

SVILUPPI DELLA FOTOELASTICITÀ RGB

A. Ajovalasit^a, G. Petrucci^b, M. Scafidi^c

*Dipartimento di Meccanica(DIMA), Università degli Studi di Palermo,
Viale delle Scienze – Edificio 8 – 90128 Palermo,
e-mail: ^aajovalasit@dim.unipa.it, ^bpetrucci@dim.unipa.it, ^cscafidi@dim.unipa.it.*

Parole chiave: meccanica sperimentale, fotoelasticità digitale, controlli non distruttivi

Sommario

Questa memoria considera le caratteristiche della fotoelasticità *RGB* con riferimento al massimo ordine di frangia rilevabile che dipende dalla modulazione del segnale, dalla sorgente luminosa, dalla presenza di colori simili e dal gradiente delle frange.

Le esperienze mostrano che la lampada ad incandescenza consente di rilevare ritardi fino a circa 4 ordini di frangia mentre la lampada a fluorescenza consente di determinare ordini di frangia ben più elevati (12 in questa memoria) grazie alla natura discreta della sorgente.

Abstract

This paper considers the characteristics of *RGB* photoelasticity with reference to the determination of the maximum fringe order that depends from the light source, from the presence of similar colours and from the gradient of the fringes.

The experiments show that the incandescent lamp allows the determination of approximately 4 fringe orders, whereas the fluorescent lamp permits to determine fringe orders more elevates (12 in this paper) owing to the discrete nature of such light source.

Introduzione

L'automazione della fotoelasticità [1,2] può dare un utile impulso alle sue applicazioni con particolare riferimento al controllo non distruttivo ed all'analisi delle tensioni di componenti in materiale birifrangente quali vetri e materie plastiche [3-7].

La tecnica fotoelastica ha infatti ricevuto un notevole impulso dallo sviluppo dei sistemi di acquisizione ed elaborazione automatica delle immagini. In particolare la fotoelasticità automatica in luce bianca si basa su tecniche quali: (1) *Spectral Content Analysis (SCA)* [8], (2) fotoelasticità *RGB* [9-11], (3) metodi a variazione di fase [12-15].

Questa memoria riguarda la fotoelasticità *RGB* che è un metodo a campo intero che consente la determinazione del ritardo utilizzando in genere una sola acquisizione delle isocromatiche in luce bianca. Tale tecnica permette, nella sua formulazione iniziale [9,10], di determinare ritardi non superiori a 4 ordini di frangia. L'impiego di una lampada

fluorescente, a spettro discreto, comunemente utilizzata come lampada a basso consumo, consente in modo semplice di aumentare il massimo ordine osservabile, come mostrato nel Rif. [11].

Questo lavoro, dopo una rassegna dei principali sviluppi della fotoelasticità *RGB*, considera l'impiego delle lampade a fluorescenza a spettro discreto al fine di determinarne l'effettivo campo di impiego.

2. Rassegna del metodo

Nella fotoelasticità *RGB* il modello è posto in un polariscopio circolare classico, in genere a campo scuro. Le isocromatiche sono acquisite in luce bianca tramite una telecamera *RGB* che scompone, mediante tre filtri a banda larga, l'immagine nei tre colori primari rosso, verde e blu. Una scheda digitalizza i tre colori primari in tre livelli di intensità che di solito sono indicati con i simboli *R*, *G* e *B*.

A causa dei filtri a banda larga non si può utilizzare la classica equazione del polariscopio circolare a campo scuro:

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta}{\lambda} \right), \quad (1)$$

dove in fotoelasticità piana il ritardo Δ è legato alla differenza delle tensioni principali $\sigma_1 - \sigma_2$ dalla nota relazione:

$$\delta = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{C_\lambda d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (2)$$

essendo d lo spessore del modello fotoelastico e C_λ la costante fotoelastica alla lunghezza d'onda λ della sorgente di luce monocromatica utilizzata nel polariscopio.

Se si considera il modello nel polariscopio circolare a campo scuro con sorgente a luce bianca, l'intensità luminosa acquisita dalla telecamera *RGB* è esprimibile, non considerando l'errore delle lastre quarto d'onda, la dispersione della birifrangenza ed il rumore di fondo, con una relazione del tipo:

$$I_{wj} = \frac{1}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} \int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} F_j(\lambda) I_0(\lambda) \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta}{\lambda} \right) d\lambda, \quad (j = R, G, B), \quad (3)$$

dove $F_j(\lambda)$ ($j=R,G,B$) indica la risposta spettrale dei tre filtri della telecamera, λ_{j1} , λ_{j2} sono le lunghezze d'onda, iniziale e finale, relative ai tre filtri suddetti e il pedice w indica che l'acquisizione è effettuata in luce bianca.

La determinazione del ritardo Δ , per mezzo della (3), non è agevole per cui si preferisce ricorrere alla taratura del sistema.

2.1 Procedura di taratura - La procedura di taratura consiste nell'acquisire i livelli *R*, *G* e *B* lungo la sezione trasversale di un provino soggetto a flessione. Si ottiene così una tabella di taratura, analoga alla *carta dei colori* utilizzata nel metodo dei rivestimenti birifrangenti, nella quale ad ogni ritardo Δ noto (o δ per data lunghezza d'onda di riferimento λ_0) è associato una terna di valori misurati *R*, *G* e *B*.

2.2 Ricerca del ritardo - Durante l'analisi del modello fotoelastico si rilevano i livelli R_m , G_m e B_m nei punti ove il ritardo è incognito. Ogni terna R_m , G_m e B_m è quindi paragonata con le terne R_i , G_i e B_i memorizzate nella tabella di taratura. Il ritardo incognito è quello corrispondente ai valori R_i , G_i e B_i che minimizzano una funzione errore definita come:

$$e_i = \sqrt{(R_i - R_m)^2 + (G_i - G_m)^2 + (B_i - B_m)^2}. \quad (4)$$

A tal fine in ogni pixel: (I) si calcola la funzione errore data dalla (4), (II) si determina l'indice i che minimizza la suddetta funzione errore, (III) si calcola il ritardo nel punto considerato mediante la relazione:

$$\delta_i = N_m i / i_m, \quad (5)$$

dove N_m è il massimo ritardo della tabella di taratura (in genere 3 con lampada ad incandescenza) e i_m è l'indice corrispondente a N_m .

Nel seguito si considerano i principali sviluppi della fotoelasticità *RGB* con riferimento ai seguenti aspetti:

- numero di acquisizioni,
- tipo di sorgente,
- metodi di ricerca del ritardo.

3. Numero di acquisizioni

La tabella 1 riassume il numero di acquisizioni utilizzate in diverse varianti del metodo *RGB*. Nel metodo classico (riga 1) si effettua una sola acquisizione al polariscopio circolare a campo scuro. Nel secondo metodo (riga 2) si effettuano due acquisizioni al polariscopio circolare a campo chiaro e campo scuro e si utilizzano le differenze dei livelli a campo chiaro e a campo scuro ai fini della determinazione del ritardo. Nel terzo metodo (riga 3) si usa il polariscopio piano ad assi incrociati per determinare le isocline con il metodo a variazione di fase in luce bianca; le stesse 4 immagini combinate tra di loro forniscono le isocromatiche a campo scuro eliminando così l'errore dovuto alle lastre quarto d'onda. Nel quarto metodo (riga 4) si applica il metodo a variazione di fase in luce bianca; i ritardi frazionari (*wrapped*) così ottenuti sono utilizzati per la determinazione del ritardo al posto dei livelli *R*, *G* e *B*.

Tabella 1: Numero di acquisizioni utilizzate in diverse varianti della fotoelasticità *RGB*

N°	Numero di acquisizioni	Tipo di polariscopio	Bibliografia
1	1	Circolare a campo scuro	[9,10]
2	2	Circolare a campo scuro e a campo chiaro	[10]
3	4	Piano ad assi incrociati	[12]
4	≥4	Semicircolare	[16,17]

Il primo metodo è il più semplice poiché richiede una sola acquisizione, esso può quindi essere utilizzato nel caso di campi tensionali variabili nel tempo. Gli altri metodi perdono questa caratteristica di semplicità; per contro consentono di eliminare alcuni effetti spuri, di determinare anche il parametro dell'isoclina (3° metodo) e di aumentare il massimo ordine di frangia rilevabile (4° metodo).

4. Tipo di sorgente

La sorgente inizialmente proposta [9] ed attualmente molto utilizzata è la comune lampada ad incandescenza che ha uno spettro di emissione continuo del tipo indicato in figura 1a. Successivamente alcuni autori hanno cercato di innalzare il massimo ordine di frangia osservabile mediante l'utilizzo di sorgenti con tre bande strette di lunghezze d'onda, come riportato per esempio in [18], o più semplicemente mediante l'impiego di lampade a fluorescenza con spettro di emissione discreto [11] (comune lampada a risparmio energetico) quali, per esempio, le lampade Philips tipo Master LP 827 il cui spettro è riportato in figura 1b.

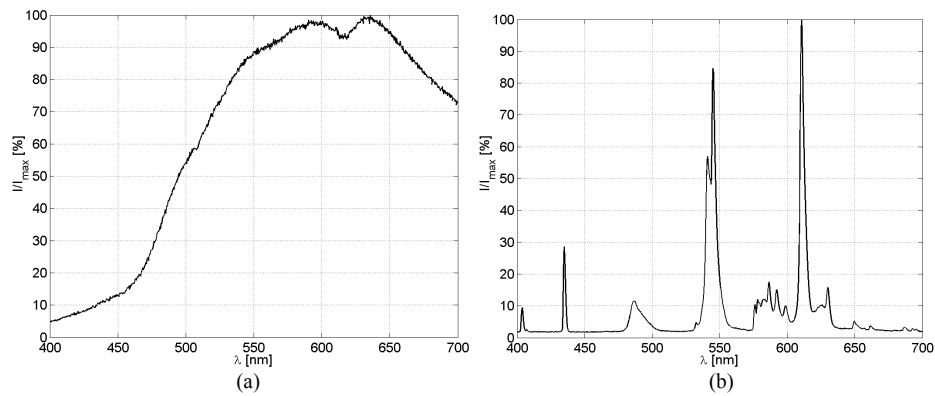


Figura 1: Spettri di emissione: (a) continuo (comune lampada ad incandescenza), (b) discreto (lampada a fluorescenza del tipo a risparmio energetico)

In questa memoria l'attenzione è focalizzata sul confronto tra due tipi di sorgente: lampada a incandescenza a spettro continuo e lampada a fluorescenza a spettro discreto. La figura 2 mostra, per le sorgenti i cui spettri sono riportati in figura 1, i segnali, rilevati lungo la sezione trasversale di una trave inflessa osservata al polariscopio circolare a campo scuro, in funzione del ritardo alla lunghezza d'onda di riferimento $\lambda_0=589$ nm.

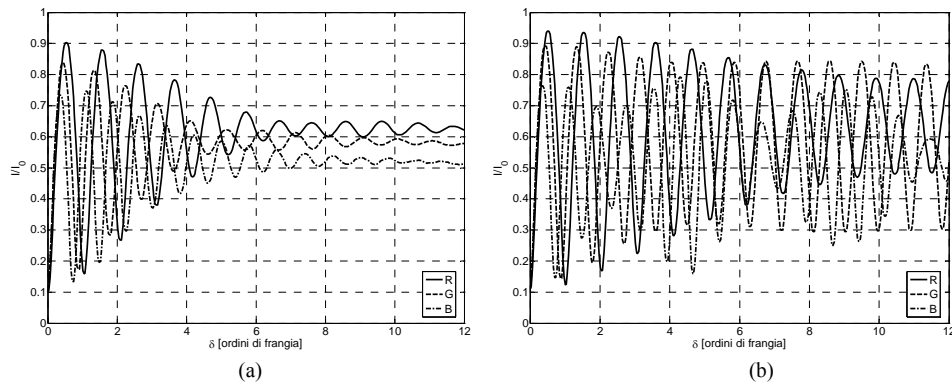


Figura 2: Segnali R , G , B rilevati con la lampada ad incandescenza (a) e con quella a fluorescenza (b), in funzione del ritardo δ_i alla lunghezza d'onda di riferimento $\lambda_0=589$ nm

La figura 2a, che si riferisce alla lampada ad incandescenza, mostra che la modulazione del segnale diminuisce rapidamente all'aumentare dell'ordine di frangia e tende ad annullarsi per ordini superiori al quinto, di conseguenza il massimo ordine rilevabile è di norma inferiore al quarto: tipicamente, infatti, la fotoelasticità RGB , con lampada ad incandescenza, si applica fino a 3 ordini di frangia. La figura 2b, relativa alla lampada a fluorescenza, mostra invece che la modulazione del segnale diminuisce lentamente all'aumentare dell'ordine di frangia mantenendosi elevata almeno fino a 10 ordini (12 nel caso di figura 2b).

Come si vedrà anche nel seguito il massimo ordine di frangia rilevabile con la fotoelasticità RGB dipende in generale:

- dalla modulazione del segnale, legata principalmente alla sorgente luminosa (figura 2),
- dalla presenza di colori simili e dalla procedura di ricerca del ritardo,

- dal gradiente delle frange che non può superare 0.1 ordini/pixel [9], dipendente dalle caratteristiche della telecamera: risoluzione del CCD e possibilità di ingrandimento.

5. Metodi di ricerca del ritardo

L'ordine massimo rilevabile con lampada ad incandescenza (circa 3-4) può essere aumentato, come si è detto, utilizzando un lampada a fluorescenza a spettro discreto.

All'aumentare dell'ordine di frangia si verificano ambiguità dovute al fatto che si possono presentare, per ritardi differenti, colori uguali o molto simili a partire da un certo ritardo. Questa circostanza è chiaramente individuabile dal diagramma dei livelli R, G, B [11], tratto dai dati sperimentali di figura 2b, che si avvolge a *gomitolo* (andando verso l'interno a partire dal punto indicato dalla freccia all'aumentare del ritardo (figura 3).

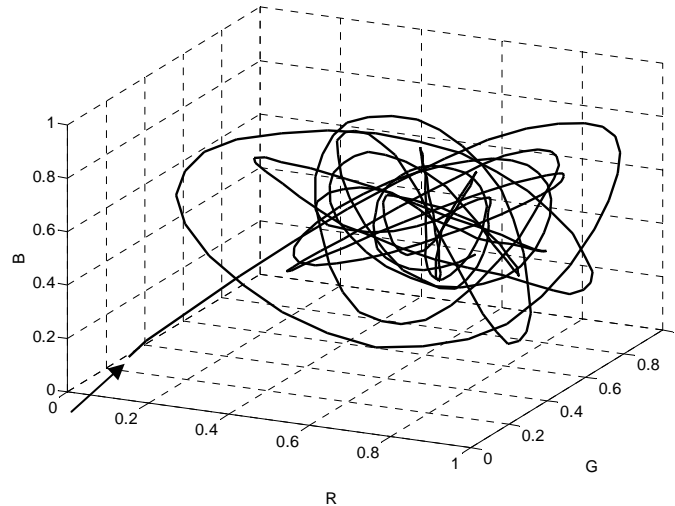


Figura 3: Diagramma dei livelli R, G, B all'aumentare del ritardo

La figura 3 mostra che due aspetti del problema:

- il massimo ordine rilevabile N_{max} ,
- la presenza di colori simili,

sono legati, nel senso che all'aumentare di N_{max} aumenta la possibilità che si abbiano colori simili tra loro. Bisogna pertanto utilizzare opportune strategie per eliminare le possibili ambiguità; il metodo più utilizzato per eliminare le ambiguità è quello che si basa sulla *condizione di continuità del ritardo*. Altro metodo utilizzabile, anche in unione con il precedente, è quello basato sull'impiego di una parte della tabella di taratura cioè di quella corrispondente al campo dei ritardi presenti nel modello in esame.

In generale il ritardo cercato è quello per il quale è minima una certa funzione errore del tipo:

$$e = f(R_i, G_i, B_i; R_m, G_m, B_m), \quad (6)$$

dove:

R_i, G_i, B_i sono i segnali registrati nella tabella di taratura,

R_m, G_m, B_m sono i segnali acquisiti nel punto del modello in cui si vuole determinare il ritardo.

La tabella 2 mostra alcune delle funzioni errore che sono state proposte ed utilizzate da vari ricercatori. Sicuramente la funzione più utilizzata è la (4) riscritta come (7) in tabella 2.

Al fine di eliminare le ambiguità dovute alla presenza di colori simili, a valle della procedura basata sulla (7), è stata utilizzata la *condizione di continuità* del ritardo incognito δ con il ritardo nei punti vicini δ_i [9]. A tal fine, applicando la (7), per ogni pixel analizzato oltre al ritardo δ_i relativo all' errore minimo e_1 (il cosiddetto *primo risultato*) si memorizzano ulteriori ritardi δ_i (*i-esimi risultati*) relativi ad errori e_i maggiori di e_1 (i ritardi δ_i per essere significativi devono differire tra loro di almeno mezzo ordine di frangia); successivamente, a partire da un pixel nel quale il ritardo è stato determinato esattamente, si determina il ritardo effettivo per ogni pixel scegliendo, tra i valori δ_i , quello più prossimo al ritardo nel pixel precedente.

Tabella 2: Funzione errore utilizzate per il calcolo del ritardo δ

Funzione errore	Eq.	Bibl.
$e = \sqrt{(R_m - R_i)^2 + (G_m - G_i)^2 + (B_m - B_i)^2}$	(7)	[9,10]
$e = \sqrt{(r_m - r_i)^2 + (g_m - g_i)^2 + (b_m - b_i)^2}$	(8)	[9]
$e = \sqrt{(\Delta R_m - \Delta R_i)^2 + (\Delta G_m - \Delta G_i)^2 + (\Delta B_m - \Delta B_i)^2}$	(9)	[10]
$e = \sqrt{[(\Delta R_m - \Delta G_m) - (\Delta R_i - \Delta G_i)]^2 + (\Delta G_m - \Delta G_i)^2 + (\Delta B_m - \Delta B_i)^2}$	(10)	[10]
$e = \sqrt{(R_m - R_i)^2 + (G_m - G_i)^2 + (B_m - B_i)^2 + \beta \sum_s (\delta_i - \delta_s)^2 m_s}$	(11)	[11]
$e = \sqrt{W_R (\delta_{wR/m}^a - \delta_{wR/i}^a)^2 + W_G (\delta_{wG/m}^a - \delta_{wG/i}^a)^2 + W_B (\delta_{wB/m}^a - \delta_{wB/i}^a)^2}$	(12)	[16,17]
$e = \sqrt{(R_m - R_i)^2 + (G_m - G_i)^2 + (B_m - B_i)^2 + (\delta_i - \delta_s)^2 K^2}$	(13)	[19]
$e = \sqrt{(H_m - H_i)^2 + [R_m - G_m - R_i - G_i]^2 + [G_m - B_m - G_i - B_i]^2 + [B_m - R_m - B_i - R_i]^2}$	(14)	[20]

Un'altra funzione errore utilizzata è la (8) che utilizza i seguenti valori normalizzati (*coordinate cromatiche*):

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}, \quad (15), (16), (17)$$

con:

$$r+g+b=1. \quad (18)$$

L'uso della (8) è stato proposto per ridurre l'influenza delle variazioni di intensità luminosa dalla taratura alla misura [9]. Più in generale l'uso delle coordinate cromatiche è utile quando variano i *parametri geometrici* quali la distanza tra modello e sorgente, l'apertura del diaframma della telecamera e l'intensità luminosa [11]. Per contro si hanno disturbi per ordini inferiori a 0.5 [9] e si perde un'informazione sperimentale [vedi Eq. (18)].

L'uso dell'equazione (9) richiede l'acquisizione delle isocromatiche a campo chiaro e a campo scuro che forniscono rispettivamente R' , G' , B' e R , G , B da cui si ricavano i seguenti valori da introdurre nella (9):

$$\Delta R = R' - R, \quad \Delta G = G' - G, \quad \Delta B = B' - B. \quad (19), (20), (21)$$

L'uso della (9) e dell'analoga (10) contribuisce, secondo i proponenti [10], a diminuire il rumore e quindi l'ambiguità nella determinazione dell'ordine di frangia.

Le funzioni errore (11) e (13) incorporano la condizione di continuità del ritardo incognito.

Tali relazioni consentono di eliminare le ambiguità dovute alla somiglianza dei colori. Il primo termine delle (11), (13), corrispondente alla (7) della procedura di ricerca classica, tiene conto della somiglianza dei colori e può essere definito *termine di fedeltà (fidelity term)*. Il secondo termine $\beta \sum_s (\delta_i - \delta_s)^2 m_s$ o $(\delta_i - \delta_s)^2 K^2$ tiene conto della condizione di continuità del ritardo e può essere definito *termine di regolarizzazione o termine di continuità (regularization term)*. Una procedura, da associare alla condizione (11) per ridurre gli errori nella ricerca del ritardo, utilizza solo una parte della tabella di taratura [11].

La funzione di ricerca del ritardo (12) opera, invece che sui livelli R, G, B , sui ritardi apparenti $\delta_{wR}^a, \delta_{wG}^a, \delta_{wB}^a$ ($w = wrapped$) determinati con un metodo a variazione di fase; si tratta di una forma di normalizzazione che consente agli autori di stimare ordini fino a 5.5 [16]. Ponendo i pesi W_R, W_G, W_B uguali a 1 [17] la (12) diventa analoga alla (7) dove al posto dei livelli R, G, B compaiono i ritardi. In questo caso, però, la fotoelasticità RGB , basandosi sul metodo a variazione di fase, richiede (tabella 1, rigo 4) almeno 4 acquisizioni. Infine la relazione (14) opera sulla differenza dei livelli ed introduce come ulteriore parametro la *tinta H (hue)*.

6. Esperienze

Le esperienze sono state condotte con un polariscopio circolare avente lastre quarto d'onda corrette per la lunghezza d'onda di riferimento $\lambda_0=589$ nm (luce monocromatica gialla) utilizzando:

1. due sorgenti di luce bianca: lampada ad incandescenza con spettro di emissione continuo (figura 1a), lampada a fluorescenza del tipo a basso consumo (Philips tipo Master LP 827) con spettro di emissione discreto (figura 1b);
2. una telecamera RGB avente tre *CCD* indipendenti;
3. modelli fotoelastici in resina epossidica (Araldite B).

L'ingrandimento è stato scelto in modo da non avere gradienti superiori a 0.1 ordini/pixel.

6.1 Taratura - La taratura è stata effettuata utilizzando un provino inflesso (figura 4) con ordine massimo N_{max} uguale a 6 e 12 ordini di frangia rispettivamente per la sorgente a spettro continuo e per quella a spettro discreto.

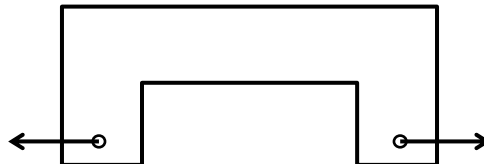


Figura 4: Provino di taratura

6.2 Ricerca del ritardo – Per la determinazione del ritardo si utilizza la funzione errore (7) unitamente alla condizione di continuità precedentemente indicata ed utilizzata in [9]. Tale procedura è equivalente a quelle successivamente proposte in [11,19], basate sulle equazioni (11) e (13) che incorporano la condizione di continuità. La figura 5 mostra l'andamento del ritardo lungo la sezione evidenziata nella figura stessa ottenuto con lampada ad incandescenza (figura 5a) e con lampada a fluorescenza (figura 5b). Nella stessa figura 5 è indicato l'andamento del ritardo ottenuto con metodo indipendente. Si nota

che l'ordine massimo rilevabile con la lampada ad incandescenza è all'incirca 4 mentre con la lampada a fluorescenza sono stati rilevati, in queste esperienze, fino a 12 ordini di frangia.

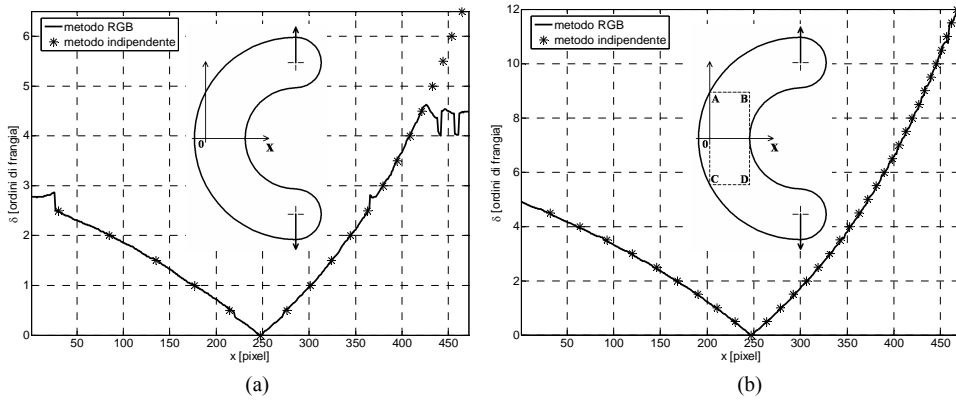


Figura 5: Ritardi lungo la sezione di simmetria ottenuti con lampada ad incandescenza (a) e a fluorescenza (b)

La procedura di ricerca del ritardo basata sull'impiego della sola funzione errore (9) produce risultati errati in alcuni punti a causa della presenza di colori simili, cioè la funzione errore risulta minima (*primi risultati* in figura 6a) in corrispondenza di ritardi diversi da quelli effettivi (figura 6a). Per eliminare tale causa di errore si impone la condizione di continuità del ritardo nel modo precedentemente descritto; a tal fine con riferimento alla figura 6b che si riferisce ad un particolare della figura 6a:

1. si considerano, in aggiunta al minimo assoluto $e_{min}=e_1$, anche i minimi successivi e_2 ed e_3 (*secondi e terzi risultati* in figura 6b);
2. utilizzando quindi, come già detto, la condizione di continuità dei ritardi si assume come ritardo quello che assicura la continuità.

Così, ad esempio, in corrispondenza del pixel A (figura 6b) il ritardo corretto è quello relativo al *secondo risultato* mentre il *primo risultato* risulta di circa 1 ordine di frangia inferiore. Nella zona B, a differenza del caso precedente, non si ha un pixel discontinuo isolato ma una intera fascia dove i ritardi effettivi sono soprattutto relativi ai *secondi risultati* e, in un solo punto, ai *terzi risultati*.

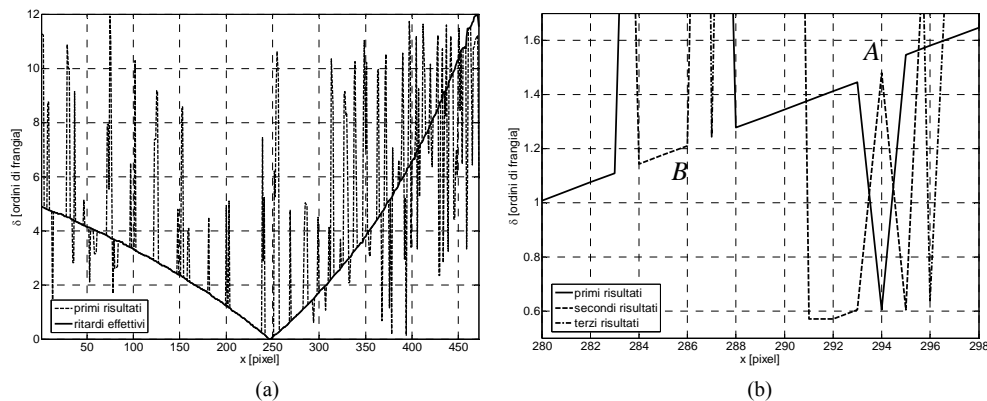


Figura 6: Ricerca del ritardo basata sulla condizione di continuità: (a) andamento discontinuo del ritardo in base al minimo assoluto, $e_{min}=e_1$, della funzione errore (*primi risultati*) ed andamento continuo del ritardo, (b) particolare mostrante i ritardi relativi ai minimi successivi $e_{min}=e_1, e_2$ ed e_3 (*primi, secondi e terzi risultati*)

La figura 7 mostra infine le mappe dei ritardi rappresentati come toni di grigio (il nero corrisponde a $\delta=0$ e il bianco a $\delta=12$) nella zona della figura 5b indicata con il rettangolo *ABCD*. In particolare la figura 7a mostra la mappa del ritardo ottenuta considerando solo i primi risultati; in tale figura le zone di discontinuità del ritardo sono facilmente individuabili a causa della rapida variazione di intensità. La figura 7b mostra invece la mappa del ritardo dopo l'imposizione della condizione di continuità del ritardo.

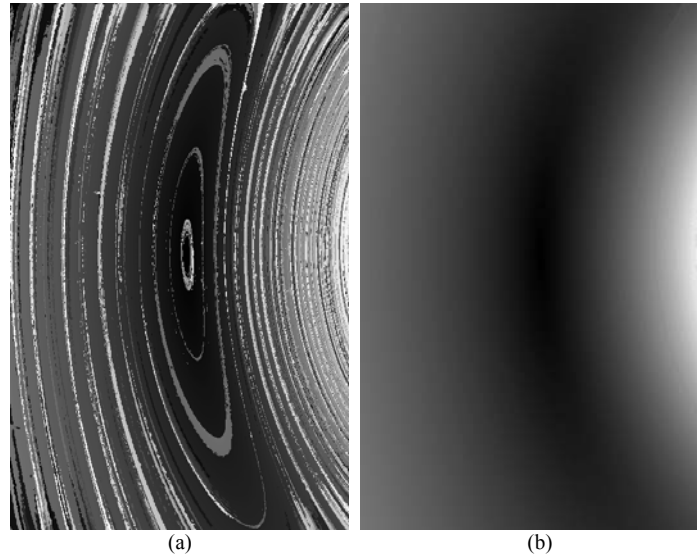


Figura 7: Mappa dei ritardi ottenuti con la lampada a fluorescenza prima (a) e dopo (b) l'imposizione della condizione di continuità

7. Conclusioni

In questa memoria si considerano le caratteristiche della fotoelasticità *RGB* con riferimento al massimo ordine di frangia rilevabile che dipende in generale: dalla modulazione del segnale, dalla sorgente luminosa, dalla presenza di colori simili, dalla procedura di ricerca del ritardo, dal gradiente delle frange e dalle caratteristiche della telecamera: risoluzione del *CCD* e ingrandimento.

Le esperienze sono state condotte considerando due tipi di sorgente di luce bianca: lampada ad incandescenza che presenta uno spettro continuo e lampada a fluorescenza che presenta uno spettro discreto.

La lampada ad incandescenza consente di rilevare, come già messo in evidenza in precedenti memorie, ritardi fino a circa 4 ordini di frangia dato che a causa della distribuzione spettrale della sorgente e del ricevitore (filtri della telecamera) la modulazione dei tre segnali si attenua progressivamente.

La lampada a fluorescenza consente di determinare ordini di frangia ben più elevati (12 in questa memoria) grazie alla natura discreta della sorgente che equivale approssimativamente a tre sorgenti *R*, *G* e *B* a banda stretta. In tal caso la limitazione al massimo ordine deriva principalmente dal gradiente delle frange, dalla presenza di colori simili e dalla procedura di ricerca del ritardo.

Ringraziamenti

La ricerca descritta in questa memoria è stata realizzata nell'ambito di un programma di ricerca finanziato con fondi (ex 60%) dell'Università di Palermo.

Bibliografia

- [1] Ajovalasit A., Barone S., Petrucci G., *A review of automated methods for the collection and analysis of photoelastic data*, Journal of Strain Analysis 1998, 33(29), 75-91.
- [2] Ramesh K., *Digital Photoelasticity*, Springer, Berlin (2000).
- [3] ASTM C 148, *Standard method for Polariscopic Examination of Glass Containers*, Annual Book of ASTM standards.
- [4] ASTM F218, *Standard method for Analyzing Stress in Glass*, Annual Book of ASTM standards.
- [5] ASTM D4093, *Standard method for Photoelastic Measurement of Birefringence and Residual Strain in Transparent or Translucent Plastic materials*, Annual Book of ASTM standards.
- [6] UNI 7220: 1997, *Contenitori di vetro. Rilievo delle tensioni residue*, Norma tecnica UNI (31.03.1997).
- [7] www.sharplesstress.com (2007).
- [8] Voloshin A.S., Redner A.S., *Automated measurement of birefringence: development and experimental evaluation of the techniques*, Experimental Mechanics, 1989, 29(3), 252-257.
- [9] Ajovalasit A., Barone S., Petrucci G., *Toward RGB Photoelasticity - Full Field Photoelasticity in White Light*, Experimental Mechanics, 1995, 35(3), 193-200.
- [10] Ramesh K., Deshmukh S.S., *Three fringe photoelasticity - use of colour image processing hardware to automate ordering of isochromatics*, Strain, 1996, 32(3), 79-86.
- [11] Quiroga J.A., Garcia-Botella A., Gomez-Pedrero J.A., *Improved method for isochromatic demodulation by RGB calibration*, Applied Optics 2002, 41(17), 3461-3468.
- [12] Petrucci G., *Full field evaluation of an isoclinic parameter in white light*, Experimental Mechanics 1997, 37(4), 420-426.
- [13] Ji W., Patterson E.A., *Simulation of errors in automated photoelasticity*, Experimental Mechanics 1998, 38(2), 132-139.
- [14] Ramesh K., Deshmukh S.S., *Automation of white light photoelasticity by phase-shifting technique using colour image processing hardware*, Optics and Lasers in Engineering, 1997, 28(1), 47-60.
- [15] Ajovalasit A., Petrucci G., Scafidi M., *Phase shifting photoelasticity in white light*, Optics and Lasers in Engineering 2007, 45(5), 596-611.
- [16] Jones I.A., Wang P., *Complete fringe order determination in digital photoelasticity using fringe combination matching*, Strain, 2003, vol. 39(3), 121-130.
- [17] Ajovalasit A., Petrucci G., *Developments in RGB photoelasticity*, Proc. of 4th International Conference on Advances in Experimental Mechanics, University of Southampton 6-8 September 2005.
- [18] Yoneyama S., Shimizu M., Takashi M., *Higher retardation analysis in automated white light photoelasticity*, Proceedings of the 11th International Conference on Experimental Mechanics, vol.1, Oxford (UK), 1998, 527-532.
- [19] Madhu K.R., Ramesh K., *Noise removal in three fringe photoelasticity by adaptive colour difference estimation*, Optics and lasers in Engineering 2007, 45(1), 175-182.
- [20] Grewal G.S., Dubey V.N., Claremont D.J., *Isochromatic demodulation by fringe scanning*, Strain 2006, 42(4), 273-281.