)^* \\ &= A_1 A_1^* + A_2 A_2^* + A_2 A_1^* + A_1 A_2^* \end{aligned}$$

dunque,

$$\begin{aligned} I &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + a_1 a_2 e^{i\varphi_1} e^{-i\varphi_2} + a_1 a_2 e^{-i\varphi_1} e^{i\varphi_2} \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) \end{aligned}$$

È evidente da questa relazione come l'intensità totale contenga sia informazioni sull'ampiezza che sulla fase di fasci di partenza.

Vediamo ora di utilizzare questi concetti per cominciare a parlare di olografia. Indichiamo come segue l'onda di riferimento, ovvero il fascio di luce coerente emesso dal laser, e

l'onda oggetto, ovvero la luce diffusa dall'oggetto, sul piano (x,y) sul quale si forma l'ologramma:

$$A_r(x, y) = r \cdot e^{-i\varphi_r(x,y)}$$

$$A_o(x, y) = o(x, y) \cdot e^{-i\varphi_o(x,y)}$$

r è una costante perché assumiamo di avere un fascio di riferimento che illumina uniformemente (ovvero un'onda piana); le due fasi e l'ampiezza dell'onda oggetto dipendono dal punto del piano (x,y) in cui ci troviamo.

Con queste notazioni, l'intensità che colpisce la pellicola olografica può allora essere scritta come:

$$I = o^2(x, y) + r^2 + 2o(x, y)r \cos(\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y))$$

$$= o^2(x, y) + r^2 + o(x, y)re^{i\varphi_o(x,y)}e^{-i\varphi_r(x,y)} + o(x, y)re^{-i\varphi_o(x,y)}e^{i\varphi_r(x,y)}$$

Esposta a questa luce la pellicola olografica perde di trasparenza, proporzionalmente all'intensità luminosa che la colpisce in ogni singolo punto. È possibile esprimere algebricamente questa trasparenza attraverso il coefficiente di trasmissione:

$$h = h_0 + \beta\tau I$$

dove β è una costante caratteristica del materiale sensibile, equivalente alla pendenza della retta della trasparenza del materiale rispetto al tempo di esposizione alla luce (per le emulsioni fotografiche β ha valore negativo), τ è il tempo di esposizione e h_0 è il coefficiente di trasmissione della pellicola non esposta.

Inserendo l'espressione dell'intensità precedentemente ottenuta possiamo esplicitare il coefficiente di trasmissione h ottenendo effettivamente la funzione di trasparenza dell'ologramma,

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau[o^2(x, y) + r^2 + o(x, y)re^{i\varphi_o(x,y)}e^{-i\varphi_r(x,y)} + o(x, y)re^{-i\varphi_o(x,y)}e^{i\varphi_r(x,y)}]$$

L'esposizione dell'ologramma all'onda di riferimento, che come vedremo consente di visualizzare l'ologramma stesso, corrisponde algebricamente alla moltiplicazione di questa funzione per l'ampiezza complessa dell'onda di riferimento. L'ologramma h agisce dunque come un filtro sull'onda di riferimento.

Calcoliamo l'ampiezza complessa dell'onda che emerge:

$$A_u(x, y) = h(x, y)A_r(x, y)$$

$$A_u(x, y) = \{h_0 + \beta\tau[o^2(x, y) + r^2 + o(x, y)re^{i\varphi_o(x,y)}e^{-i\varphi_r(x,y)} + o(x, y)re^{-i\varphi_o(x,y)}e^{i\varphi_r(x,y)}]\} [r \cdot e^{-i\varphi_r(x,y)}]$$

$$\begin{aligned}
A_u(x, y) = & (h_0 + \beta\tau r^2)A_r(x, y) \\
& + \beta\tau o^2(x, y)A_r(x, y) \\
& + \beta\tau r^2 A_o(x, y) \\
& + \beta\tau A_o^*(x, y)A_r^2(x, y)
\end{aligned}$$

Il primo termine è costante e rappresenta l'onda di riferimento, moltiplicata per un fattore < 1 (riduzione di luminosità). Il secondo termine, generalmente molto piccolo in quanto $o(x, y) < r$, varia nel piano (x, y) e crea una specie di alone luminoso attorno all'immagine dell'oggetto. Questi primi due termini insieme rappresentano l'onda di riferimento che attraversa indisturbata l'ologramma (ordine di diffrazione zero).

$$A_u^{(0)}(x, y) = \{h_0 + \beta\tau[r^2 + o^2(x, y)]\}A_r(x, y)$$

Il terzo termine è finalmente il risultato cercato: la stessa onda oggetto, dove il fattore moltiplicativo $\beta\tau r^2$ ne influenza solamente la luminosità. L'onda ricostruita non converge, l'immagine è dunque virtuale e dalla parte opposta dell'ologramma rispetto all'osservatore e non può essere proiettata su uno schermo. Questo termine rappresenta il primo ordine di diffrazione.

$$A_u^{(1)}(x, y) = (\beta\tau r^2)A_o(x, y)$$

L'onda oggetto coniugata $A_o^*(x, y)$ nel quarto termine rappresenta un'immagine reale convergente dalla parte dell'osservatore (che può essere proiettata su di uno schermo). La fase cambia di segno, trasformando superfici concave in convesse e vice versa, e il fattore $A_r^2(x, y)$ distorce l'immagine. In casi di olografia *in asse* (la direzione di propagazione dell'onda di riferimento coincide con la normale al piano su cui si trova l'ologramma), l'immagine reale e quella virtuale coincidono. Questo termine rappresenta il termine di diffrazione -1.

$$A_u^{(-1)}(x, y) = \beta\tau A_o^*(x, y)A_r^2(x, y)$$

Per ottenere un'immagine reale non distorta si può illuminare l'ologramma con un fascio di luce la cui ampiezza complessa coincide con l'ampiezza complessa coniugata del fascio di riferimento.

1.3 Tipologie di Ologrammi^{7,8}

La distinzione tra diverse tipologie di ologrammi può essere fatta attraverso varie categorie (non mutualmente escludenti):

- a. il sistema adottato per la loro visualizzazione: definiamo ologrammi a trasmissione quelli per cui l'immagine è riprodotta osservando la luce dell'onda

- di riferimento trasmessa dall'ologramma e ologrammi a riflessione quelli per cui è riprodotta osservando la luce dell'onda di riferimento riflessa dall'ologramma.
- b. la posizione in cui collochiamo lo strato fotosensibile: chiamiamo ologrammi in asse quelli per cui la luce di riferimento, l'oggetto e la lastra sono allineati lungo una retta, e ologrammi fuori asse le altre tipologie.
 - c. il sistema tramite il quale la figura di diffrazione dell'ologramma riesce a costruire l'immagine olografica: si ha un cosiddetto ologramma in ampiezza nel caso in cui la figura di interferenza è costituita da frange scure che assorbono la luce e frange chiare che la lasciano passare, e un ologramma in fase se la figura è composta da zone adiacenti aventi differente indice di rifrazione.
 - d. lo spessore dell'emulsione comparato alla distanza media tra le frange di interferenza: uno spessore molto minore della distanza media tra due frange indica un ologramma sottile, mentre una distanza molto maggiore della distanza media indica un ologramma spesso o volumetrico; ologrammi spessi hanno un'efficienza di diffrazione molto maggiore, ovvero ricostruiscono un'immagine molto più luminosa; gli ologrammi a riflessione sono necessariamente ologrammi spessi.

Le due tipologie di ologrammi realizzati nella parte sperimentale di questa tesi sono ologrammi a riflessione [Figura 1.1] e ologrammi a trasmissione [Figura 1.2], entrambi fuori asse, di volume e in fase.

1.4 Tecniche di Registrazione

Esistono metodi diretti e indiretti per la registrazione di ologrammi: ai fini di questa tesi analizzeremo e approfondiremo solo i primi, che non si servono di immagini intermedie generate da lenti o altri ologrammi.

Vediamo di analizzare nello specifico le due modalità che abbiamo avuto la possibilità di svolgere in laboratorio.

1.4.1 Ologramma a Riflessione fuori asse

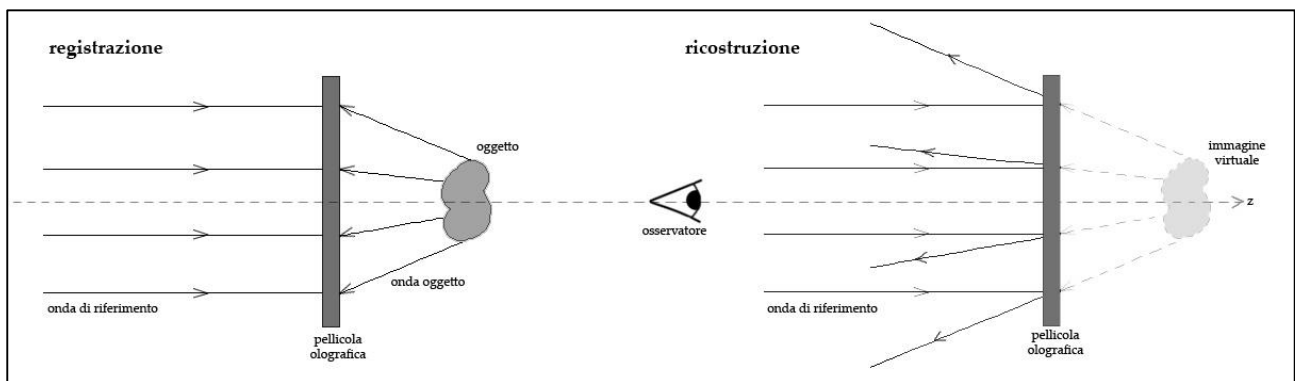


Figura 1.1.: Schema di un Ologramma a Riflessione. A sinistra è raffigurata la fase di registrazione, in cui l'onda di riferimento e l'onda oggetto colpiscono la pellicola olografica dai lati opposti. A destra è raffigurata la fase di ricostruzione, in cui l'onda di riferimento viene riflessa dall'ologramma a ricostruire un fronte d'onda identico all'onda oggetto, che è quello che arriva agli occhi dell'osservatore.

Nella fase di registrazione, per ottenere un ologramma a riflessione è necessario che l'onda di riferimento e l'onda oggetto incidano sulla lastra olografica dai lati opposti. Il raggio luminoso dovrebbe essere tale da illuminare una area maggiore di quella della pellicola: la distribuzione gaussiana fa sì che i due terzi centrali del fascio contengano la quasi totalità dell'intensità luminosa. L'oggetto deve essere posizionato vicino alla pellicola: non si può realizzare l'ologramma se la differenza di cammino ottico tra l'onda oggetto e l'onda di riferimento è maggiore della lunghezza di coerenza del laser. Inoltre minore la distanza, più luminosa apparirà l'immagine nella fase di ricostruzione. L'intensità del fascio dovrebbe essere idealmente la stessa da entrambi i lati della pellicola: dunque i risultati migliori si ottengono con oggetti riflettenti.

Nella fase di ricostruzione, è necessario illuminare l'ologramma con una luce bianca dal lato dell'osservatore. Tutte le componenti della luce con diverse frequenze vengono diffuse dai diversi piani dell'ologramma in ampiezza (un ologramma a riflessione è necessariamente un ologramma spesso e in ampiezza) e formano i diversi piani dell'immagine, che infatti appare distorta e a righe quando l'angolo di osservazione si restringe. Da qui, il nome ologrammi in luce bianca spesso attribuito agli ologrammi in riflessione.

1.4.2 Ologramma a Trasmissione fuori asse

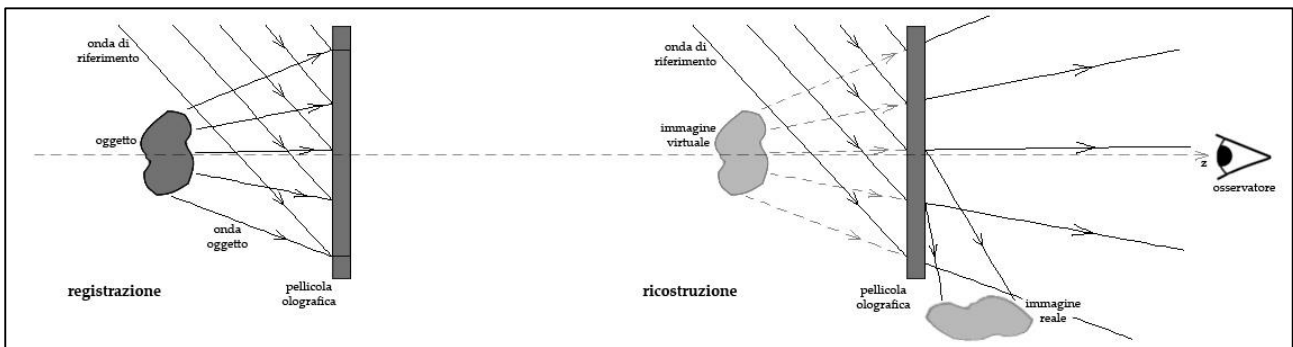


Figura 1.2: Schema di un Ologramma a Trasmissione. A sinistra è raffigurata la fase di registrazione, in cui l'onda di riferimento e l'onda oggetto colpiscono la pellicola olografica dallo stesso lato. A destra è raffigurata la fase di ricostruzione, in cui l'onda di riferimento viene rifratta dall'ologramma a ricostruire due fronte d'onda, uno identico all'onda oggetto, che è quello che arriva agli occhi dell'osservatore, e uno che forma un'immagine virtuale deformata.

La particolarità di questi ologrammi non è solamente l'angolo tra la direzione del fascio di riferimento e la congiungente pellicola-oggetto, che deve essere maggiore di zero, ma anche il fatto che, durante la fase di ricostruzione, possiamo osservare due immagini: una virtuale (ordine di diffrazione 1) e una reale, distorta, dallo stesso lato dell'osservatore (ordine di diffrazione -1). Per visualizzare correttamente queste immagini è necessario illuminare l'ologramma con un fascio che possieda le stesse caratteristiche (coerenza, angolo con la normale) del fascio di riferimento.

1.5 Interferometria Olografica e Speckle

Chiudiamo questo capitolo introducendo due avanzate tecniche olografiche di analisi per effettuare misure non invasive di spostamenti, vibrazioni risonanti, rugosità e deformazioni di strutture. Ne parleremo in modo non eccessivamente approfondito, introducendo prima di tutto il concetto di "speckle", che è essenziale per la descrizione di tecniche interferometriche.

1.5.1 Speckle

Con la parola "speckle" (briciole, frammenti) si indica l'aspetto granulare che una superficie irregolare presenta quando è illuminata dalla luce coerente di un laser, la cui lunghezza d'onda è confrontabile con le irregolarità. Questa distribuzione irregolare di intensità (speckle pattern) deriva dall'interferenza tra tutte le onde diffuse in tutte le direzioni dalla superficie e raccolte dall'occhio o da un mezzo fotosensibile.⁹

Si può distinguere tra formazione di speckle oggettiva e soggettiva.

Una distribuzione di intensità oggettiva si forma su uno schermo posto a distanza L da una regione circolare diffondente di diametro D ; la dimensione di uno speckle così formato è

$$\sigma_{media} = 1.22\lambda \frac{L}{D}$$

Una distribuzione di intensità soggettiva si forma quando la superficie illuminata viene focalizzata mediante una lente o l'occhio umano; la dimensione media degli speckle dipenderà allora anche dal fuoco f della lente o sistema ottico e dal fattore di ingrandimento M dello stesso

$$\sigma_{media} = 1.22 \frac{\lambda D}{f} \cdot \frac{M + 1}{M}$$

Diversamente da ciò che le apparenze potrebbero suggerire, la distribuzione di intensità degli speckle non è uniforme, ma obbedisce ad una distribuzione statistica

$$\rho(I) = \frac{1}{I_0} e^{-\frac{I}{I_0}}$$

dove I_0 è l'intensità media dell'intera regione e $\rho(I)dI$ è la probabilità che l'intensità di una certa zona abbia un valore compreso tra I e $I + dI$.

La probabilità più alta si ha quando $I = 0$, dunque la maggior parte degli speckle saranno scuri.

1.5.2 Interferometria Olografica

L'interferometria olografica è una tecnica che sfrutta l'interferenza della luce e le tecniche olografiche per analizzare spostamenti, deformazioni e vibrazioni di superfici diffondenti. Esistono due metodi di interferometria olografica: quella *biesposta*, dove una lastra viene impressionata due volte in due condizioni diverse, e quella in media temporale dove una lastra già sviluppata viene usata per seguire processi di vibrazione o riscaldamento nel tempo.

Espandiamo meglio la prima tecnica, l'interferometria olografica biesposta. Questa viene usata in particolare nell'analisi di deformazioni e spostamenti e si riferisce a due istanti successivi e fissi del sistema in esame.

Per realizzarla, si registra l'ologramma di un oggetto su una lastra e, senza svilupparla, la si impressiona una seconda volta dopo che l'oggetto è stato spostato o sottoposto ad un qualche stress (loaded state).

In questo modo si ha interferenza tra i due pattern di speckle dovuti alle due esposizioni, la cui figura risultante 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 tanto più è ampio lo spostamento.

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; lastra sviluppata e oggetto sono illuminati contemporaneamente. Osservando l'oggetto in esame attraverso la lastra sviluppata lo si può vedere con sovrapposto un pattern di frange, dovuto all'imperfetta sovrapposizione dell'immagine olografica e dell'oggetto visto direttamente. Se, a questo punto, l'oggetto modifica il suo stato, guardando attraverso la lastra è possibile seguirne l'evoluzione osservando le fasce di interferenza che compaiono nell'immagine dell'oggetto; in questo modo si possono osservare le deformazioni in tempo reale¹⁰.

1.5.3 Applicazioni

Con queste tecniche è possibile fare diversi tipi di analisi di materiali: analisi di difetti dell'interfaccia di due metalli uniti tra loro, difetti di saldatura, disomogeneità o anisotropie dei materiali.

A seconda della sollecitazione a cui viene sottoposto il materiale (piegatura, riscaldamento, etc.) si possono manifestare discontinuità del pattern di frange o strutture particolari.

È necessario far presente che un solo interferogramma fornisce informazioni solo qualitative degli spostamenti: per un'analisi quantitativa devono essere fatte più esposizioni.

Come ultimo esempio di applicazione dell'interferometria olografica, accenniamo allo studio dei fenomeni molto veloci (es. moto convettivo all'interno di una lampadina, onda d'urto di un proiettile): la procedura è molto simile a quella vista in precedenza, con la differenza che in questi casi vengono utilizzati dei laser impulsati, ovvero laser che emettono una luce con altissima intensità e con impulsi ad alta frequenza.

2. Esperienza Sperimentale

2.1 Apparato Sperimentale

Di seguito, è esposta la parte sperimentale di questa tesi, discutendo l'esperienza di laboratorio, le apparecchiature e i procedimenti necessari alla realizzazione delle due tipologie di ologramma illustrate.

Sono necessari in particolare:

- un banco ottico,
- un laser,
- lastre olografiche,
- reagenti per lo sviluppo delle suddette,

di cui si discute, di seguito, in dettaglio.

2.1.1 Banco Ottico

Di fondamentale importanza in qualunque procedimento di olografia è la stabilità del banco di lavoro, o banco ottico. Per stabilità si intende la capacità di smorzare e ridurre le piccole vibrazioni sempre presenti nel terreno, che possono causare un evidente calo nella visibilità delle fasce di interferenza dell'ologramma o un totale fallimento del processo di registrazione olografica. È quindi necessario lavorare su di un piano antivibrazioni provvisto di opportuni isolatori che smorzino e riducano le vibrazioni presenti nel terreno generate da mezzi o persone in movimento nelle vicinanze, condizionatori accesi e persino rumori o suoni intensi. Un banco ottico è in genere costituito da un piano di lavoro rigido, pesante e in grado di assorbire le vibrazioni, e degli isolatori che, posti appena al di sotto di esso, riducono la trasmissione delle vibrazioni del terreno. Idealmente, è possibile apportare ulteriori miglioramenti all'isolamento del banco tramite della sabbia, un secondo strato di isolatori in gomma o camere d'aria.

È bene tener conto, inoltre, che il metallo di cui sono costituite le componenti del banco ottico (supporti per le lenti e specchi, rotaie) è soggetto a dilatazioni termiche rilevanti e non è propriamente rigido; tuttavia, i tempi di registrazione inferiori al minuto e la grande massa del banco, rendono le variazioni termiche durante l'esposizione impercettibili e facilmente trascurabili.

Il banco ottico che ho usato durante gli esperimenti [Figura 2.1] è costituito da un tavolo di cemento con copertura di granito, di dimensioni di 1 m per 2 m e spessore di 20 cm, che è alzato a 90 cm dal terreno da otto sostegni di metallo la cui altezza è regolabile: sul tavolo

è presente della sabbia per smorzare ulteriormente le vibrazioni, mentre le gambe del tavolo appoggiano su un pannello di compensato (invece che direttamente sul pavimento del laboratorio).



Figura 2.1: Banco Ottico. Il compensato, i piedi di metallo, la lastra di marmo e la sabbia sono tutti provvedimenti al fine di smorzare ed attutire le vibrazioni di varia natura provenienti dal pavimento del laboratorio.

Per provare la stabilità del banco e osservarne la reazione a piccole sollecitazioni, ho allestito un interferometro di Michelson [Figura 2.2], che ha messo in evidenza sia l'alta stabilità del banco ottico che l'alta sensibilità della figura di interferenza alle sollecitazioni esterne. Nelle sperimentazioni eseguite si è generata una figura di interferenza [Figura 2.3] su uno schermo bianco e si è osservato il suo comportamento in seguito a sollecitazioni create volontariamente del banco ottico.

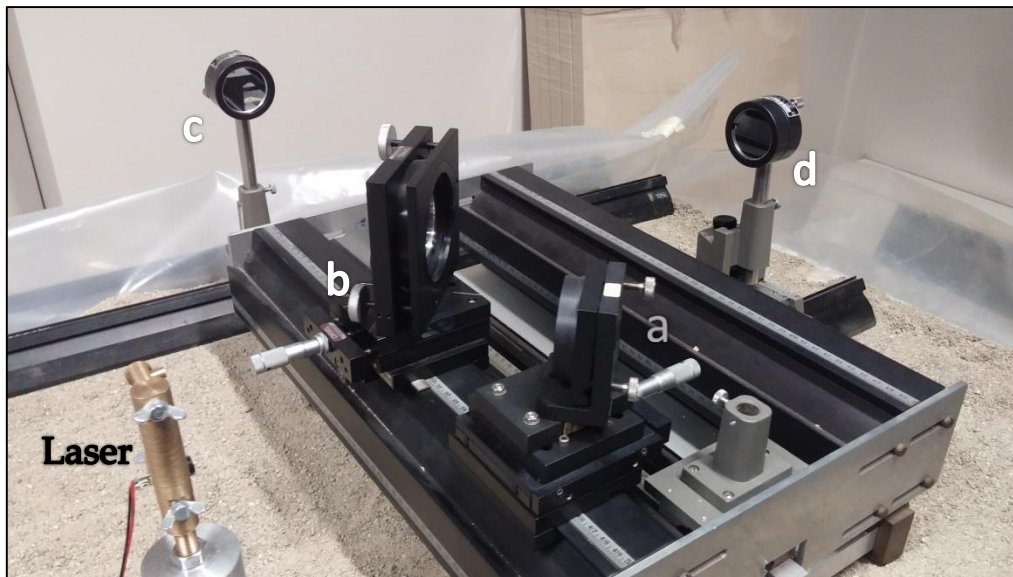


Figura 2.2: Interferometro di Michelson allestito sul Banco Ottico. Il fascio di luce generato dal laser, viene riflesso da uno specchio (a) su di uno specchio semiriflettente (b) che divide il fascio su due specchi (c, d) che rimandano la luce sullo specchio semiriflettente. Su uno schermo posto a distanza di qualche metro, dietro al laser rispetto al banco ottico, arrivano due fasci di luce che hanno percorso distanze diverse (le distanze tra lo specchio semiriflettente e ciascuno dei due specchi non sono le stesse).

In seguito a urti contro il piano, si è osservata la scomparsa delle frange di interferenza per periodi dell'ordine di grandezza del secondo prima della stabilizzazione del banco. In un caso si è osservato un interessante fenomeno per cui, dopo aver alterato leggermente la posizione dello specchio semiriflettente per visualizzare delle linee di interferenza più distanziate tra loro, un urto ha portato la figura di interferenza a ristabilizzarsi diversamente da come era prima dell'urto stesso: la distanza tra le linee di interferenza è diminuita, ma si è ipotizzato che questo fosse dovuto ad un fissaggio approssimativo delle componenti dell'interferometro.

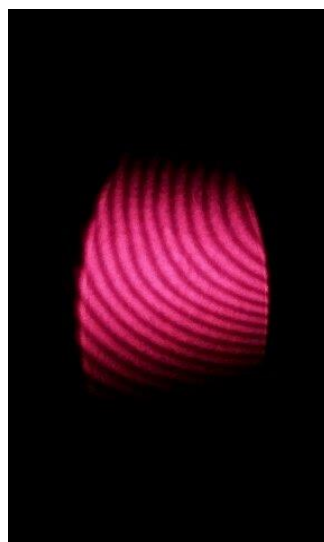


Figura 2.3: Figura di Interferenza. Ottenuta con l'interferometro di Michelson su uno schermo a pochi metri di distanza, è visibile una leggera curvatura delle frange di interferenza dovute alla diffusione sferica e non lineare (ideale) della luce.

Queste sperimentazioni sono state puramente qualitative: se si volesse fare una misura quantitativa precisa, sarebbe possibile misurare la frequenza di risonanza e la costante elastica di smorzamento del piano, registrando tramite un sensore ottico lo spostamento delle frange di interferenza in funzione del tempo.

2.1.2 Laser

Il laser che ho utilizzato per la registrazione e visualizzazione degli ologrammi è un diodo laser distribuito da Integraf, dotato di lente collimatrice (che però è stata rimossa durante le sperimentazioni), dichiarato dalla casa come ottimo nella realizzazione di ologrammi fino a 102x127mm in dimensione. La luce generata ha lunghezza d'onda di 650nm e una potenza fino a 4.0mW, che però può essere inferiore a causa di problemi esterni, come la sorgente di energia (due batterie alcaline di tipo D).

Il laser è fissato al banco ottico con un sistema di viti che ne consente di regolare e fissare l'altezza e l'inclinazione orizzontale e verticale.

Per quanto riguarda la lunghezza di coerenza della luce impiegata, è dichiarata essere superiore al metro, per cui possiamo considerare la luce nella distanza tra sorgente e lastra olografica (inferiore al mezzo metro), come un fascio di luce ideale.

La divergenza del fascio è inferiore a 1.3 mRad e la polarizzazione della luce (molto importante anche se non essenziale in olografia) è lineare 100:1.

2.1.3 Lastre Olografiche e Reagenti per lo sviluppo

Le lastre olografiche sono generalmente costituite da un vetro trasparente, di qualche millimetro di spessore, su cui è stato depositato uno strato molto sottile di gel fotosensibile. Per il loro posizionamento è necessario un supporto rigido e stabile: al termine di una piattaforma orizzontale sulla quale si pone l'oggetto da registrare, due morsetti di metallo tengono la lastra in posizione perpendicolare alla piattaforma. L'intero supporto può essere regolato ruotandolo attorno all'asse verticale o modificando la sua altezza.

Quando non utilizzate, le lastre devono essere conservate in un ambiente asciutto a 4°C. Per evitare qualsiasi tipo di esposizione, sono state estratte dal loro pacchetto e posizionate sul supporto in un ambiente illuminato solamente da una lampada di Wood [Figura 2.4], che emette una luce la cui lunghezza d'onda predominante lontana dalla regione sensibile della pellicola.

Per *esposizione* della lastra si intende la quantità di luce totale che la colpisce in un periodo di tempo finito (il tempo di esposizione): in olografia ci si riferisce a questa quantità come

la *sensibilità* dell'emulsione alla luce di esposizione, ovvero la quantità di energia (sottoforma di onda elettromagnetica) necessaria a produrre una certa variazione di opacità dell'emulsione. Un altro fattore importante nell'esposizione è la *risoluzione* o potere risolutivo dell'emulsione, che determina la dimensione del più piccolo dettaglio che può essere catturato (tanto più questo valore è alto, migliore sarà la possibile qualità dell'immagine finale).

Le lastre olografiche usate negli esperimenti illustrati di seguito sono distribuite dal produttore francese Malasy Gentet (<http://shop.ultimate-holography.com/>) e hanno le seguenti caratteristiche.

Tipo	U08P
Sostanza	Bromuro d' Argento (AgBr)
Sensibilità alla luce di esposizione:	150-200 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$
Dimensione media dei grani:	8nm
Regione spettrale:	luce rossa (620–750 nm)
Risoluzione	10000 linee/mm

Con l'esposizione della lastra si ottiene solamente la cosiddetta immagine latente, che può essere resa visibile soltanto dopo la procedura di *sviluppo*. La lastrina esposta, dopo aver spento il laser, è stata rimossa dal sostegno e immersa per 3 minuti e mezzo in una soluzione formata da una parte di agente di sviluppo (generalmente un agente riducente organico con una struttura ad anello tipica del benzene) per 10 parti di acqua distillata; la lastrina deve essere immersa completamente, con la faccia sulla quale è applicata l'emulsione verso l'alto perché non sfregi contro il fondo della vaschetta (rigorosamente di plastica, non di metallo), e agitata lievemente per favorire lo svolgimento della reazione chimica su tutta la superficie. In seguito, si passa alla fase di *lavaggio*, nella quale la lastrina viene sciacquata per un minuto circa in acqua distillata per rimuovere totalmente i residui della soluzione di sviluppo. A questo punto la lastrina appare opaca e non è più sensibile alla luce: per rendere l'ologramma visibile è necessaria una fase di *sbiancamento*, in cui dei sali ossidanti disciolti in acqua "ripuliscono" dalla lastra i residui non esposti alla luce. La durata di questa fase è valutata di volta in volta, osservando il momento in cui tutte le aree scure dello sviluppo svaniscono; mediamente si attesta intorno ai 3 minuti. Durante questo stadio la lastrina deve essere costantemente in movimento rispetto al liquido. A questo punto si sciacqua l'ologramma in acqua per quattro o cinque minuti, il che conclude la procedura. L'ologramma non è visibile finché la pellicola è bagnata: per accelerare i

processi di asciugamento, abbiamo passato per meno di un minuto la lastrina in alcool, che evapora a temperatura ambiente, e l'abbiamo passata sotto un asciugacapelli (impostato su "freddo" in quanto uno sbalzo termico può dilatare in modo anomalo la gelatina fotosensibile o persino distaccarla dal supporto in vetro).



Figura 2.4: Lampada di Wood. Produce radiazione perlopiù ultravioletta, con una piccola frazione nello spettro del visibile, a causa del rivestimento interno della lampadina.

2.2 Configurazioni Usate e Risultati

2.2.1 Ologrammi a Riflessione

Abbiamo realizzato per primi alcuni ologrammi di Denisyuk in riflessione. Diverse figurine di plastica (un coniglietto di plastica, alcune figurine Lego®) sono state poste su di un piedistallo leggermente rialzato dietro alla pellicola olografica rispetto alla luce del laser e dallo stesso lato sulla quale è presente l'emulsione fotografica [Figura 2.5]. Le figurine di plastica sono state scelte in quanto sufficientemente dettagliate e tridimensionali da osservare un effetto di parallasse nel risultato finale e anche poiché la plastica chiara e lucida riflette molto bene la luce ed è quindi adatta a generare un'onda oggetto di intensità rilevante.

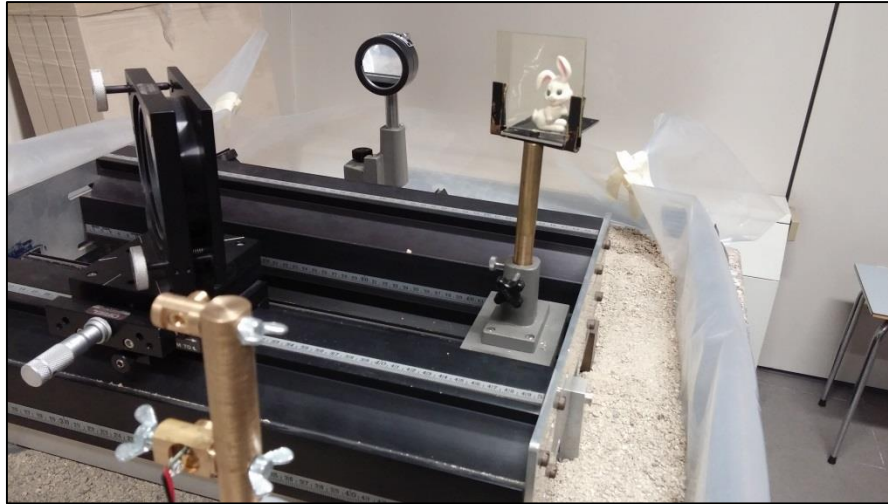


Figura 2.5: Configurazione del Banco Ottico per la registrazione di un Ologramma a Riflessione. Notare come l'oggetto sia posto dalla parte opposta della lastra rispetto alla sorgente del fascio di riferimento. L'emulsione fotosensibile è applicata sul lato rivolto verso l'oggetto. La seguente impostazione è la più semplice e lineare per ologrammi di questo tipo.

La distanza tra la lastra e la sorgente laser è stata misurata di 34.5 cm con un errore di $\pm 5\text{ mm}$, tramite un metro a nastro. Il tempo di esposizione relativo a questa configurazione e distanza era già noto da precedenti sperimentazioni: calcolato in relazione alla sensibilità della lastra, la distanza tra lastra e sorgente e l'intensità del fascio di riferimento è stato fissato a 40 secondi. Durante l'esposizione, il tempo è stato manualmente registrato con un cronometro quindi si considerano uno o due secondi di errore relativi alla lettura, comunicazione e spegnimento manuale del laser; l'errore proprio del cronometro di 0.01 s è totalmente trascurabile in queste condizioni.

Il laser viene lasciato acceso per almeno due minuti prima della registrazione, affinché raggiunga la massima intensità. Durante questo periodo di tempo, uno schermo nero viene posto tra la lastra e la sorgente, per evitare che la luce colpisca il gel fotosensibile, per venire poi inclinato manualmente all'inizio del periodo di 40 secondi. Negli esperimenti iniziali, al termine del periodo di registrazione, lo schermo veniva rimesso tra sorgente e lastra prima dello spegnimento del laser; in seguito si è spento il laser immediatamente al termine dei 40 secondi, per cercare di ridurre errori relativi al non completo smorzamento della luce. Lo schermo, posto ad una decina di centimetri dal laser, non è una soluzione ottimale: parte della luce viene diffusa e riflessa da altri elementi sul banco ottico e rischia di generare problemi di sovraesposizione della lastra. Una soluzione relativa ad un cappuccio di cartoncino o velluto sul laser è stata considerata e poi scartata, in quanto il suo spostamento avrebbe potuto generare vibrazioni che avrebbero disturbato la registrazione.

La posizione del laser è stata corretta diverse volte, non riguardo alla sua altezza rispetto al piano del banco ottico, ma rispetto all'asse della lastra, al quale non risultava completamente sullo stesso piano, ma non ha portato cambiamenti rilevanti ai risultati. Una pulizia del laser con la strumentazione appropriata ha tolto alcune impurità dalla luce di riferimento proiettata su uno schermo bianco, ma ancora una volta non sono stati visibili cambiamenti nei risultati finali.

I risultati ottenuti [Figure 2.6a, 2.6b, 2.6c] sono stati altalenanti, anche a causa delle condizioni non esattamente ottimali in cui è stata effettuata la registrazione: cause di disturbo possono essere vibrazioni impercettibili, sporcizia sull'oggetto, sottoesposizione o persino a problemi della lastra. È interessante notare che, anche nelle lastre in cui le figure erano completamente invisibili, è sistematicamente visibile il piedistallo su cui erano appoggiate.



Figura 2.6a: Ologrammi a Riflessione in luce bianca (lampada). Le fotografie da angoli diversi mostrano l'effetto di parallasse proprio della tecnica olografica.



Figura 2.6b: Ologrammi a Riflessione in luce bianca (lampada). Il colore dell'oggetto virtuale (in realtà monocromatico) dipende dall'angolazione, ovvero da come viene rifratta la luce.



Figura 2.6c: Ologrammi a Riflessione in luce bianca (lampada). In uno dei risultati meno eccellenti, parte dell'oggetto è del tutto invisibile, inoltre sono molto più evidenti i diversi piani dell'ologramma spesso: questo può essere causato da vibrazioni del sistema durante la fase di registrazione, da una sottoesposizione della lastra, da un distacco del gel fotosensibile dal vetro o persino da un difetto della lastra.

2.2.2 Ologrammi a Trasmissione

Per realizzare ologrammi a trasmissione, abbiamo deciso di utilizzare un oggetto di riferimento di forma molto più semplice: un dado da gioco a sei facce. Sotto di esso è stato posto un sassolino perché la sua posizione fosse leggermente inclinata e fossero illuminate dal laser e dirette verso la lastra almeno tre facce.

La configurazione del banco ottico per la realizzazione di questo tipo di ologrammi è diversa dalla precedente: è infatti necessario che l'onda oggetto colpisca la lastra dallo stesso lato sul quale colpisce la luce di riferimento [Figura 2.7].

Lo spostamento ha modificato la distanza tra il centro della lastra e la sorgente del fascio di riferimento, è quindi necessario rivedere il tempo di esposizione in prima approssimazione: infatti il rapporto tra i due tempi di esposizione equivale al quadrato del rapporto tra le distanze.

$$\frac{t'}{t} = \left(\frac{d'}{d}\right)^2$$

La nuova distanza tra lastra e sorgente è misurata di 33 cm, il nuovo tempo di esposizione risulta dunque di circa 36s.

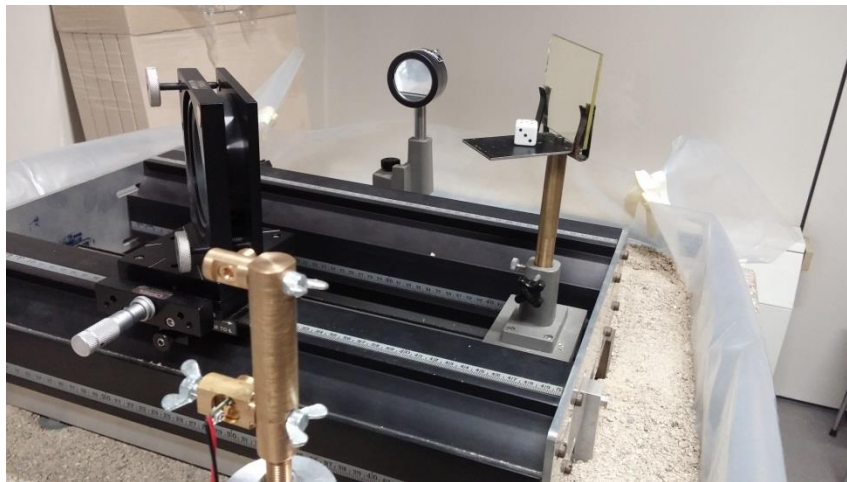


Figura 2.7: Configurazione del Banco Ottico per la registrazione di un Ologramma a Trasmissione. Questa volta, il piedistallo è posizionato in modo tale che l'oggetto e la sorgente siano dallo stesso lato rispetto alla lastra e in particolare dal lato sul quale è applicata l'emulsione fotosensibile.

Il primo ologramma presenta ancora alcune zone dell'oggetto "sfocate", inoltre l'ombra dell'oggetto sulla pellicola è prominente, per cui è necessario tenere una maggiore distanza tra esso e la pellicola: questo però può ridurre l'intensità dell'onda oggetto. Si è dunque preferito correggere leggermente l'angolo tra asse e fascio (la differenza di distanza tra sorgente e centro della lastra cambia in modo irrilevante).

In tutti gli ologrammi ottenuti [Figura 2.8] vengono visualizzate delle fasce esposte, probabilmente dovute alla riflessione interna della luce che colpisce il lato della lastra: si è cercato di rimediare a questo problema applicando ai lati della lastra delle strisce di nastro

adesivo nero, che però hanno solo generato delle ombre che riducevano la luminosità dell'ologramma.

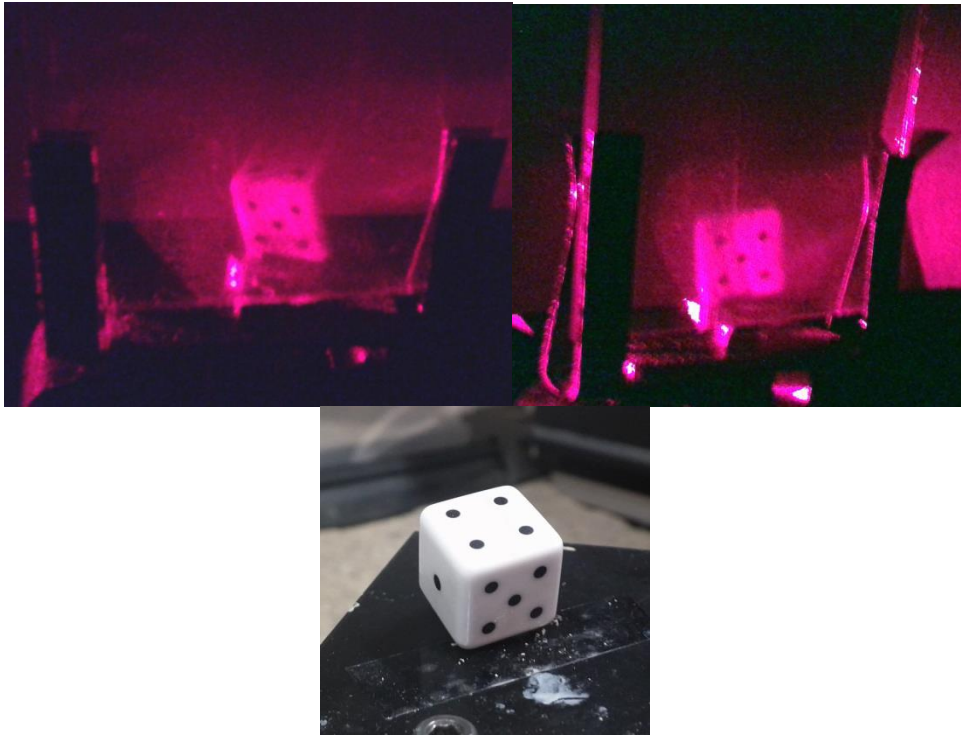


Figura 2.8: Ologrammi a Trasmissione. Lo stesso ologramma, visto da due direzioni differenti per evidenziare l'effetto di parallasse. La faccia rivolta parzialmente verso la lastra ma non illuminata dal fascio di riferimento non è visibile sull'ologramma, che quindi mostra solo due facce del dado (quattro e cinque).

3. Olografia Digitale

3.1 Introduzione all'olografia digitale

L'olografia digitale può essere definita come la "generazione e ricostruzione a computer di ologrammi"¹¹, tuttavia oggi questo termine viene utilizzato per descrivere ogni singola parte della catena di processi che vanno dalla generazione con software appositi di ologrammi alla ricostruzione del fascio d'onda. Esiste una distinzione netta tra la registrazione e ricostruzione digitale di ologrammi realizzati in luce laser e quelli generati attraverso un software.

L'olografia digitale, spesso indicata per brevità con DH, è basata sul principio classico dell'olografia, con la differenza che, invece che su di una pellicola fotosensibile, la registrazione viene effettuata con un sensore CCD o CMOS. A questo punto non è più possibile eseguire la ricostruzione semplicemente illuminando l'ologramma con il fascio di riferimento, ma se ne deve simulare numericamente l'effetto.

Ricordiamo la formula dell'intensità che arriva sulla pellicola nel caso classico, la richiamiamo in quanto coincide con quella che arriva sulla telecamera o sensore ottico:

$$I = |A_r(x, y)|^2 + |A_o(x, y)|^2 + A_r^*(x, y)A_o(x, y) + A_r(x, y)A_o^*(x, y)$$

I primi due termini, essenzialmente dei disturbi, non costituiscono un serio problema nell'olografia classica mentre possono diventare molto importanti per l'olografia digitale. Se ricostruiamo otticamente l'ologramma, osserviamo un'immagine virtuale dell'oggetto nel posto in cui si trovava al momento della registrazione, con tutte le impressioni tridimensionali di parallasse. Se invece l'ologramma è registrato in forma digitale il processo descritto è svolto numericamente moltiplicando i dati della funzione di trasmittanza $h(x, y)$ per il complesso coniugato del modello dell'onda di riferimento e successivamente calcolando l'ampiezza complessa A_{rec} sul piano dell'immagine attraverso la propagazione dell'onda dal piano dell'ologramma al piano dell'immagine¹². L'intensità e la fase vengono calcolate rispettivamente con

$$a_{rec} = A_{rec}^* A_{rec}$$
$$\varphi_{rec} = \tan^{-1} \frac{Im(A_{rec})}{Re(A_{rec})}$$

dove $Im(z = ai + b) = a$ indica la parte immaginaria di un numero complesso e $Re(z = ai + b) = b$ la sua parte reale.

In olografia digitale, è importante considerare la relazione tra l'angolo θ tra le due onde e la distanza p tra due frange di interferenza consecutive

$$p = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

in quanto, se l'ologramma è registrato digitalmente sarà necessario obbedire al teorema di sampling che richiede almeno due pixel per ogni p

$$p > 2\Delta\xi$$

dove $\Delta\xi$ è la dimensione di un pixel del sensore CCD o CMOS. Da qui otteniamo un limite superiore all'angolo di osservazione

$$\theta < \frac{\lambda}{2\Delta\xi}$$

Ipotizzando di avere una lunghezza d'onda $\lambda \approx 650nm$ e dei pixel con dimensioni dell'ordine di $\Delta\xi \approx 3\mu m$, osserviamo come il limite massimo ottenibile è molto piccolo: $\theta_{max} \approx 6^\circ$; questo equivale a dire che possiamo risolvere con precisione solo ologrammi di piccoli oggetti, oggetti lontani dal sensore ottico, oppure immagini ridotte tramite lenti di oggetti più grandi.

L'olografia digitale presenta, nei confronti delle tecniche classiche, aspetti positivi e negativi¹⁰. In particolare, tra gli aspetti positivi possiamo illustrare in breve che:

- non è necessario lo sviluppo chimico, richiedente tempo, materiali delicati e precisione;
- 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;
- 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;
- una volta sotto forma di dati, è possibile modificare, trasmettere a distanza e replicare l'ologramma.

Gli aspetti negativi, pur esistenti, sono meno importanti ed evidenziano come mai oggi ad essersi sviluppata tecnologicamente è proprio la DH:

- la tecnica 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;
- 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;
- 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 (onda piana);
- 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.

3.2 Applicazioni

Vari sono i campi in cui oggi l'olografia digitale viene applicata. Sensori CCD o CMOS ad alta risoluzione consentono la cattura di ologrammi digitali, l'archiviazione di dati relativi ad ologrammi nella memoria del computer e la ricostruzione degli oggetti o scene registrate attraverso la propagazione numerica. Ora, avendo accesso sia ai dati sull'intensità discreta che sulla fase, questo approccio è impiegato con successo in diversi metodi di misura olografica.

3.2.1 Interferometria Olografica Digitale

La proprietà della tecnica olografica digitale di renderci in grado di risalire al campo di fase con una sola registrazione è ciò che rende l'interferometria digitale molto più vantaggiosa della sua controparte "classica": ad esempio, consente di osservare la deformazione o evoluzione del campione in esame senza la necessità di combinare due registrazioni.

La funzione di trasmittanza viene campionata in una "matrice": sui pixel del sensore CCD o CMOS e quindi è considerata nella sua forma "discreta", inoltre le dimensioni dei pixel e le caratteristiche della telecamera impongono severi limiti alla tecnica. Nelle telecamere comuni, un pixel ha dimensioni che si aggirano tra i 6 ed i 10 μm^2 e segue dal teorema di sampling che le dimensioni e l'angolo di osservazione dell'oggetto possono, in effetti, solo essere molto piccole.

A causa di questi limiti dimensionali, si tendono ad utilizzare setup simili a quelli tipici dell'interferometria classica; tuttavia, è sconsigliato avere una configurazione perfettamente in asse, in quanto la ricostruzione dell'immagine comprenderà, oltre all'immagine reale, anche l'immagine virtuale e i due termini di fondo, che andranno a generare una nuvola speckle. Anche se è possibile rimuovere questi ultimi¹⁴, non è possibile rimuovere l'immagine virtuale (rovesciata), è perciò opportuno, quando possibile, posizionare l'oggetto leggermente fuori asse in fase di registrazione, in modo da avere le due immagini non sovrapposte.

L'unico modo per eliminare l'immagine virtuale è una tecnica chiamata phase shifting e si basa sul muovere il fascio di riferimento durante la fase di registrazione per cancellarne il termine nella funzione di trasmittanza. Adottare questa tecnica, che sfrutta la caratteristica dell'olografia digitale di non dipendere dalla forma del fascio di riferimento, è vantaggioso unicamente nel caso in cui siamo interessati solo a ricostruire la forma degli oggetti, in quanto priva la metodologia del suo principale vantaggio: la possibilità di ricostruzione della fase con una sola immagine¹⁵.

In conclusione, lo studio di deformazioni o spostamenti non è l'unico scopo dell'olografia digitale, ma essa viene usata anche nell'analisi di vibrazioni impercettibili e della variazione degli indici di rifrazione, inoltre ha numerose applicazioni in metrologia¹⁶.

3.2.2 Microscopia Olografica Digitale

La microscopia olografica digitale è una tecnica perlopiù impiegata nell'osservazione di sistemi microelettromeccanici o campioni biologici: la proprietà di osservare l'immagine a fuoco su diverse profondità tipica delle ricostruzioni olografiche digitali si addice particolarmente a questo tipo di analisi.

La configurazione in linea di Gabor rappresenta una scelta appropriata per quanto riguarda l'osservazione di campioni trasparenti o semitrasparenti¹⁷, ma anche altre configurazioni sono possibili: un microscopio (lente ingrandente) posto lungo il percorso dell'onda oggetto verso il sensore CMOS/CCD, aumenta le dimensioni dell'immagine ma limita l'area di visibilità; oppure il fascio può essere diviso con uno specchio semiriflettente per separare l'immagine reale e virtuale e si può effettuare un phase shifting, come visto nel paragrafo precedente.

Questo metodo rappresenta un'estensione alle note tecniche microscopiche. È minimamente invasivo e può evidenziare minuscoli dettagli e movimenti: la microscopia olografica digitale è principalmente utilizzata per studiare l'evoluzione dinamica di sistemi microscopici in campo farmaceutico e medico.

3.2.3 Analisi delle Particelle

L'olografia digitale facilita l'osservazione di sistemi multipli con tecniche di time-lapse, dove gli intervalli di tempo tra un'acquisizione e l'altra sono definiti dalle caratteristiche del sensore.

Con la configurazione in asse di Gabor e brevi pulsazioni di luce laser è possibile determinare dimensioni, posizione, distribuzione spaziale, velocità e simili quantità fisiche dei campi di particelle¹².

Una difficoltà può sorgere nel determinare una distanza tra le particelle nel piano perpendicolare al sensore CMOS/CCD, in quanto vengono messe a fuoco su diversi piani: questo problema può essere risolto registrando le particelle da diverse angolazioni, facendo sì che l'onda di riferimento attraversi l'oggetto diverse volte prima di colpire il sensore¹⁸.

Le velocità delle particelle possono essere ottenute usando una doppia esposizione con luce laser pulsante per ricavare spostamenti la cui lunghezza è proporzionale alla velocità.

3.2.4 Olografia Endoscopica

La maggior parte delle immagini cliniche ottenute con le tecniche conosciute (MRI, PET) sono immagini bidimensionali che, nella maggior parte dei casi sono sufficienti a formulare una diagnosi. Tuttavia, talvolta è necessario esaminare in dettaglio particolari strutturali di un organo o parte anatomica combinando numerose immagini bidimensionali in una ricostruzione digitale tridimensionale. Per ovviare a questa complicazione si è iniziato a pensare di combinare la tecnica olografica con le tecniche di analisi medica.

Le prime combinazioni tra endoscopia e olografia vennero realizzate nei primi anni '80¹⁹ registrando un ologramma in situ tramite una fibra ottica che forniva contemporaneamente l'illuminazione e il fascio di luce di riferimento.

In particolare, si può raccogliere la luce diffusa all'estremità di una fibra ottica endoscopica (o olo-endoscopica in questo caso) e trasmetterla ad una telecamera CCD per l'acquisizione, per poi ricostruire numericamente l'immagine in seguito. In questo modo l'olografia endoscopica può fornire una visione tridimensionale nonché un'analisi interferometrica di un organo all'interno del corpo.

Senza entrare nel dettaglio della tecnica, ci limitiamo a dire che il suo principale vantaggio consiste nella possibilità di risolvere oggetti dell'ordine dei micrometri (tessuti biologici a

livello cellulare) tramite mezzi di registrazione a bassa frequenza come una fibra ottica multicore²⁰.

3.2.5 Altre applicazioni al di fuori dell'ambito scientifico

In grafologia e ingegneria, l'olografia digitale conoscopica è utilizzata per ottenere immagini tridimensionali ad alta precisione (micrometrica) e ripetibilità del campione, che consentono di esaminare tratti sovrapposti o saldature.

L'olografia conoscopica, dove il raggio di riferimento viene fatto convergere su di un'area molto ridotta tramite una lente, per ottenere un ologramma ingrandito di un oggetto molto piccolo²¹, viene utilizzata in ingegneria per l'osservazione di fori e interstizi microscopici, in arte per la ricostruzione di dettagli che sfuggono alla vista e in grafologia per l'analisi della calligrafia.

In campo più pratico, si sta inoltre diffondendo un tipo di olografia digitale che utilizza una luce di riferimento di lunghezza d'onda superiore a quella della luce visibile (infrarosso), che permette di aumentare le dimensioni massime dell'oggetto fino a 85 cm oltre che a rendere l'intero sistema molto meno sensibile a vibrazioni. Ologrammi registrati con questo metodo possono essere in seguito elaborati digitalmente per ottenere immagini quasi in tempo reale di persone od oggetti attraverso mezzi che disturbano o non lasciano passare la luce visibile, come fiamme e fumo: la luce "scatterata" dal mezzo torbido subisce uno shift di frequenza e non contribuisce alla formazione dell'ologramma. L'olografia digitale è una tecnica più avanzata della comunemente usata termografia, che pur essendo in grado di generare un'immagine più nitida attraverso un mezzo torbido, non è in grado di rilevare figure oltre le fiamme a causa della saturazione dell'obiettivo da parte delle stesse²².

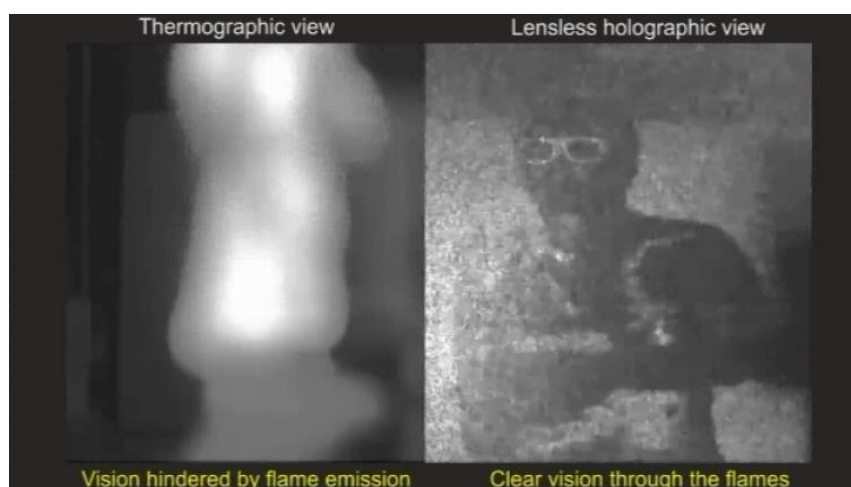


Figura 3.1: Confronto tra due immagini dello stesso manichino visto attraverso fumo e fiamme. A sinistra, l'immagine termografica è oscurata dalla fiamma, mentre quella olografica, a destra, è visibile²¹.

Conclusioni

La principale limitazione delle tecniche di cattura delle immagini, al giorno d'oggi, è costituita dall'impossibilità di riprodurre effetti di profondità e tridimensionalità, persi nella registrazione insieme alla fase dell'onda elettromagnetica, in quanto gli strumenti sono solo in grado di registrarne l'intensità. L'olografia aggira questo ostacolo facendo interferire due fronti d'onda il cui fronte d'onda risultante contiene le informazioni di fase. Nella prima parte della Tesi, questa proprietà è stata dimostrata attraverso formule basate sulla teoria ondulatoria della luce.

Sfruttando l'interferenza della luce, in laboratorio sono dunque riuscite a creare su di una superficie piana un'immagine che possiede caratteristiche di parallasse, il cosiddetto ologramma. Le tecniche introdotte da Denisyuk e Leith-Upatnieks, pur con difficoltà nella riproducibilità, sono state verificate adatte a realizzare ologrammi a riflessione e a trasmissione. Le due configurazioni sono state riprodotte su di un banco ottico e utilizzate per realizzare degli ologrammi di piccoli oggetti.

Ho scelto di realizzare solo questi due tipi di ologrammi, piuttosto che altre tecniche indirette (ologramma in trasmissione a due passi, ologramma rainbow), perché in grado di verificare la teoria in modo più diretto ed immediato che non un sistema che necessiti di più sorgenti o lenti. I risultati sono stati altalenanti, con alcuni risultati non soddisfacenti, ma complessivamente positivi e hanno dimostrato l'effettività delle configurazioni.

L'olografia classica oggi è considerata una branca "chiusa" della fisica applicata, ma è fondamentale in quanto è preliminare ad una fase successiva, che punta a realizzare ologrammi in forma digitale, utilizzati in medicina, ingegneria e ricerca storica e artistica.

Questa tesi e i relativi esperimenti sono stati realizzati in prospettiva di un futuro approfondimento nel campo dell'olografia digitale, in particolare nelle sue applicazioni in fisica medica.

Bibliografia e Sitografia

1. D. Gabor, "A new microscopic principle". *Nature* 161, 777–778 (1948).
2. E. N. Leith, J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory". *The Journal of the Optical Society of America* 52 (10), 1123–1130 (1962).
3. Y. N. Denisyuk, "On the reflection of optical properties of an object in a wave field of light scattered by it". *Doklady Akademii Nauk SSSR* 144 (6), 1275–1278 (1962).
4. J. W. Goodman, R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms". *Applied Physics Letters* 11(3), 77–79 (1967).
5. U. Schnars, W. Jüptner. "Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques". Springer Science & Business Media, 5-9 (2005).
6. W. E. Kock, "Lasers and Holography: An Introduction to Coherent Optics". Dover Publications, Inc. New York, 41 (1968).
7. Tesi di Laurea in Fisica di N. Daneluz, "Progetto e costruzione di un apparato per la realizzazione di ologrammi". Università di Trieste 9-11 (2009).
8. T. H. Jeong, "Basic Principles and Applications of Holography". *Fundamentals of Photonics*, Lake Forest College, Lake Forest, Illinois, 384-385.
9. <http://web.inge.unige.it/DidRes/Fisica>
10. C. M. Vest, "Holographic Interferometry". New York: John Wiley & Sons (1979).
11. T. S. Huang, "Digital Holography". *Proceedings of the IEEE* 59(9), 1335–1346 (1971).
12. T. Kreis, "Handbook of Holographic Interferometry". Wiley-VCH, Weinheim, (2005).
13. A. Baldi, R. Ambu, F. Bertolino, F. Ginesu, "Sulla Interferometria Olografica Digitale".
14. C. Liu, Y. Li, X. Cheng, Z. Liu, F. Bo, J. Zhu, "Elimination of zero-order diffraction in digital olography". *Optical Engineering* 41 (2002),
<http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/>
15. I. Yamaguchi, T. Zhang, "Phase-Shifting digital holography". *Optics Letters* 22 (1997),
<https://www.osapublishing.org>
16. T. Kreis, "Digital Holography for Metrologic Applications". *Proceedings of the International Conference on Interferometry in speckle light: Theory and Applications*, Springer (2000).
17. I. Moon, M. Daneshpanah, A. Anand, B. Javidi, "Cell Identification with computational 3-D holographic microscopy". *Optical Photonics News* 22 (2011).
18. T. Kreis, M. Adams, W. Juptner. "Digital in-line holography in particle measurement". *Interferometry 99: Techniques and Technology* (1999).
19. D. Hadbawnik, "Holographische endoskopie". *Optik* 45 (1976).

20. H. I. Bjelkhagen, J. Chang, K. Moneke, *“High-resolution contact Denisyuk holography”*. Applied Optics 31 (1992).
21. G.B. Broggiato, F. Campana, S. Gerbino, M. Martorelli, *“Confronto tra Diverse Tecniche di Digitalizzazione delle Forme per il Reverse Engineering”*. <http://www.ingmecc.uniroma1.it/>, 5 (2002).
22. M. Locatelli, E. Pugliese, M. Paturzo, V. Bianco, A. Finizio, A. Pelagotti, P. Poggi, L. Miccio, R. Meucci, P. Ferraro *«Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography»*. Optics Express 21, Issue 5, 5379-5390 (2013).