

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

OLOGRAFIA DIGITALE PER ANALISI IN LINE

Relatore:
Prof. Marco Cuffiani

Presentata da:
Alessandro Santucci

Anno Accademico 2015/2016

Alla mia famiglia e al BDSP101.

Sommario

Questa tesi ha l'obiettivo di trattare il tema dell'olografia ottica e digitale in generale. Discutere varie applicazioni e tecniche per l'allestimento di ologrammi, riportare i risultati di una misura olografica in line e infine realizzare preliminarmente una ricostruzione software dell'esperienza effettuata.

Indice

1	Principi dell'Olografia	3
1.1	Introduzione	3
1.2	Cenni sulle onde elettromagnetiche	4
1.2.1	Interferenza e diffrazione	6
1.3	Registrazione e visualizzazione di ologrammi	7
1.4	Tipologie di ologrammi	8
2	Olografia Digitale	11
2.1	Introduzione	11
2.2	Realizzazione di ologrammi digitali	13
2.2.1	Calcolo della diffrazione di Fresnel tramite la FFT	13
2.2.2	Ricostruzione e Realizzazione informatica	16
2.3	Applicazioni dell'olografia digitale	17
2.3.1	Microscopia digitale olografica	18
2.3.2	Analisi olografica digitale di particelle	18
2.3.3	Inteferometria Olografica e Olografia Digitale Endoscopica	19
2.3.4	Approcci alla TV 3-D	20
3	Risultati Sperimentali	22
3.1	Apparato sperimentale	22
3.1.1	Banco ottico	22
3.1.2	Laser	23
3.1.3	Filtri	24
3.1.4	Camera CCD	25
3.1.5	Microscopio ottico	26
3.2	Test Preliminari	28
3.2.1	Diffrazione di una fenditura circolare	28
3.2.2	Diffrazione di una fenditura	30
3.3	Prova di registrazione e ricostruzione di un ologramma in line	31
3.4	Registrazione ologramma in line	32
3.5	Ricostruzione dell'ologramma	33

Introduzione

L'olografia fu inventata nel 1947 da un fisico ungherese di nome Dennis Gabor, premio Nobel nel 1971. Il nome holography deriva dalla combinazione delle parole greche holos, che vuol dire "tutto", e graphein, che invece vuol dire "scrivere". L'idea di Gabor era il miglioramento della microscopia elettronica [1].

Nella presente tesi si cercano di spiegare, tramite vari capitoli, le tecniche utilizzate ed utilizzabili per la realizzazione di ologrammi. Il capitolo primo ripercorre, tramite un'introduzione storica, i ragionamenti, gli esperimenti e i vantaggi di alcune tecniche introdotte per l'olografia detta "tradizionale" ovvero ancora basata su lastre fotografiche. Inoltre fornisce una descrizione della registrazione e visualizzazione degli ologrammi e delle varie tipologie di essi. Il secondo capitolo invece, descrive il concetto di olografia digitale ovvero la modernizzazione dell'olografia tradizionale tramite i computer e i nuovi metodi di calcolo applicabili, introducendo la nuova realizzazione e visualizzazione su display tramite la registrazione attraverso l'utilizzo di sensori, la ricostruzione mediante algoritmi e le varie applicazioni della moderna olografia. Il terzo ed ultimo capitolo invece parla dell'apparato sperimentale, dei test preliminari effettuati in laboratorio, dell'esperienza e dei risultati con la tecnica in line. Inoltre nell'appendice sono riportati alcuni esempi di programmi utilizzabili con il software sviluppato e distribuito da Microsoft, MATLAB.

Capitolo 1

Principi dell'Olografia

1.1 Introduzione

L'olografia è un fenomeno dovuto alla luce coerente prodotta dalla sorgente luminosa opportuna. La luce è composta da fotoni, i quali hanno un comportamento dualistico, infatti se intesi come flusso si comportano come onda, ovvero diffrangono e interferiscono, se invece intesi singolarmente come particella. Di conseguenza per comprendere al meglio questo fenomeno è necessario avere ben presente i fenomeni di diffrazione e di interferenza che si vengono a creare ed è utile conoscere le corrispettive leggi che ne governano i risultati. Nella prima metà dell'ottocento gli esperimenti di fisica erano incentrati perlopiù sulle proprietà elettriche e magnetiche dei materiali. I più significativi furono gli esperimenti di Ampere sulla polarizzazione magnetica e quelli di Faraday sulla forza prodotta da un campo magnetico generato da un passaggio di corrente in un filo. L'unificazione delle leggi che governavano le interazioni allora scoperte furono attribuite alle equazioni di Maxwell. L'olografia come detto in precedenza è una tecnica implementata negli anni quaranta da Gabor, in quel periodo non era possibile ottenere però luce coerente continua, infatti uno dei modi utilizzati era attraverso l'eccitamento di gas. Il primo esperimento effettuato mediante l'uso del laser è stato attuato nel 1962, in quell'anno due scienziati statunitensi Leith e Upatnieks contribuirono in maniera significativa creando la tecnica "Off-Axis" (non in asse o off-line) capace di separare le immagini gemelle. Grazie alla quale è possibile togliere il rumore dovuto all'immagine gemella sull'immagine olografica prodotta. Con il termine olografia si intende la registrazione e ricostruzione dell'ampiezza di un'onda e della corrispettiva fase. Tramite gli effetti di diffrazione e interferenza generati da un'onda luminosa incidente su un oggetto 3D e su una lastra infatti è possibile ricostruire l'immagine dell'oggetto. L'interferenza dà informazioni sull'ampiezza e sulla profondità del nostro oggetto, mentre la diffrazione funziona come un decoder, ovvero ricostruisce l'onda proveniente dal corpo illuminato preso in esame dandoci informazioni sull'ampiezza e sulla fase, quindi sulla profondità.

Studiando infatti le frange di diffrazione si ottiene la registrazione dell'onda proveniente dal campione, mentre tramite la distanza tra esse ci si riconduce alla ricostruzione dell'oggetto preso in esame. In base al ragionamento sopra esposto era lecito affermare che l'olografia quindi poteva essere definita come una tecnica in grado di sviluppare delle "foto tridimensionali" di un oggetto ricreate su lastre olografiche o tramite software su computer sulla base dell'interferenza e prodotta dall'onda oggetto e dall'onda di riferimento proveniente dalla sorgente. A partire dagli anni '70 il progresso tecnologico portò ad affrontare il problema in maniera digitale, ovvero tramite l'utilizzo dei computer, grazie ai quali portava alla *Computer Generated Holography (CGH)* che permise di generare gli ologrammi attraverso metodi numerici, tuttavia il processo di ricostruzione rimase per via ottica. I metodi numerici vennero elaborati a partire dal 1967 con Goodman e Lawrence, poi da Yaroslavskii, Merzlyakov e Kronrod. Questi ultimi riuscirono a creare un algoritmo per la ricostruzione numerica, il quale venne migliorato successivamente da Onural e Scott applicato infine a molti campi scientifici di ricerca. A metà degli anni '90 con l'introduzione dei Charged Coupled Devices (CCD) nella registrazione diretta di ologrammi, ad opera di Schnars e Juptner, venne eliminato definitivamente ogni tipo di passaggio fotografico intermedio. L'intero procedimento numerico di registrazione e ricostruzione venne riconosciuto in seguito come Olografia Digitale, e i suoi vantaggi rispetto all'olografia ottica erano ben chiari e ne permisero un largo impiego; esempi importanti sono dati dalla interferometria, shearografia e dalla fotografia di speckle.

1.2 Cenni sulle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono composte da una componente elettrica ed una magnetica perpendicolari. Dette onde sono particolari in quanto al contrario di quelle meccaniche sono in grado di propagarsi anche nel vuoto e possono essere classificate in base alla loro lunghezza d'onda o in base alla loro frequenza; entrambe le grandezze citate sono comunque correlate dalla relazione:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

dove c è la velocità di propagazione della luce nel vuoto, ν è la frequenza e λ è la lunghezza d'onda. Lo spettro elettromagnetico è classificato in base alla lunghezza d'onda in: radiazioni infrarosse dai 700nm ai 1mm, microonde da circa 1mm a 1m, onde radio da 10cm ai 10km, nello spettro visibile all'occhio umano dai 400nm fino a circa 800nm, in ultravioletti dai 400nm ai 10nm e infine ai raggi X e γ i quali partono da una λ di circa 10nm a 1pm. Il punto di partenza delle onde luminose sono le equazioni di Maxwell definite come:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_\nu \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_C + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.4)$$

dove con \mathbf{E} e \mathbf{D} intendiamo la forza del campo e la densità del flusso elettrico; con \mathbf{H} e \mathbf{B} intendiamo la forza del campo e la densità del flusso magnetico. Grazie a queste equazioni possiamo scrivere l'equazione di propagazione per un'onda elettromagnetica omogenea:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \mathbf{E} = 0 \quad (1.5)$$

che nel vuoto si esprime come

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \mathbf{E} = 0 \quad (1.6)$$

La luce visibile trattandosi di onda può propagarsi in vari modi, ovvero tramite la polarizzazione lineare o la vibrazione delle due componenti formanti l'onda che vibrano in un solo piano; supponiamo lungo z . In questo caso l'equazione (1.6) si semplifica ulteriormente:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \mathbf{E} = 0 \quad (1.7)$$

La soluzione di questa equazione differenziale è:

$$E = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t - \varphi_0) \quad (1.8)$$

possiamo quindi scriverlo sotto forma di esponenziale complesso:

$$\psi = e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} e^{-i\varphi_0} \quad (1.9)$$

o in z :

$$\psi = e^{i(kz - \omega t)} e^{-i\varphi_0} \quad (1.10)$$

Grava notare che in questa equazione la direzione è indicata dal vettore di propagazione dell'onda \vec{k} , il quale è correlato dalla lunghezza d'onda $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{n}$ e la frequenza angolare ω la quale è legata alla frequenza ν da $\omega = 2\pi\nu$. La frequenza ν e la lunghezza d'onda sono relazionate alla velocità di propagazione dell'onda che nel caso del vuoto è:

$$c = \lambda\nu \quad (1.11)$$

Nella realtà empirica degli esperimenti i sensori non possono cogliere la frequenza legata all'onda elettromagnetica poichè si ha solo una mediazione nel tempo del dato, ovviamente nello spettro visibile la frequenza è di circa 10^{15} Hz, per questa ragione si utilizza una grandezza misurabile direttamente chiamata intensità dell'onda:

$$I = \varepsilon_0 c \langle E^2 \rangle \quad (1.12)$$

dove ε_0 è la costante dielettrica del vuoto.

1.2.1 Interferenza e diffrazione

Per poter spiegare il fenomeno dell'olografia bisogna per prima cosa avere chiaro il concetto di interferenza e diffrazione. Questi fenomeni sono propri dell'onda luminosa infatti l'interferenza è prodotta quando vengono ad interagire più onde tra loro le quali possono sommarsi o distruggersi, aumentando o diminuendo l'intensità dell'onda risultante. La diffrazione invece è prodotta quando sul percorso dell'onda vi è situato un ostacolo con una o più aperture dette fenditure. Il processo d'interferenza tra due onde di diversa ampiezza può essere spiegato tramite la teoria di onda scalare, ove siano date due onde con le corrispettive ampiezze:

$$\begin{aligned}A_1(z) &= a_1 e^{i\varphi_1} \\ A_2(z) &= a_2 e^{i\varphi_2}\end{aligned}\tag{1.13}$$

facendo interagire le onde dalla formula precedente si ottiene:

$$A = A_1 + A_2\tag{1.14}$$

Posto che l'intensità è data dal quadrato dell'ampiezza si ottiene:

$$A^2 = |A_1 + A_2|^2\tag{1.15}$$

$$|A_1 + A_2|^2 = (A_1 + A_2)(A_1 + A_2)^* =\tag{1.16}$$

$$a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\tag{1.17}$$

$$I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)\tag{1.18}$$

Di conseguenza si nota dalle equazioni (1.17) e (1.18) che l'intensità prodotta dall'interferenza non è solo la somma delle intensità, ma contiene anche un termine modulato dalla differenza di fase delle stesse onde interagenti. Il valore massimo prodotto dall'interazione è dato quando la differenza di fase:

$$\Delta\varphi = 2n\pi\tag{1.19}$$

in questo caso l'interferenza viene chiamata costruttiva. Analogamente è possibile osservare un minimo quando:

$$\Delta\varphi = (2n + 1)\pi\tag{1.20}$$

in cui si avrà la cosiddetta interferenza distruttiva. Si precisa inoltre che il fenomeno d'interferenza è dato solo se le onde interagenti sono coerenti fra loro. In caso contrario si avrebbe solo una luminosità uniforme. Con riguardo alla diffrazione possiamo asserire, se l'apertura del nostro ostacolo fosse simile alla lunghezza d'onda della luce utilizzata, che sullo schermo posteriore all'ostacolo genera zone chiare e scure uniformi. Tale distribuzione diviene spiegabile grazie al principio di Huygens, il quale afferma che in ogni apertura il fronte d'onda incidente in quel punto possa essere considerato come sorgente puntiforme di onde sferiche secondarie.

1.3 Registrazione e visualizzazione di ologrammi

La registrazione di un ologramma richiede una sorgente luminosa con lunghezza di coerenza abbastanza lunga, in grado di generare due onde che interferiscano nel piano sensibile (come una lastra fotografica). La lunghezza di coerenza è definita come la distanza massima nella quale il fascio luminoso rispetta le variazioni di fase ed ampiezza che avrebbe un'onda ideale [3]. Le due onde che interferiscono sul piano sensibile sono una chiamata onda oggetto la quale proviene dal campione illuminato dalla nostra sorgente e l'altra onda invece proviene direttamente dalla sorgente stessa ed è chiamata onda di riferimento. La figura d'interferenza generata è fissata dai prodotti chimici utilizzati nello sviluppo della lastra. Il processo può essere descritto matematicamente utilizzando le relazioni dell'interferenza (si vedano le equazioni da (1.13) a (1.18)). Sia data quindi l'onda di riferimento:

$$E_R(x, y) = a_R(x, y)e^{i\varphi_R(x, y)} \quad (1.21)$$

e l'onda oggetto:

$$E_O = a_O(x, y)e^{i\varphi_O(x, y)} \quad (1.22)$$

dove a_R e a_O sono le rispettive ampiezze, mentre φ_R e φ_O sono le fasi delle onde. Ne consegue che utilizzando la formula dell'interferenza (1.14) e ricavandone l'intensità come nelle equazioni (1.15) fino a (1.18), si ottiene:

$$I(x, y) = |E_R(x, y) + E_O(x, y)|^2 = \quad (1.23)$$

$$= (E_R + E_O)(E_R + E_O)^* = \quad (1.24)$$

$$= E_R E_R^* + E_O E_O^* + E_R E_O^* + E_O E_R^* \quad (1.25)$$

In più è necessario introdurre un parametro che definisca l'ampiezza di trasmissione della lastra fotografica e viene indicata come:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y) \quad (1.26)$$

dove β è la pendenza della trasmittanza, τ il tempo di esposizione e h_0 è l'ampiezza di trasmissione della lastra non esposta. Questo parametro è necessario per la ricostruzione di un ologramma e lo si moltiplica per l'onda di riferimento ottenendo:

$$\begin{aligned} E_R(x, y)h(x, y) &= \\ &= [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)]E_R(x, y) + \beta\tau a_R^2 E_O(x, y) + \beta\tau E_R^2(x, y)E_O^*(x, y) \end{aligned} \quad (1.27)$$

Analizzando i termini di questa equazione si nota che il primo termine a destra dell'uguale è l'onda di riferimento moltiplicata per un fattore riduttivo e rappresenta l'onda che passa attraverso l'ologramma senza essere diffratta. Il secondo termine invece rappresenta l'onda oggetto ricostruita che genera l'immagine virtuale e che permette quindi

di visualizzare l'immagine olografica dell'oggetto. Il fattore a_R^2 influenza solo la luminosità mentre l'ultimo termine crea un'immagine reale ma distorta dell'oggetto [2]. Poiché non si vuole ottenere questo effetto provocato da E_R^2 si utilizza ora l'onda di riferimento coniugata nella equazione (1.27) che evita la distorsione.

1.4 Tipologie di ologrammi

Gli ologrammi possono essere di diversi tipi. La prima distinzione è dovuta al loro metodo di registrazione, infatti un ologramma può essere a trasmissione o a riflessione. La prima categoria si realizza quando l'onda oggetto e l'onda riferimento vengono a colpire lo stesso piano della lastra o del materiale sensibile che registrerà l'immagine.

La lastra dovrà essere colpita nel lato in cui è presente l'emulsione e per poter ricostruire successivamente l'immagine, il fronte d'onda da impiegare dovrà possedere le stesse caratteristiche e proprietà dell'onda di riferimento.



Figura 1.1: Ologramma a trasmissione di un dado a sei facce

Al contrario l'ologramma a riflessione avviene quando le onde investono la lastra nei due lati opposti. Un tipico ologramma è primo in assoluto come esperimento effettuato



Figura 1.2: Ologramma a trasmissione di alcuni pezzi LEGO.

fu quello di Gabor, un ologramma detto "in asse" (o In-line) composto da una sorgente luminosa puntiforme, una lente e una lastra fotosensibile composta da bromuro d'argento ad alta risoluzione, ovvero con le particelle di metallo equidistribuite e in maniera molto fine, posizionati sullo stesso asse. Solamente dopo il trattamento chimico, la lastra diviene ologramma. Per spiegare in maniera matematica l'esperimento si può attuare la trattazione vista precedentemente alle equazioni (1.23) a (1.25) però inserendo un'onda piana trasversale di ampiezza A che illumina l'ologramma.

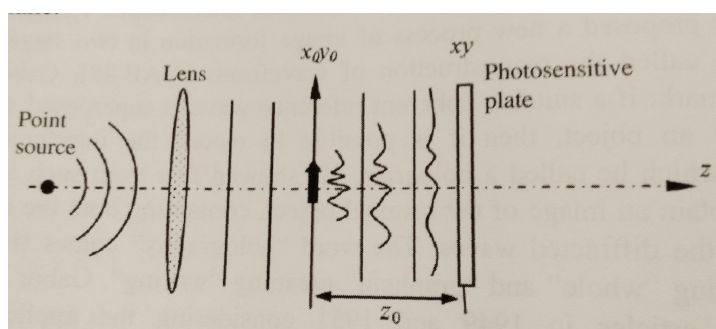


Figura 1.3: Schema dell'esperimento di Gabor.

Considerando quindi l'ampiezza di trasmissione e questa nuova onda, si ottiene l'onda trasmessa dall'ologramma in quattro termini (analogamente a quanto fatto per l'onda di riferimento nella equazione (1.27):

$$Ah(x, y) =$$

$$= A\beta|E_R|^2 + A\beta|E_O(x, y)|^2 + A\beta E_R^* E_O(x, y) + A\beta E_R E_O^*(x, y) \quad (1.28)$$

dove il primo termine fa riferimento all'onda direttamente passante per la lastra; il secondo è trascurabile se le dimensioni dall'oggetto sono piccole infatti si avrebbe $|E_O(x, y)| \ll E_R$; il terzo è proporzionale all'onda diffusa dall'oggetto, infine il quarto è responsabile dell'immagine reale dell'ologramma. Questa tecnica quindi crea un'immagine reale e virtuale situate a distanza uguale dalla piastra, esse vengono definite immagini gemelle coesistenti con il fronte coerente generato dal termine $A\beta|E_R|^2$. Inoltre bisogna precisare che i due termini $\beta|E_R|^2$ e $A\beta|E_O(x, y)|^2$ creano rumore sull'immagine cercata. L'ologramma di Gabor ci dà la possibilità di poter formare, tramite la ricostruzione del fronte d'onda, ologrammi, come ad esempio, di lettere opache su sfondo trasparente, ma non il viceversa [4]. Un'altra tipologia di ologrammi molto importante, poichè ha avuto un ruolo chiave nello sviluppo dell'olografia, è quello dei due scienziati americani Leith-Upatnieks. L'essenziali differenze tra questa tipologia e quella precedente sono la durata del processo di registrazione, l'onda di riferimento è introdotta nel sistema con un angolo e inoltre è distinta dall'onda che illumina l'oggetto. In questo modo non persiste più il problema delle immagini gemelle ottenendo quindi le immagini dell'oggetto 3D vero. Questa tipologia è detta "fuori asse" poichè la sorgente, il campione (o oggetto) e la lastra non sono più posizionati sullo stesso asse.

Quando la lastra è stata impressionata e trattata chimicamente, l'immagine dell'oggetto può essere ricostruita utilizzando metodi di illuminazione diversi. Un metodo è illuminare nella direzione originalmente utilizzata dall'onda di riferimento della sorgente, un altro metodo consiste nell'illuminare lungo l'asse z .

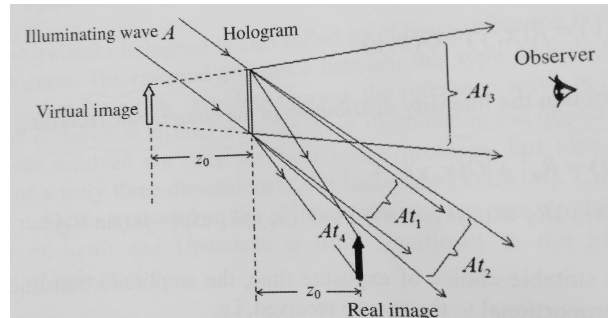


Figura 1.4: Schema dell'onda di ricostruzione lungo l'asse z .

Capitolo 2

Olografia Digitale

2.1 Introduzione

A partire dagli anni settanta nonostante i buoni risultati raggiunti dall'olografia tradizionale nell'ottica microscopica, si sono sempre di più ricercate la velocità di realizzazione e le ripetizioni di risultati attraverso i metodi computazionali introdotti nei computer. Infatti i più grandi ostacoli dell'olografia tradizionale erano il tempo di sviluppo delle lastre fotografiche e il trattamento chimico delle stesse. Il computer risolveva questi problemi perché inserendo, tramite modelli numerici, i dati relativi alle onde incidenti su degli appositi sensori si potevano registrare svariati ologrammi senza dover cambiare lastra sensibile e con tempi di registrazione minori. I sensori più comuni ed utilizzati nell'ambito olografico sono i CMOS e i CCD. L'olografia digitale generalmente si proponeva l'obiettivo di poter generare e ricostruire gli ologrammi tramite il computer poiché i processi classici duravano diversi minuti per lo sviluppo delle lastre. Il miglioramento è avvenuto durante gli anni novanta, dove, tramite i CCD-Arrays, fu possibile effettuare registrazioni e ricostruzioni quasi immediate di ologrammi. Attualmente lo studio si è spostato sui modulatori di luce spaziale (SLM) da utilizzare come ologrammi per la ricostruzione ottica dei campi di onde 3D [3].

Come per l'olografia tradizionale, se la tecnica utilizzata è in asse vi è la formazione di una immagine virtuale, però distorta, ovvero come riflessa in uno specchio, infatti l'immagine di diffrazione in questo senso è descritta dall'integrale di Fresnel-Kirchoff :

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'} dx dy \quad (2.1)$$

con

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$$

dove d è la distanza dal CCD dell'oggetto, la $h(x, y)$ è la funzione dell'ologramma (o ampiezza di trasmissione (1.26)), ρ è la distanza tra il piano dell'ologramma e il piano

di quello ricostruito. Ricordiamo che E_R è l'ampiezza complessa dell'onda piana di riferimento data da:

$$E_R = a_R + i0 = a_R \quad (2.2)$$

la quale ha componente immaginaria nulla.

La figura di diffrazione ha una distanza D che va oltre la camera CCD, quindi, quello che si ottiene mediante l'equazione (2.1) è la ricostruzione dell'ampiezza complessa nel piano dell'immagine reale.

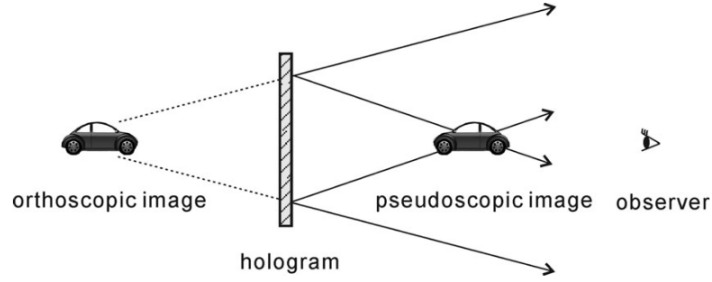


Figura 2.1: Figura di immagine ortoscopica ovvero riflessa dall'ologramma

Da questa formula è possibile calcolare, inoltre, l'intensità e la fase in quanto l'onda ricostruita possiede parte reale e immaginaria.

$$I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2 \quad (2.3)$$

$$\varphi(\xi, \eta) = \frac{Im(\Gamma(\xi, \eta))}{Re(\Gamma(\xi, \eta))} \quad (2.4)$$

ottenute tramite l'approssimazione numerica di Fresnel. L'immagine virtuale risulta distorta ed è possibile ricostruirla senza questa distorsione tramite la sostituzione nell'equazione (2.1), della sua ampiezza E_R con l'ampiezza coniugata E_R^* ottenendo quindi:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho)}{\rho} dx dy \quad (2.5)$$

con

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$$

Le formule 2.1 e 2.5 sono equivalenti solo che la seconda ricostruisce l'immagine reale.

2.2 Realizzazione di ologrammi digitali

Con il metodo numerico introdotto negli anni sessanta la diffrazione di Fresnel, non era più calcolata dalle formule tradizionali, ma il calcolo veniva rimpiazzato dalle trasformate di Fourier, che erano più immediate grazie al calcolatore. In particolare nel 1965 Cooley e Tukey instaurarono la "Fast Fourier Transform" (FFT) utilizzata per la diffrazione di un fascio di luce.

2.2.1 Calcolo della diffrazione di Fresnel tramite la FFT

Inizialmente, possiamo studiare l'integrale della diffrazione in due modi, con la FFT o tramite la "fast convolution form". Il secondo metodo consiste nell'applicare prima la FFT diretta e successivamente applicare la sua inversa, ovvero la IFFT. La denominazione di questi metodi può essere esemplificata trattando il metodo di calcolo FFT col nome S-FFT (simple fast fourier transform) per il primo caso e D-FFT (double fast fourier transform) per il secondo caso [4]. Matematicamente il fenomeno può essere descritto: sia l'ampiezza complessa $U_0(x_0, y_0)$ nel piano dell'oggetto, $U(x, y)$ nel piano osservato e d la distanza tra i due piani. La diffrazione di Fresnel integrale calcolata nella forma della trasformata di Fourier è data da:

$$U(x, y) = \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} \exp\left[\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)\right] \times \int \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ U_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{ik}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right] \right\} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda d}(x_0x + y_0y)\right] dx_0 dy_0 \quad (2.6)$$

Per valutare questa equazione è necessario calcolare la FFT della funzione:

$$U_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{ik}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right]$$

e moltiplicarlo per il fattore di fase:

$$\frac{ikd}{\lambda d} \exp\left[\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)\right]$$

Sia inoltre L_0 il lato di un quadrato situato nel piano dell'oggetto, costituito da $N \times N$ punti; in questo modo l'intervallo di campionamento è dato da $\Delta x = \Delta y = \frac{L_0}{N}$.

Il campionamento della funzione è il processo in grado di rendere discreta una funzione continua in un intervallo limitato. La precedente formula quindi può essere riscritta in modo discreto come:

$$U(p\Delta x, q\Delta y) = \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} \exp\left\{ \left[\frac{ik}{2d} \right] [(p\Delta x)^2 + (q\Delta y)^2] \right\}$$

$$FFT \left\{ U_0(m\Delta x_0, n\Delta y_0) \exp \left\{ \left[\frac{ik}{2d} \right] [(m\Delta x)^2 + (n_0\Delta y_0)^2] \right\} \right\} \quad (2.7)$$

dove $\{p, q, m, n\} \in \{-\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1\}$ e $\Delta x = \Delta y$ rappresenta l'intervallo di campionamento dopo la FFT.

La determinazione di tale intervallo è data dalla relazione:

$$\frac{L}{\lambda d} = \frac{1}{\Delta x_0} = \frac{N}{L_0}$$

dalla quale si ricava $L = \frac{\lambda d N}{L_0}$ ottenendo:

$$\Delta x = \Delta y = \frac{L}{N} = \frac{\lambda d}{L}$$

Le condizioni che devono essere soddisfatte affinché l'equazione (2.7) sia registrata correttamente sono dedotte dal teorema di campionamento, il quale impone che il numero di punti siano almeno due per ogni periodo. Lo stesso risultato è comunque ricavabile dalle equazioni equivalenti:

$$\begin{aligned} \Delta x_0 = \Delta x &= \sqrt{\frac{\lambda d}{N}} \\ L_0 = L &= \sqrt{\lambda d N} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Conseguenza di queste condizioni il calcolo della (2.7) tramite S-FFT obbedirà al teorema di campionamento. Da queste equazioni infatti si evince che da $L/\lambda d = 1/\Delta x_0 = N/L_0$ la lunghezza del piano di diffrazione ottenuto è $L = \lambda d N/L_0$, ovvero se d è vicino allo zero anche L tende a zero precludendo il risultato. In pratica non è possibile utilizzare il metodo S-FFT per piccole distanze di d . Un'altra conseguenza derivante dalle equazioni precedenti è che se il teorema soddisfa l'equazione $L_0 < \sqrt{\lambda d N}$ allora il risultato del calcolo risulta corretto. Infine dall'ultima equazione, la (2.8), è possibile ottenere un campo discreto che soddisfi il teorema solo se le lunghezze dei piani oggetto e d'osservazione sono uguali a $L_0 = L = \sqrt{\lambda d N}$.

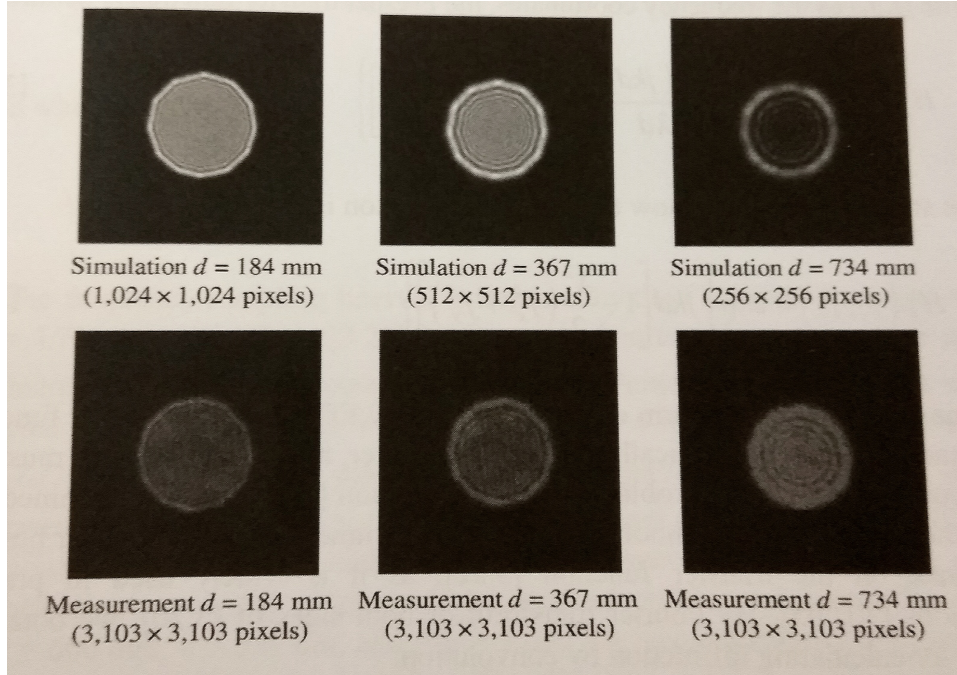


Figura 2.2: Comparazione dei modelli ottenuti a diverse distanze tramite il metodo di calcolo S-FFT [4].

Come è mostrato dalla figura (2.2), il calcolo della diffrazione di Fresnel tramite la S-FFT su un piano molto vicino al piano oggetto comporta un numero di campioni proibitivo. Il metodo della D-FFT (Double Fast Fourier Transform) consiste, data l'ampiezza complessa nel piano dell'oggetto $U(x_0, y_0)$, $U(x, y)$ quella del piano osservato e d la distanza tra i due piani, nell'utilizzare la convoluzione dell'integrale di Fresnel:

$$U(x, y) = \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0, y_0) \exp\left\{\frac{ik}{i\lambda d}[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 \quad (2.9)$$

applicando il teorema di convoluzione, la trasformata di Fourier di questa equazione diviene:

$$F\{U(x, y)\} = F\{U(x_0, y_0)\} F\left\{\frac{e^{ikd}}{i\lambda d} \exp\left[\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (2.10)$$

Utilizzando (f_x, f_y) come coordinate della frequenza, la funzione di trasferimento di Fresnel è definita come:

$$H_F(f_x, f_y) \equiv F\left\{\frac{e^{ikd}}{i\lambda d} \exp\left[\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (2.11)$$

con l'esatta soluzione data da:

$$H_F(f_x, f_y) = \exp\left\{ikd\left[1 - \frac{\lambda^2}{2}(f_x^2 + f_y^2)\right]\right\} \quad (2.12)$$

Affinché la trasformata di Fourier possa essere valutata dalla FFT le due equazioni (2.11) e (2.12) devono essere teoricamente identiche. La più utilizzata per la maggior parte delle simulazioni e nei calcoli pratici rimane la (2.12). Applicando la trasformata di Fourier a entrambi i termini dell'equazione (2.10), si ottiene la formula del calcolo della diffrazione tramite convoluzione:

$$U(x, y) = F^{-1}\{F\{U_0(x_0, y_0)\}H_F(f_x, f_y)\} \quad (2.13)$$

Questo risultato evidenzia che lo spettro nel piano osservato è il prodotto di quello dell'oggetto $F\{U_0(x_0, y_0)\}$ moltiplicato con la funzione di trasferimento $H_F(f_x, f_y)$. L'interpretazione fisica di questa applicazione consiste nel processo della diffrazione di Fresnel, che può essere considerato come una trasformazione lineare del campo oggetto filtrato da un sistema lineare invariante. Possiamo considerare per la S-FFT, L_0 la lunghezza del campo diffratto e N il numero di campioni. L'intervallo di campionamento sarà $\Delta x_0 = L_0/N$ e nel dominio dello spettro l'intervallo di campionamento per la funzione di trasferimento sarà $\Delta f_x = \Delta f_y = 1/L_0$. Inoltre usando il prodotto, tra l'ampiezza e la H_F , e la IFFT (inverse FFT), è possibile ottenere che la lunghezza del piano osservato sarà la medesima di quella del piano dell'oggetto. Solo se tali metodi conservano la dimensione spaziale del campo calcolata. La distribuzione discreta della funzione obbedisce al teorema del campionamento affinché il prodotto con la funzione di trasferimento non ne modifichi la lunghezza d'onda del campo iniziale. La funzione di trasferimento per essere campionata correttamente prevede che il numero dei punti N rispetti la regola $N > \frac{\lambda d}{\Delta x_0^2}$; si evince da questa relazione che un aumento della distanza tra i due piani comporta un accrescimento del numero dei punti N . Tale risultato è l'opposto della relazione ottenuta per la S-FFT e che quindi risulta opportuno utilizzare la funzione di trasferimento per distanze non troppo elevate.

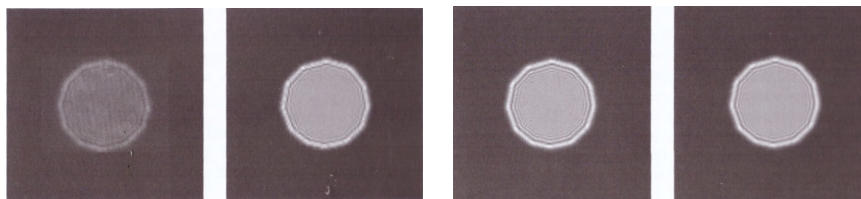


Figura 2.3: A partire da sinistra si ha una figura reale del campione e verso destra le figure simulate con pixel sempre maggiori, rispettivamente 128, 256 e 512.

Come è possibile evincere dalla figura (2.3) il numero crescente di pixel dà la possibilità di ottenere una figura più reale possibile.

2.2.2 Ricostruzione e Realizzazione informatica

I due metodi sopraccitati possono essere impiegati indiscriminatamente per la realizzazione e ricostruzione di ologrammi, attenendosi agli accorgimenti e al miglior metodo

possibile. Per la registrazione di un ologramma in modo digitale si ricorreva, prima delle simulazioni vere e proprie, ai sensori, solitamente camere CCD o CMOS. Con l'avvento delle simulazioni comprendenti anche la fase di registrazione virtuale si dava un'alternativa alla realizzazione dell'esperimento, mantenendo però risultati attendibili. Le simulazioni sono possibili solo attraverso programmi in grado di elaborare le immagini e di calcolare i metodi numerici, il più utilizzato al momento è MATLAB, un programma distribuito dalla casa Microsoft Co.; in appendice è allegato un programma che utilizza l'algoritmo S-FFT in grado di simulare ologrammi di fenditure circolari, lineari oppure da un'immagine a piacere. Il funzionamento di tale programma può essere riassunto in pochi passaggi, prendiamo per esempio il caso in cui si voglia, partendo da un'immagine voler simulare un esperimento. In primo luogo il programma rende l'immagine quadrata, anche perchè l'algoritmo risulta efficiente con matrici quadrate, inserendo bordi vuoti all'immagine; questi bordi sono costituiti da zeri i quali vengono riconosciuti, tramite un comando di traduzione cromatica, di colore nero. Il resto dell'immagine invece avrà una scala di numeri diversi per ogni colore e intensità in modo da ricostruirla in scala di grigi ed a ogni pixel viene attribuita una fase random, ovvero generata casualmente. Successivamente viene calcolato con la S-FFT l'ampiezza complessa dell'oggetto nel piano del rivelatore per poi ricavare l'ologramma digitale $|E_R + E_O|^2$ e ricostruire l'oggetto calcolando il campo diffratto a distanza di registrazione z_0 . La ricostruzione sarà però disturbata al centro della figura poichè si ha un effetto chiamato perturbazione di ordine zero, il quale sarà chiarito più avanti. Infine calcola $|E_R + E_O|^2 - E_R - E_O$ e restituisce l'immagine come dopo la prima ricostruzione ma eliminando quasi definitivamente la perturbazione di ordine zero, anche se non sempre si potrà eliminare la perturbazione. Tramite il programma quindi si ottiene l'immagine ricostruita ma affiancata da tracce della sua figura virtuale o gemella dal lato opposto e distorta.

2.3 Applicazioni dell'olografia digitale

L'olografia nell'ambito digitale presenta dei vantaggi, come già citato in precedenza, rispetto al metodo tradizionale su lastra. Gli ologrammi ottenuti digitalmente possono essere salvati, invece il lungo sviluppo con i relativi materiali e il non reimpiego delle lastre contenenti gli ologrammi (o impressionate) hanno comunque un costo. Le simulazioni sono la nuova via di controllo e gestione della tecnica olografica, in grado di prevedere i risultati senza alcun dispendio di tempo e risorse. Sono diversi i campi di applicazione dell'olografia digitale tra i quali: la microscopia elettronica, le misurazioni di particelle, la crittografia e l'interferometria.

2.3.1 Microscopia digitale olografica

L'idea di Gabor era proprio quella di migliorare la risoluzione microscopica dell'epoca. Tramite l'olografia digitale infatti non si perde la profondità del campo come spesso accade ingrandendo il campione con lenti e ovviamente per gli oggetti piccoli, la riduzione della profondità di campo sarà elevata a causa dell'uso di forti ingrandimenti.

2.3.2 Analisi olografica digitale di particelle

La disposizione In-Line (o in asse) dell'olografia digitale è la scelta tipica per l'analisi di particelle opache sospese in soluzioni trasparenti. Utilizzando impulsi laser corte è possibile determinare dimensioni, posizioni, distribuzioni spaziali, velocità e altre grandezze fisiche correlate dei campi di particelle. La determinazione di tali grandezze con l'olografia ottica ha tempi molto lunghi per lo sviluppo e valutazione delle lastre, invece tramite l'impiego delle camere CCD introdotte nell'olografia digitale è possibile ottenere sicuramente più vantaggi. Con questa tecnica "in asse" è possibile quindi avere un fronte d'onda incidente sul campione, mentre un altro incide direttamente sulla camera CCD. Questi due fronti appartenenti alla stessa onda incidono sulla camera, diffrangono e generano quindi una figura di diffrazione. Per ottenere la distribuzione spaziale delle particelle in movimento è necessario calcolare la distanza di ricostruzione dal computer; le prove di solito sono molte poiché si cerca la distanza migliore ovvero quella in cui le particelle sono messe meglio a fuoco. Il metodo utilizzato per ricavare la giusta distribuzione e la posizione è data da un algoritmo adottato nella tomografia dove il fascio laser attraversa più volte il campione e quindi viene simultaneamente registrata la particella con angolazioni diverse, questo algoritmo è definito "delle ricostruzioni multiple". Questa procedura ha bisogno di più camere CCD oppure di utilizzarne una ma con l'ausilio di alcune riflessioni in modo da poter rimandare il fascio al campione e viceversa.

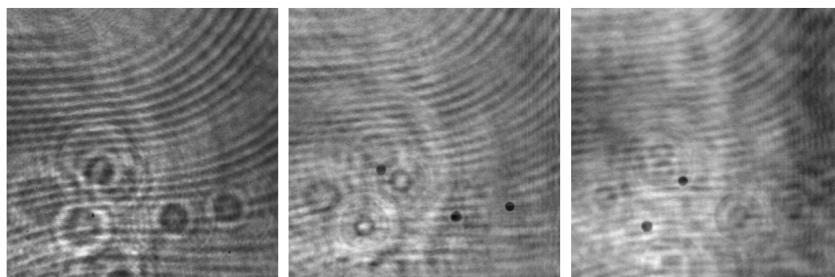


Figura 2.4: Figura di diffrazione delle particelle a sinistra, in centro è mostrata la ricostruzione sul piano oggetto più distante e a destra la ricostruzione più vicina alla camera [5].

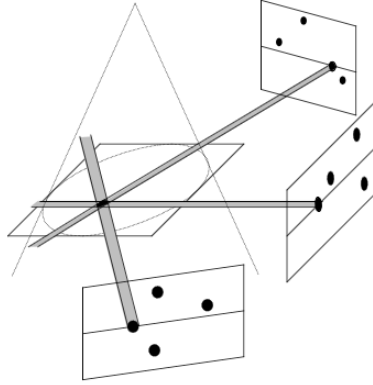


Figura 2.5: Esempio di tomografia utilizzata per l'identificazione di particelle tramite ricostruzioni multiple [5].

2.3.3 Inteferometria Olografica e Olografia Digitale Endoscopica

Inizialmente nell'interferometria olografica ottica, i modelli d'interferenza sono generati dalla doppia esposizione, in tempo reale o con metodi stroboscopici. Dai modelli d'interferenza olografica la distribuzione di fase è stata determinata tramite il conteggio delle frange, dal tracciamento delle stesse, dalla valutazione della trasformata di Fourier, dallo sfasamento oppure impiegando altri metodi. Con le nuove tecniche olografiche digitali è possibile combinare la misurazione di deformazione con quella di superficie; si ha infatti accesso diretto alla distribuzione di fase di una, ad esempio, superficie a riflessione diffusa senza l'impiego di intensità. Se noi avessimo i due campi d'onda numericamente ricostruiti $b_1(n, m)$ e $b_2(n, m)$ di una superficie prima e dopo la deformazione sarebbe possibile calcolare la differenza di fase tramite la formula:

$$\Delta\Phi(n, m) = \arctan \frac{\text{Im}[b_2(n, m)b_1^*(n, m)]}{\text{Re}[b_2(n, m)b_1^*(n, m)]} \quad (2.14)$$

questa da come risultato un valore tra il $-\pi$ e π . Poichè generalmente è nota quale superficie sarà deformata e quale rimarrà intatta non vi sarà ambiguità sul segno che potrebbe acquisire la differenza di fase come dovrebbe essere nel caso in cui si valuti la distribuzione d'intensità. L'interferometria digitale è usata non solo per determinare deformazioni, stress-test o test non distruttivi, ma anche per la determinazione, analisi di vibrazione, o misure sull'indice di rifrazione che ha impiego in molte applicazioni nella meteorologia [3]. Il metodo utilizzato per la deformazione consiste nel registrare due ologrammi dello stesso oggetto, ma in due stati differenti, per la forma, invece, si necessita di due ologrammi dello stesso oggetto senza modifiche di alcun genere, tranne

per la lunghezza d'onda del fascio illuminante o la posizione della sorgente luminosa. La messa in auge di questi concetti possono essere applicati per realizzare l'olografia digitale endoscopica. Il sensore applicabile a queste misure, necessita di essere adatto all'ambito richiesto ovvero deve avere proprietà che permettano la flessibilità e adattamento ad applicazioni in ambienti sfavorevoli. Inoltre detto sensore deve avere una dimensione ridotta e una elevata rapidità di calcolo. L'apparato sperimentale utilizzato nell'olografia endoscopica è formato da quattro parti: un computer di controllo, un laser con unità a fibre ottiche, l'endoscopio e il sensore. Quest'ultimo è di solito una camera CCD di dimensioni ridotte e attualmente è utilizzato un solo fascio, con il quale è possibile determinare posizione e forma. L'obiettivo prefissato per questa tecnica è l'implementazione di più fasci, precisamente a tre fasci perchè possibile ottenere una rappresentazione tridimensionale della deformazione. Questo tipo di applicazione ha come svantaggio che l'alta sensibilità degli ologrammi digitali se non sono assicurate le condizioni di stabilità del laboratorio invalidano la misura. La minimizzazione di questi svantaggi è attuabile impiegando il minor tempo possibile per la misurazione e per far questo è necessario avere sensori con alta velocità dell'elaborazione di dati [5].

2.3.4 Approcci alla TV 3-D

Televisioni e Film in 3-D sono già disponibili sul mercato. Oltre all'olografia però vi sono altri metodi in grado di ricostruire scene in 3-D quali: la stereoscopia, l'integral imaging o la proiezione volumica. La stereoscopia si basa sulle diverse lunghezze d'onda, infatti per poter osservare le immagini 3-D riprodotte è necessario indossare occhiali specifici le cui lenti possiedono angoli e parallassi particolari. L'uso di questi ultimi produce però un affaticamento visivo soprattutto per utilizzi prolungati. Nell'integral imaging l'immagine è una combinazione di altre piccole immagini catturate da svariate direzioni grazie a vettori lenticolari. Il risultato ottenibile da questo metodo però rileva ancora difficoltà sulla risoluzione laterale in quanto l'angolo di visuale è ridotto e la profondità risulta limitata. La proiezione volumica, invece, è il metodo che lascia meno a desiderare in quanto, utilizza spazi 3-D in cui si proietta l'immagine, tuttavia detto metodo riscontra il problema dell'occultamento ovvero se la macchina non conosce la posizione dell'osservatore alcune immagini potrebbero venir nascoste quando inserite nel secondo piano piuttosto che nel primo.

Infine l'ultimo metodo che si intende descrivere tratta dell'olografia digitale, la quale, permetterebbe grazie alla ricostruzione dei campi in 3-D, di poter superare le problematiche finora citate. Un sistema 3-D TV olografico consiste di tre steps: registrazione della scena 3-D, elaborazione e trasmissione della registrazione, proiezione e ricostruzione del campo d'onda ottico. Nonostante tutto quanto sopra descritto, i maggiori problemi che si rilevano per la realizzazione di questi sistemi sono la grandezza e la disposizione degli apparati necessari alla realizzazione di tale strumento [5].

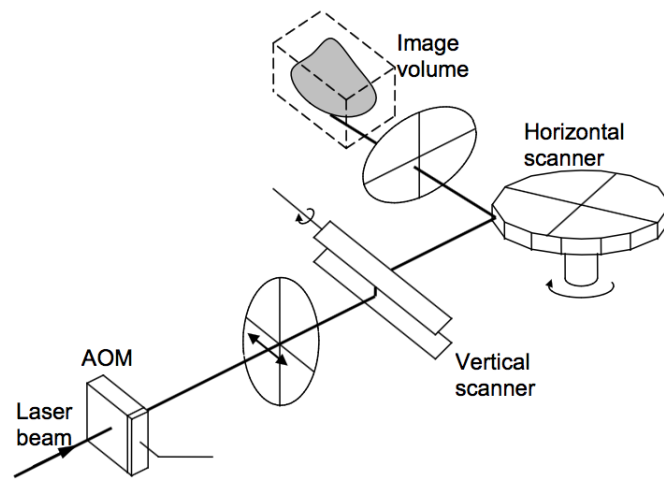


Figura 2.6: Prototipo di TV 3-D olografica del MIT in cui il fascio laser che incide sull'oggetto passa attraverso due scanner uno verticale e uno orizzontale prima di definire l'immagine sullo schermo 3-D [3].

Capitolo 3

Risultati Sperimentali

3.1 Apparato sperimentale

Questo capitolo è dedicato alla presentazione dei risultati ottenuti in laboratorio. L'apparato sperimentale è composto da un banco ottico, da un laser He-Ne, i filtri attenuatori, il porta oggetti, da una camera CCD, un computer sul quale è installato un software per l'acquisizione delle immagini e da un microscopio ottico. Nei paragrafi successivi verranno descritti in dettaglio detti componenti.

3.1.1 Banco ottico

Il primo elemento che si esamina è il banco ottico, che sorregge tutta la strumentazione. Il banco ottico deve essere il più stabile possibile e quindi meno soggetto a perturbazioni vibrazionali che potrebbero perturbare l'ologramma. Per la vibrazione possono essere causate dal traffico nelle vicinanze, dal passaggio di più persone nei pressi del banco, anche dai flussi d'aria provenienti dai climatizzatori, inoltre i rumori intensi potrebbero essere un fattore invalidante dei processi ottici. L'effetto dei rumori provoca sulla registrazione dell'ologramma un calo del contrasto tra le frange d'interferenza incidendo sulla luminosità finale. Il banco ottico pertanto deve essere composto da un piano d'appoggio rigido e pesante al fine di poter controbilanciare le vibrazioni e per evitare l'interferenza dei rumori deve poggiare su piedistalli isolanti. È possibile, inoltre, inserire elementi sabbiosi o camere d'aria al fine di minimizzare al massimo le perturbazioni esterne. Il metallo di cui i piedistalli sono costituiti è importante per la riduzione delle perturbazioni esterne in quanto deve risultare poco suscettibile alle deformazioni termiche che possono crearsi. Nello specifico il banco ottico utilizzato in laboratorio è composto da un piano di lavoro in cemento ricoperto di granito e sorretto da piedi regolabili in altezza di metallo, vedi figura 3.1.



Figura 3.1: Banco ottico del laboratorio sorretto da piedistalli regolabili in metallo

I supporti ottici posizionati sopra il tavolo sono composti da metallo e risultando piuttosto pesanti e fissati su un supporto guida sempre in metallo permettono la rigidità necessaria al fine della misura.

3.1.2 Laser

Il laser è un apparecchio in grado di emettere per emissione stimolata fronti d'onda elettromagnetici coerenti. La coerenza spaziale e temporale del raggio laser è legata alle sue principali proprietà. Alla coerenza temporale, cioè al fatto che le onde conservano la stessa fase nel tempo, è correlata la proprietà dei laser di emettere radiazione in un intervallo spettrale molto stretto, le radiazioni con una λ in un range molto piccole sono considerate onde monocromatiche. Altri particolari dispositivi laser possono emettere contemporaneamente un numero discreto di fasci a diversi range di lunghezze d'onda. Alla coerenza spaziale, cioè al fatto che la differenza di fase è costante fra punti distinti in una sezione trasversa del fascio, è correlata la possibilità di avere fasci unidirezionali e collimati, cioè paralleli anche su lunghi percorsi. I fasci laser sono focalizzabili su aree molto piccole, anche con dimensioni dell'ordine del micrometro. Il laser utilizzato in laboratorio, vedi figura 3.2, è del tipo He-Ne (elio-neon) con lunghezza d'onda di 630nm e potenza nominale di 30mW.

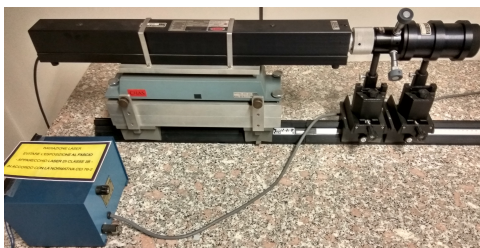


Figura 3.2: Laser He-Ne presente in laboratorio con frequenza d'onda nominale di 670nm e potenza di 30mW.

3.1.3 Filtri

I filtri sono un componente dell'ottica utilizzata in molti esperimenti, essi permettono di selezionare solo alcune componenti della radiazione per facilitare il conseguimento dell'esperimento. Le principali tipologie di filtri sono:

- ad assorbimento: assorbono alcune lunghezze d'onda e lasciano passare le altre, di solito sono composti da vetro con aggiunte di materiali organici o inorganici assorbenti;
- a riflessione: riflettono solo una parte della radiazione incidente e di trasmettere l'altra;
- monocromatici: selezionano solo una lunghezza d'onda della luce passante da essi;
- ad assorbimento infrarosso: eliminano la banda dell'infrarosso e quindi del calore;
- ad assorbimento ultravioletto: eliminano la banda dell'ultravioletto;
- neutri: attenuano in maniera costante le lunghezze d'onda del visibile e sono utili per diminuire l'intensità della sorgente luminosa impiegata.

Nei test preliminari e nell'esperienza di laboratorio sono stati impiegati i filtri a densità neutra (o neutri) perchè l'intensità del laser He-Ne satura la camera CCD, comportando quindi la non corretta lettura degli ologrammi registrati. Le specifiche dei filtri impiegati, vedi figura 3.3, sono le seguenti [6]:

- tipo: filtri a densità neutra;
- materiale: vetro a filtrazione ND;
- diametro: 12,5mm;
- spessore: 2,0mm / 1,5mm / 3,0mm;

- fattore di qualità: 60-40;
- trasmissione(%):0,3;
- assorbanza: 2,0 / 1,5 / 3,0mm;
- indice di rifrazione n_d : 1,51;
- spettro d'assorbimento: 400-700nm.

L'assorbanza è definita come il logaritmo negativo in base dieci della trasmittanza.

$$A = -\log_{10}T = -\log(I_1/I_0) = \log_{10}I_0 - \log_{10}I_1$$

dove I_0 è l'intensità incidente, mentre I_1 è quella assorbita. L'assorbanza, ovvero la OD si somma ed è come diminuire l'intensità dell'onda incidente di 10^{-OD} .



Figura 3.3: Filtri attenuatori utilizzati con i relativi involucri

3.1.4 Camera CCD

La camera CCD è un sensore formato da una matrice di pixel i quali registrano l'informazione. Questo rivelatore è composto da un'entrata AC per l'alimentazione ed un output LAN per collegarsi al computer ed ha un'obiettivo e, una matrice di pixel, questi ultimi registrano gli impulsi ottici convertendoli in segnali digitali da trasmettere il computer. Le specifiche tecniche della camera impiegata in laboratorio, vedi figura 3.4, sono le seguenti:

- casa produttrice: Basler;

- nome camera: scA1390 – 17gc;
- risoluzione: 1390 pixel \times 1038 pixel;
- dimensioni pixel: 4,65 μm \times 4,65 μm ;
- rivenditore: Sony;
- nome sensore: ICX267;
- dimensioni sensore: 6,47 mm \times 4,84 mm;
- peso: 160g;



Figura 3.4: Supporto su cui poggia la camera CCD, è ben visibile, il binario su cui poggia, l'obiettivo al cui interno risiede il sensore, l'ingresso per l'alimentazione e il cavo per l'uscita dell'immagine sul retro della camera.

3.1.5 Microscopio ottico

Il microscopio ottico è uno strumento composto da oculari, un attacco su cui è possibile montare la camera CCD, un revolver dotato di obiettivi con diversi ingrandimenti: 4x, 10x, 20x e 100x; inoltre è presente: un banco portavetrino regolabile, un diaframma e una sorgente luminosa. Il microscopio ottico è lo strumento utilizzato per verificare

la corretta ricostruzione dell'ologramma, infatti, con il microscopio e la camera CCD si catturano le immagini del vetrino e, successivamente, comparate con la ricostruzione software dell'ologramma. Il microscopio in dotazione al laboratorio è un Primo Star della Zeiss, vedi figura 3.5.



Figura 3.5: Microscopio ottico Zeiss, è possibile notare gli oculari alla sommità a sinistra, mentre al centro è presente l'attacco per la camera CCD, il revolver comprendente i diversi obiettivi, il banco poggia vetrino e il diaframma.

3.2 Test Preliminari

Prima di effettuare l'esperimento vero e proprio consistente nella registrazione e ricostruzione di un ologramma in line, si sono verificate le prestazioni e condizioni degli strumenti tramite alcuni test.

3.2.1 Diffrazione di una fenditura circolare

Per eseguire questo test si inizia con la riproduzione su camera CCD di una figura di diffrazione dovuta ad una fenditura circolare. L'esperimento consiste nel disporre in asse (o in line) una sorgente luminosa, il laser He-Ne, una fenditura circolare e la camera CCD. L'obiettivo di tale esperienza consiste nel ricavare l'intensità del massimo centrale, il quale, senza filtro attenuatore satura la CCD, vedi figura 3.6, presentando sul display un grafico con il picco tagliato centrale e dei primi massimi vicini. I grafici sono ottenuti tramite la funzione PLOT di MATLAB in grado di elaborare l'immagine come una matrice di grigi dove il più chiaro ha il picco più alto. Per un'apertura circolare si ha la difficoltà che nella determinazione dei massimi la costante m non assume valori interi, ma decimali:

$$m = 1.22, 2.33, 3.24 \dots$$

questi valori sono stati ottenuti da Airy. Infatti per il primo massimo si ottiene un diametro del disco luminoso:

$$D = 1,22 \frac{\lambda d}{w} \quad (3.1)$$

dove w è il raggio d'apertura della fenditura, λ è la lunghezza d'onda, d è la distanza tra l'apertura e la camera CCD. Per l'intensità invece si può ottenere:

$$I = 1, 0.0175, 0.0042, 0.0016, \dots$$

ovvero l'intensità è normalizzata il primo massimo successivo avrà 1,75% dell'intensità del massimo centrale [4].

Il problema della staurazione quindi non ci permette di validare il test; utilizzando invece il filtro attenuatore caratterizzato da una assorbanza di 2,0 si ottengono i seguenti risultati:

Grazie all'attenuatore e ai valori dell'intensità precedentemente esposti e ricavati dal grafico si possono ottenere i valori sia del picco centrale non attenuato che dei massimi vicini. I risultati ottenuti sono i seguenti:

- massimo centrale attenuato: $I_a \simeq 250$;
- massimo centrale non attenuato: $I = I_a 10^{Assorbanza} \simeq 25000$;
- primo massimo secondario: $I \frac{1,75}{100} \simeq 437.5$

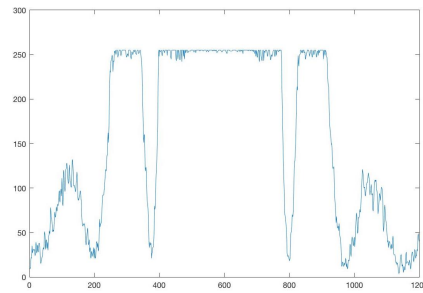
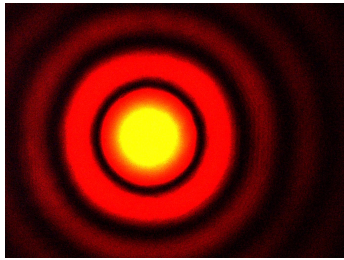


Figura 3.6: A sinistra la figura di diffrazione, senza attenuatori, con a destra il relativo grafico in cui si nota la saturazione dei picchi centrali

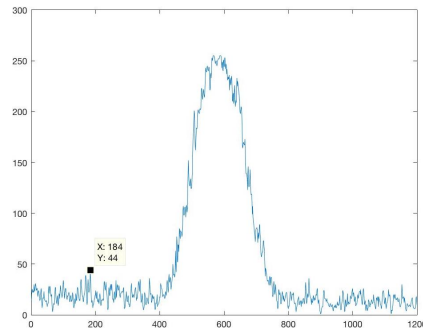
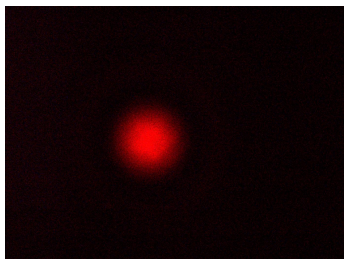


Figura 3.7: A sinistra la figura di diffrazione attenuata applicando due filtri attenuatori in serie, ottenendo una OD di 3.5. A destra il grafico relativo alla figura di diffrazione in cui si nota solo il picco centrale

- secondo massimo secondario: $I_{100}^{0.42} \simeq 105$

Il valore calcolato del secondo massimo secondario, ovvero $\simeq 105$ è compatibile con l'altezza dei picchi di ordine 2 presenti nel grafico a destra in figura 3.6.

3.2.2 Diffrazione di una fenditura

Per realizzare questo test si inizia con la riproduzione sulla camera CCD di una figura di diffrazione dovuta ad una fenditura rettangolare. L'esperimento consiste nel disporre in asse una sorgente luminosa, il laser He-Ne, il filtro attenuatore con OD (densità ottica) di 3.0, un vetrino contenente una fenditura rettangolare di spessore 1mm e la camera CCD collegata al computer, nel quale tramite un programma in LabView, si registra la figura. Lo scopo di tale test preliminare è quello di osservare se i risultati teorici della separazione tra i primi massimi coincidono con i valori riscontrati nell'esperienza. Ricordiamo che nell'approssimazione di angoli piccoli si ha:

$$\sin(\theta) \simeq \theta \simeq \frac{\Delta y}{L} \quad (3.2)$$

dove Δy è la distanza tra un massimo e quello successivo mentre L è la distanza da annotare tra la fenditura e lo schermo, in questo caso la camera acquirente. Poiché l'equazione per la determinazione dei massimi è:

$$d \sin(\theta) = n\lambda \quad (3.3)$$

con d lo spessore della fenditura e n il numero del massimo preso in considerazione. Applicando l'approssimazione per angoli piccoli si ottiene:

$$d \frac{\Delta y}{L} \simeq n\lambda \quad (3.4)$$

quindi la distanza tra due massimi vicini sarà:

$$\Delta y \simeq \frac{n\lambda L}{d} \quad (3.5)$$

Tramite questa equazione e il fattore di conversione da pixel a millimetri corrispondente al passo di un pixel è possibile confrontare i valori teorici e sperimentali. Dopo aver effettuato il test è possibile notare come il vetrino di protezione della camera CCD disturbi l'immagine di diffrazione non permettendo la corretta interpretazione dei risultati. Questo problema è già noto in letteratura, vedi a referenza [2] a pagina 109 dove è indicato che a protezione del sensore è presente un vetrino, il quale se illuminato con luce coerente produce una figura di diffrazione sul sensore il quale potrebbe disturbare l'acquisizione dell'immagine in esame, vedi figura 3.8.

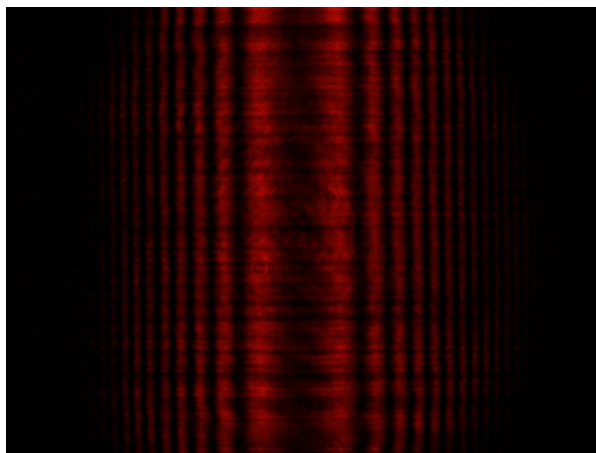


Figura 3.8: Esempio di immagine di diffrazione di una fenditura rettangolare con disturbi causati dal vetrino di protezione della CCD

3.3 Prova di registrazione e ricostruzione di un ologramma in line

Per la determinazione tramite l'olografia digitale della distribuzione delle particelle si setta la disposizione dell'esperimento come mostrato in figura 3.9.

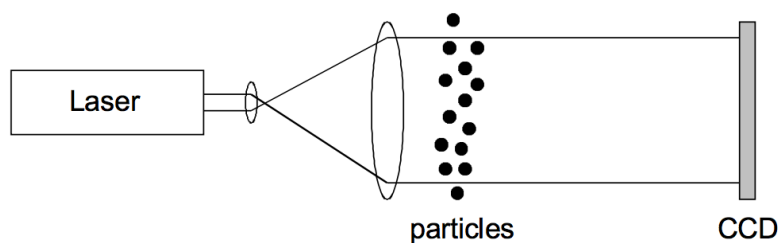


Figura 3.9: Set-up schematico per un esperimento di determinazione della disposizione di particelle [2].

Questa prova consiste nell'utilizzare e nel testare i vari componenti che sono necessari nell'esperienza finale. Preliminarmente si sono disposti, come per un esperimento di determinazione della distribuzione di particelle, nell'apparato sperimentale il banco ottico, il laser He-Ne, i porta lenti nei quali verranno disposti i filtri attenuatori, il bersaglio e la camera CCD in line. L'accensione del laser comporta una grossa luminosità, che supera la portata massima del nostro sensore, infatti sul display del computer si registra solo un'immagine totalmente bianca. L'intensità della nostra sorgente luminosa può essere attenuata grazie a filtri neutri. In primo luogo si evince che avendo solo filtri con

assorbanza di 1.5, 2.0 e 3.0 non è possibile ottenere un'attenuazione necessaria all'esperimento e che per non saturare la camera si devono disporre più di un filtro in serie. Il bersaglio è composto da un porta vetrino, in quest'ultimo deve essere inserito un vetrino da microscopio colorato su un lato con puntini di colore e diametro differenti. L'onda di riferimento piana, colpisce quindi il vetrino che genera la diffrazione sulla CCD registrata dal programma in LabView utilizzato e quindi verranno salvate le immagini della diffrazione prodotta. Dopo aver salvato la figura che rappresenta l'ologramma in line, si inserisce in un programma MATLAB il quale ne ricostruisce l'ologramma e poichè stiamo utilizzando la tecnica inline (o in asse), l'onda adottata per la ricostruzione avrà le stesse caratteristiche dell'onda di riferimento. I risultati ottenuti da questa esperienza sono che la distanza ottimale per la registrazione della figura di diffrazione è di circa 20cm e per l'attenuazione un valore intorno a 3.5.

3.4 Registrazione ologramma in line

La prova sperimentale proposta da questo documento consiste nella disposizione del banco ottico ovvero nel predisporre il laser He-Ne, i filtri attenuatori in serie che permettono la non saturazione della camera CCD, l'oggetto e la CCD in linea. Il bersaglio del fascio è un vetrino da microscopio sui cui lati sono stati disegnati, con pennarelli a punta fine, dei puntini di diverso colore e raggio, vedi figura 3.10. I filtri ottici sono stati disposti in serie ottenendo un'assorbanza pari a 3,5. La camera CCD è collegata tramite cavo LAN al computer, nel quale è eseguito un programma in Labview contenente i Driver in più con la possibilità di gestire il guadagno, i colori, la gamma della camera stessa e la possibilità di acquisire la figura di diffrazione. Acceso il laser e sistemato il vetrino in modo da colpire la camera, compare sul display la figura di diffrazione, vedi figura 3.11.

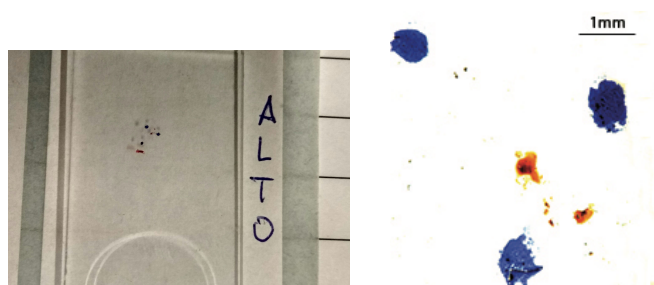


Figura 3.10: Immagine del vetrino da microscopio a sinistra e delle macchie ingrandite al microscopio a destra

In questo stato non appaiono chiari i punti colorati sul vetrino poichè l'immagine deve essere ricostruita per ottenere i punti disegnati.

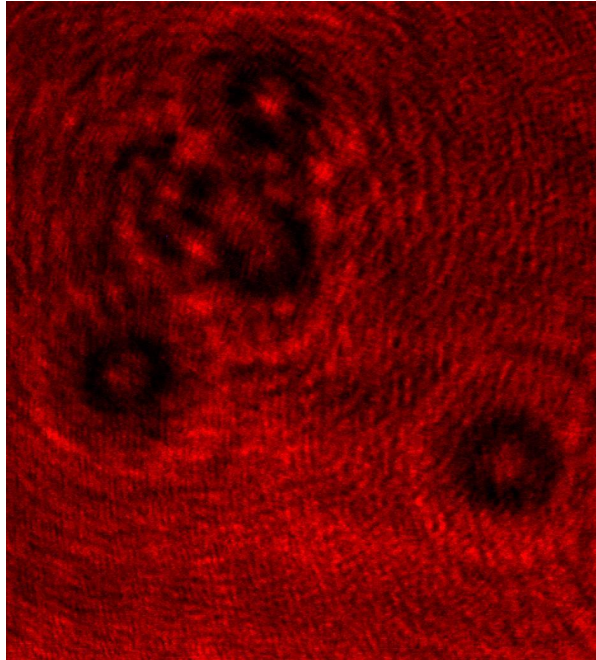


Figura 3.11: Figura di diffrazione del vetrino, nel quale si notano le figure di diffrazione provocate dai puntini colorati disegnati sul vetrino.

3.5 Ricostruzione dell'ologramma

Dopo aver registrato la figura di diffrazione si utilizza un programma chiamato `holo_rec`, presente nell'appendice, in grado di ricostruire a partire dall'immagine e dalla distanza tra piano oggetto e camera CCD. Il programma utilizza nello specifico un'onda di ricostruzione identica a quella usata per campionare il vetrino. La ricostruzione ha bisogno di alcuni parametri ovvero la distanza tra l'oggetto e il piano osservato e la lunghezza d'onda dell'onda di riferimento. La distanza nello specifico deve essere inserita in input con i valori annotati nella registrazione e variata. La variazione è dovuta dalla presenza dei punti colorati sia su un lato che sull'altro del vetrino e quindi il programma mette a fuoco prima un piano poi l'altro. I valori inseriti per cambiare il fuoco sono lo spessore del vetrino di 1mm e la distanza tra il piano oggetto, la camera d'acquisizione che è di 200mm, inoltre è necessario conoscere quale dei due lati è disposto in vicinanza della camera e quale vicino al laser. In questo caso i puntini rossi sono disposti verso il laser, ovvero più lontani dalla CCD, mentre i blu sono più vicini. Infine è proposto un confronto fra l'immagine catturata dal microscopio ottico e le immagini ricostruite su più piani della figura di diffrazione.

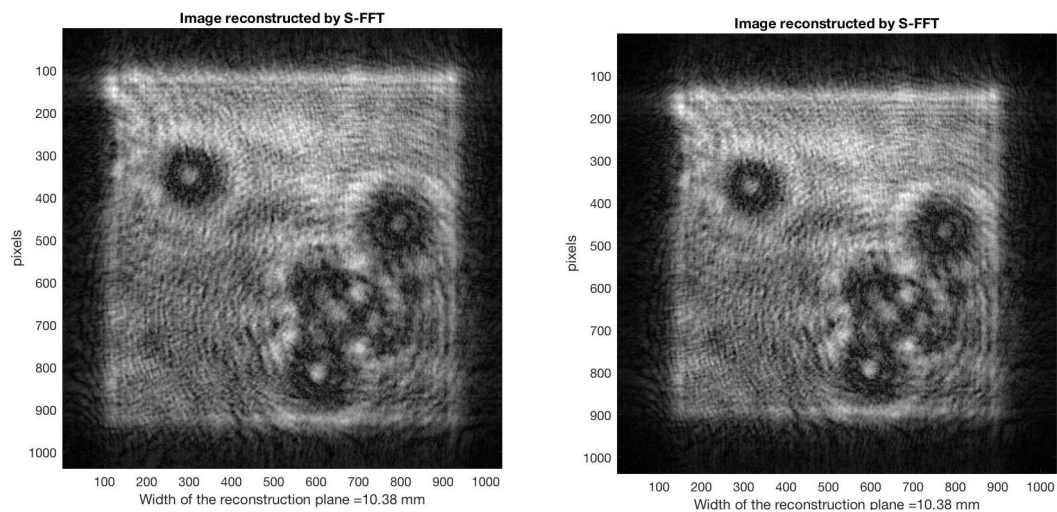


Figura 3.12: Immagine ricostruita col programma eseguito in MATLAB in cui vengono messe a fuoco le macchie d'inchiostro blu a sinistra, mentre a destra è presente l'immagine dell'ologramma ricostruito mettendo a fuoco le macchie più lontane

Nelle immagini riportate sopra gli ologrammi ricostruiti sono ruotati rispetto all'immagine registrata dalla camera CCD perchè ciò che si vede è la ricostruzione dell'immagine reale, ovvero quella di partenza, vedi figura 3.13. Nel caso preso in esame sono stati presi solo i puntini formanti un triangolo e si nota come nella figura di diffrazione la parte con più interferenza diviene chiara nell'immagine ricostruita, dove sono presenti più puntini dello stesso colore: l'immagine del microscopio asserisce questo risultato, vedi figure 3.14 e 3.15.

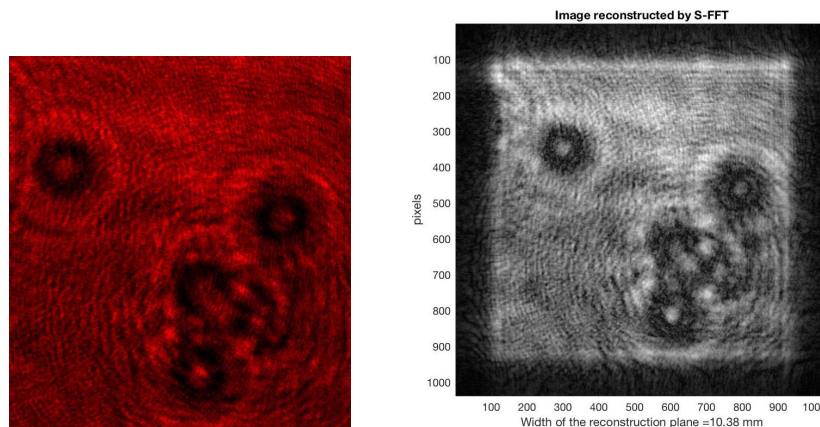


Figura 3.13: A sinistra l'immagine della figura di diffrazione acquisita dalla camera CCD ruotata di -90 e a destra la figura ricostruita dal software

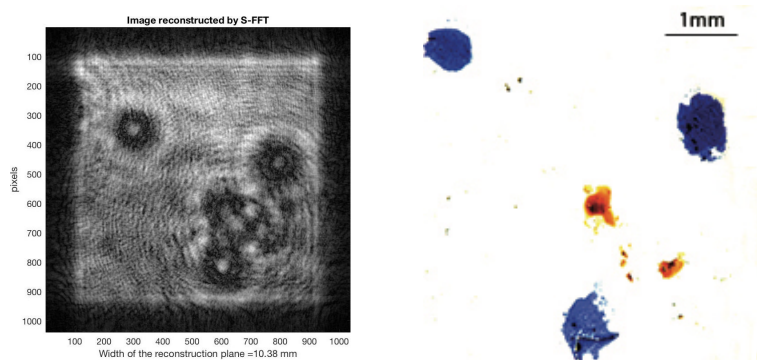


Figura 3.14: Immagine ricostruita col programma eseguito in MATLAB in cui vengono messe a fuoco le macchie d'inchiostro blu e l'immagine del vetrino al microscopio ottico a destra con ingrandimento x10

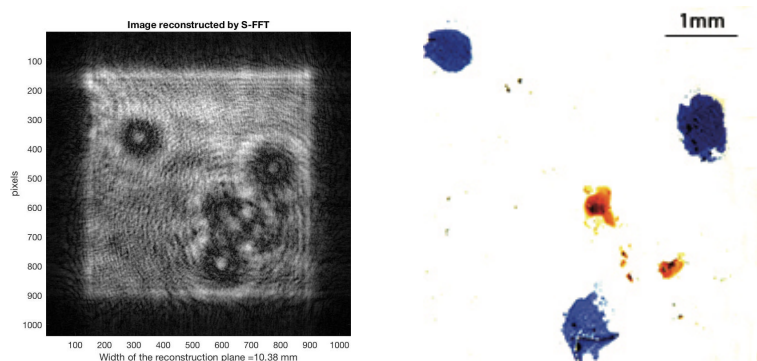


Figura 3.15: Immagine ricostruita col programma eseguito in MATLAB in cui vengono messe a fuoco le macchie d'inchiostro rosse e l'immagine del vetrino al microscopio ottico a destra con ingrandimento x10

Come primo approccio all'olografia in line, l'esito dell'esperienza è stato non soddisfacente, in quanto non è stato possibile avere un netto distacco delle messe a fuoco tra i due piani del vetrino. Le possibili ragioni di questo insuccesso possono essere attribuite al vetrino di protezione della camera CCD o alla errata messa in asse dell'apparato sperimentale.

Conclusioni

Nella presente tesi si è discusso della olografia digitale, la quale porta molti vantaggi rispetto a quella tradizionale, in particolare è possibile salvare e modificare le figure ottenute tramite il software. Per modificare s'intende aumentare il guadagno dello strumento, il grado di saturazione o bilanciare i colori manualmente. Un altro vantaggio consiste nella realizzazione di ologrammi attraverso i metodi numerici e simulazioni, impiegando meno tempo e dispendio di materiali. Infine non si presenta il problema dello smaltimento, non essendoci la necessità dello sviluppo chimico, o del reimpiego delle lastre impressionate.

I primi test sostenuti nel laboratorio del DIFA hanno evidenziato la necessità di impiegare filtri attenuatori, infatti il laser He-Ne satura la camera CCD impedendo la corretta realizzazione delle figure di diffrazione. Inoltre i test effettuati attraverso le fenditure hanno sottolineato che la figura d'interferenza generata dal vetrino di protezione della camera CCD può disturbare le immagini acquisite e invalidare i risultati quindi ottenuti. Prima di effettuare la registrazione e la ricostruzione in line si sono preparati diversi bersagli e ricostruite le immagini tramite il software MATLAB con risultati preliminari non del tutto soddisfacenti. Lo scopo di questa tesi è l'analisi dell'esito al primo approccio dell'olografia in line. I risultati, delle immagini ricostruite, evidenziano che i due piani del vetrino sul quale erano presenti macchie d'inchiostro le quali costituivano l'oggetto dell'ologramma non sono state messe a fuoco. Infatti è possibile notare come le macchie di colore rosso intermedie producano effetti indesiderati. Questo disturbo provoca la difficoltà nel determinare il numero delle macchie e la loro esatta posizione. Le cause della scarsa confrontabilità dell'esperimento rispetto a quanto atteso si possono attribuire alla disposizione dell'apparecchiatura, ovvero dalla messa in asse, al vetrino di protezione della camera CCD, come discusso in precedenza, o al disturbo generato dal metodo in line, detto rumore di ordine zero. In futuro si prevede di poter eliminare i disturbi di tale procedura effettuando l'esperienza col metodo off line, come visto in precedenza.

I programmi software utilizzati nella presente tesi sono stati modificati per poter essere impiegati anche su piattaforme diverse da Microsoft Windows, in particolare Linux.

Appendice

Programmi eseguibili in MATLAB

Algoritmo SFFT con input da file

Variabili contenute in questo programma e alcune da inserire sul display: h è la lunghezza d'onda (mm); z_0 è la lunghezza del piano diffratto (mm); U_0 è l'ampiezza complessa del piano iniziale; L_0 è la lunghezza del piano iniziale (mm); U_f è l'ampiezza complessa del campo sul piano osservato; L è la lunghezza del piano osservato (mm). In più se l'immagine inserita è rettangolare, il programma la renderà quadrata inserendo dei bordi neri.

```
clear;close all;
chemin = '';
[nom,chemin] = uigetfile([chemin,'*.*'],
'initial image',100,100);
[XRGB,MAP]=imread([chemin,nom]);
X=XRGB(:,:,1);
h=input('Wavelength (mm) : ');
L0=input('Maximum width of the initial
plane L0 (mm):');
k=2*pi/h;
[M,N]=size(X);
K=max(M,N);
Z1=zeros(K,(K-N)/2);
Z2=zeros((K-M)/2,N);
Xp=[Z1,[Z2;X;Z2],Z1];
zmin=L0\verb|^|^2/K/h;
disp(['Minimum distance to fullfill sampling
theorem :
',num2str(zmin),' mm']);
z0=input(['Diffraction distance z0 (mm)
(>',num2str(zmin),'mm) : '])
```



```

U0=double(Xp);
figure(1), imagesc(Xp), colormap(gray);
axis equal; axis tight; ylabel('pixels');
xlabel(['Width of the initial plane:
', num2str(L0), ' mm']);
title('Amplitude of the initial field');
n=1:K;
m=1:K;
x=-L0/2+L0/K*(n-1);
y=-L0/2+L0/K*(m-1);
[xx,yy]=meshgrid(x,y);
Fresnel=exp(1i*k/2/z0*(xx.^2+yy.^2));
f2=U0.*Fresnel;
%f2=U0;
Uf=fft2(f2,K,K);
Uf=fftshift(Uf);
L=h*abs(z0)*K/L0;
x=-L/2+L/K*(n-1);
y=-L/2+L/K*(m-1);
[xx,yy]=meshgrid(x,y);
phase=exp(1i*k*z0)/(1i*h*z0)*
exp(1i*k/2/z0*(xx.^2+yy.^2));
Uf=Uf.*phase;
If=abs(Uf);% amplitude of the
diffracted field.
If=If/max(max(If));
I = If.^2;

figure(2), imagesc(abs(I)), colormap(gray);
axis equal; axis tight; ylabel('pixels');
xlabel(['Width of the observation plane:
', num2str(L), 'x', num2str(L), ' mm']);
title('Amplitude of the
image diffracted by S-FFT');

```

Programma di simulazione e ricostruzione su piani diversi

In questo programma vengono definiti due oggetti chiamati I1 e I2 a distanze impostate diverse z1 e z2, rispettivamente 25 e 15cm dalla camera CCD, i quali sono investiti da un'onda piana di lunghezza d'onda w impostata col valore 670nm. La camera CCD ha il passo dei pixel di $10\mu\text{m}$. Le variabili: Hologram è l'ologramma che si suddivide in Hr che è l'ologramma reale e Hi, ovvero quello immaginario. La ricostruzione infine è attuata a distanza z1 e z2 con il metodo D-FFT.

```
clear all; close all;
I1=zeros(512);
I1(220:300,220:230)=1;
I2=zeros(512);
I2(340:350,250:330)=1;
figure;imshow(I1);
title('Object 1')
axis off
figure;imshow(I2);
title('Object 2')
axis off
M=512;
deltax=0.001;
w=633*10^-8;
z1=30;
z2=15;
r=1:M;
c=1:M;
[C, R]=meshgrid(c, r);
deltaf=1/M/deltax;
A01=fftshift(iff2(fftshift(I1)));
p1=exp(-2i*pi*z1.*((1/w)^2-
((R-M/2-1).*deltaf).^2-
((C-M/2-1).*deltaf).^2).^0.5);
Az1=A01.*p1;
A02=fftshift(iff2(fftshift(I2)));
p2=exp(-2i*pi*z2.*((1/w)^2-
((R-M/2-1).*deltaf).^2-
((C-M/2-1).*deltaf).^2).^0.5);
Az2=A02.*p2;
Hologram=fftshift(fft2(fftshift(Az1)))+
fftshift(fft2(fftshift(Az2)));
Hr=mat2gray(real(Hologram));
```

```

Hi=mat2gray(imag(Hologram));
figure;imshow(Hr)
title('Real part of
the complex hologram')
axis off
figure;imshow(Hi)
title('Imaginary part of
the complex hologram')
axis off
Ar=fftshift(iff2(fftshift(Hologram)));
Arz1=Ar.*conj(p1);
EI1=fftshift(fft2(fftshift(Arz1)));
EI1=mat2gray(EI1.*conj(EI1));
figure;imshow(EI1);
title('Reconstructed image at z=z_1')
axis off
Arz2=Ar.*conj(p2);
EI2=fftshift(fft2(fftshift(Arz2)));
EI2=mat2gray(EI2.*conj(EI2));
figure;imshow(EI2);
title('Reconstructed image at z=z_2')
axis off

```



Figura 3.16: I due oggetti, a sinistra I1 e a destra I2

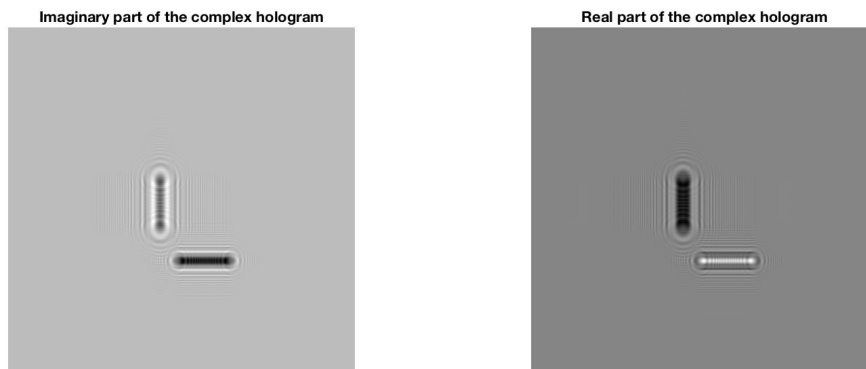


Figura 3.17: Le due componenti dell'ologramma a sinistra quella reale e a destra quella immaginaria

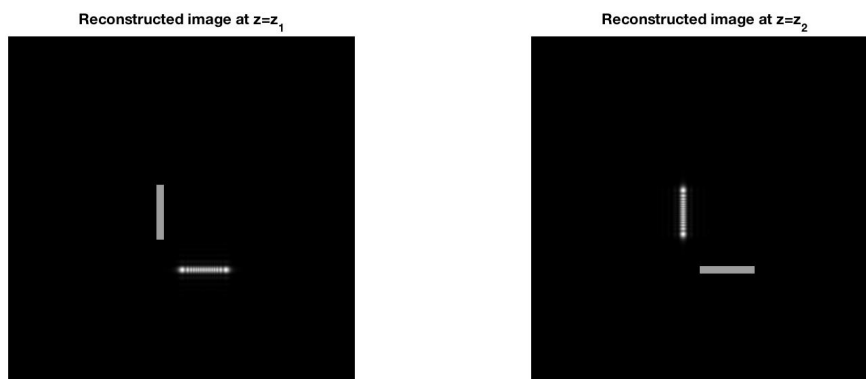


Figura 3.18: Le due ricostruzioni, a sinistra in $z=z_1$ e a destra in $z=z_2$

Programma di ricostruzione

Questo programma permette la ricostruzione di un ologramma a partire da una figura di diffrazione data come input da file. Le variabili utilizzate dal programma sono: I_h è l'ologramma; h è la lunghezza d'onda (mm); L lunghezza dell'ologramma (mm); L_0 lunghezza del campo oggetto diffratto (mm); z_0 è la distanza di ricostruzione (mm); U_0 è l'ampiezza complessa nel campo ricostruito.

```
clear ; clc ; close all ;
chemin = '';
[nom, chemin] = uigetfile
```

```

([chemin, '*. *'],
['Choose a hologram'], 100, 100);
I1=imread([chemin, nom]);
figure; imagesc(I1); colormap(gray);
axis equal; axis tight;
title('Digital hologram');
Ih1=double(I1)-mean2(double(I1));
[N1, N2]=size(Ih1);
N=min(N1, N2); % Restriction to NxN
Ih=Ih1(1:N, 1:N);
pix=input('Pixel pitch (mm) : ');
h=input('Wavelength (mm) : ');
z0=input('Reconstruction distance z0
(+ for a real image,
- for a virtual image)(mm) : ');
L=pix*N;

%————Reconstruction by S-FFT
n=-N/2:N/2-1;
x=n*pix; y=x;
[xx, yy]=meshgrid(x, y);
k=2*pi/h;
Fresnel=exp(i*k/2/z0*(xx.^2+yy.^2));
f2=Ih.*Fresnel;
Uf=fft2(f2, N, N);
Uf=fftshift(Uf);
ipix=h*abs(z0)/N/pix;
x=n*ipix;
y=x;
[xx, yy]=meshgrid(x, y);
phase=exp(i*k*z0)/(i*h*z0)*
exp(i*k/2/z0*(xx.^2+yy.^2));
U0=Uf.*phase;
%————End of S-FFT

% Plot della ampiezza
If=abs(U0).^0.75;
Gmax=max(max(If));
Gmin=min(min(If));
L0=abs(h*z0*N/L);
disp(['Width of the reconstruction

```

```

plane=',num2str(L0),' mm'];
figure;imagesc(If,[Gmin,Gmax]),
colormap(gray);axis equal;axis tight;
ylabel('pixels ');
xlabel(['Width of the reconstruction
plane =',num2str(L),' mm']);
title('Image reconstructed by S-FFT');

p=input('Display parameter (>1) : ');
while isempty(p) == 0
imagesc(If,[Gmin Gmax/p]),
colormap(gray);
axis equal;axis tight;
ylabel('pixels ');
xlabel(['Width of the
reconstruction plane =
',num2str(L),' mm']);
title(' Image reconstructed by S-FFT ');
p=input('Display
parameter (>1) (0=end) : ');
if p==0,
break
end
end
end

```

Bibliografia

- [1] *Poon T-C., Liu J-P., Introduction to Modern Digital Holography, Cambridge, 2014*
- [2] *Schnars U., Juptner W., Digital Holography, Digital Hologram Recording, Numrical Reconstruction, and Related Techniques, Springer, Germany, 2005.*
- [3] *T. Kreis, Applications of Digital Holography: From Microscopy to 3D-Television, Journal of th European Optical Society Rapid Pubblicazion, Germany, 2012*
- [4] *Picart P, Li C., Digital Holography, John Wiley and Sons, 2013.*
- [5] *De Dominicis L., Studio preliminare per olografia digitale, Tesi di Laurea Triennale, Bologna, 2014/2015.*
- [6] *<http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/neutral-density-filters/absorptive-neutral-density-nd-filters/1945/>*

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare per questa Tesi: il Prof. M.Cuffiani, il quale con pazienza e dedizione ha dedicato il suo tempo al mio lavoro; la mia famiglia, soprattutto a mia sorella Barbara che mi ha aiutato con l'italiano; i miei amici della bandofphysicist con i quali ho passato tre anni stupendi della mia vita; i miei coinquilini con i quali ho scoperto l'alta cucina; e la mia ragazza che mi ha sostenuto. Infine ringrazio il lettore di questa tesi.