

Sviluppo di un sensore interferometrico per il controllo del posizionamento di un rugosimetro ottico

A. Baldi, F. Bertolino, F. Ginesu, A. Scanu

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica – Università di Cagliari
Piazza d'Armi – 09123 Cagliari
e-mail: baldi@iris.unica.it*

Keywords: Interferometer, roughness, optical sensor

Sommario

Nell'ambito della ricerca in corso presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari (DiMeCa) avente come obiettivo lo sviluppo di un rugosimetro ottico in luce incoerente, si è resa necessaria la realizzazione di un sistema di movimentazione del sistema ottico in grado di garantire una precisione sub-micrometrica.

Il presente lavoro descrive lo sviluppo di un sensore di posizione di tipo interferometrico che consente di retroazionare gli attuatori piezometrici già disponibili presso il DiMeCa in modo da garantire la precisione richiesta.

Nel seguito, dopo una breve descrizione del sistema ottico, verranno illustrati la struttura di base del sensore, le sue caratteristiche e la componentistica di supporto (gruppo di condizionamento del segnale e software di analisi). Il lavoro termina con alcuni test sperimentali che mostrano la precisione e l'affidabilità dello strumento.

Abstract

The optical profilometer that is under development at the Mechanical Engineering Department of the University of Cagliari (DiMeCa) requires a translation stage able to displace part of the optical system with sub-micrometric resolution.

This work describes the development of an interferometric displacement sensor which enables, by its feedback, to accurately control an otherwise open loop controlled electrostrictive translation stage.

After a short description of the optical system, the mechanical assembly, the electronic module and the software interface will be described. At the end some experimental result, showing the performances of the sensor will be illustrated.

1. INTRODUZIONE

Presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari è da tempo in corso una ricerca avente come obiettivo lo sviluppo di uno strumento non a contatto in grado di misurare i parametri microgeometrici di superfici di pezzi di interesse meccanico. A tal fine sono state prese in considerazione varie soluzioni, dalla microscopia confocale [1,2], alle tecniche di out of focus [3] per giungere infine alla definizione di un sistema interferometrico in luce bianca [4,5]. La ridotta lunghezza di coerenza (tipicamente 2–4 μm), che normalmente costituisce un ostacolo non piccolo nell'utilizzo di tale tipo di sorgente—è necessario che le lunghezze dei due rami dell'interferometro differiscano di un valore al più pari ad $\frac{1}{2}$ del campo di visibilità delle frange—viene in questo caso sfruttata al fine di ottenere una misura assoluta della geometria dell'oggetto: poiché si osservano frange solo nelle zone in cui le suddette condizioni sono soddisfatte, è possibile realizzare una sorta di mappa topografica dell'oggetto semplicemente variando la lunghezza del ramo di riferimento di una quantità nota.

Al contrario, l'utilizzo di un laser, a causa dell'elevata lunghezza di coerenza tipica di questo tipo di sorgente, non consente la misura di salti di ampiezza maggiore alla metà della lunghezza d'onda λ : in caso contrario, infatti, lo sfasamento risulterebbe noto solo a meno di un multiplo intero della lunghezza d'onda.

Per alleviare questo problema è possibile ricorrere a tecniche MWI (Multiple Wavelength Interferometry) in cui viene utilizzata una lunghezza d'onda "virtuale" frutto del battimento tra due lunghezze d'onda molto prossime: nel caso più semplice, tale tecnica consiste nell'esecuzione di due serie complete di acquisizioni e nella combinazione a posteriori dei 2 campi di fase modulo 2π risultanti. La lunghezza d'onda equivalente, $\lambda_e = \lambda_1\lambda_2/|\lambda_1-\lambda_2|$ dove con λ_1 e λ_2 si sono indicate le due lunghezze d'onda a cui si è effettuata la misura, può risultare anche molto grande, consentendo in teoria la misura di salti di dimensioni di interesse ingegneristico; per contro occorre osservare che a fianco dell'aumento della lunghezza d'onda si ha un

proporzionale aumento del rumore presente nei dati per cui la tecnica è efficace solo nel caso di superfici abbastanza lisce (ossia caratterizzate dall'alternanza di salti netti e zone relativamente piatte).

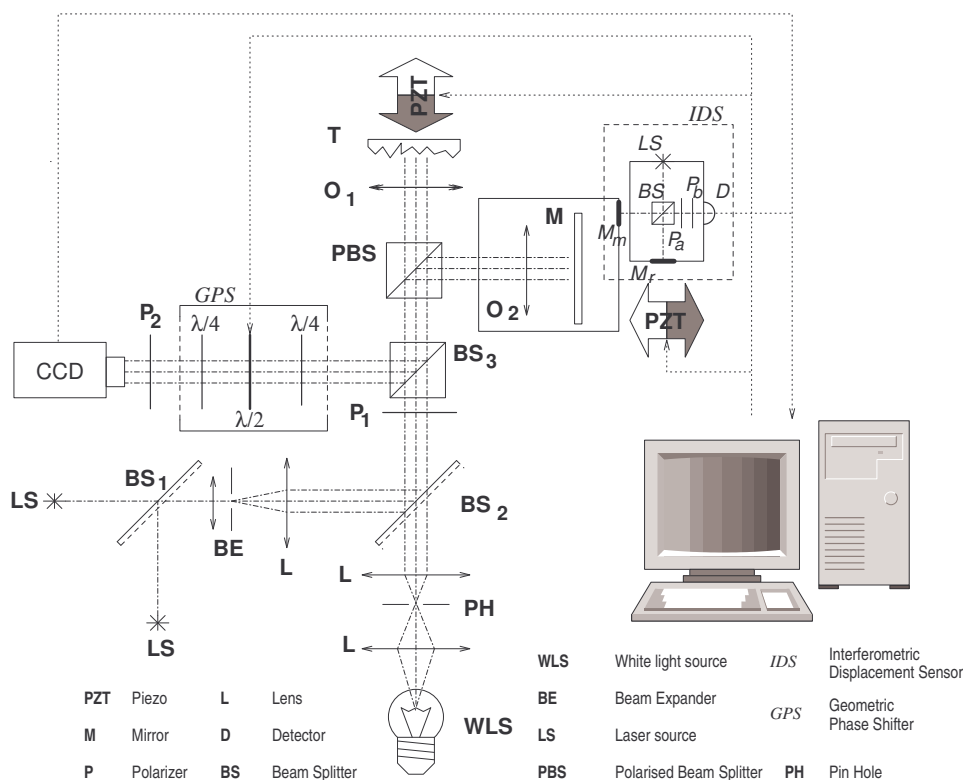


Fig. 1. Setup dello strumento

Lo schema di massima del set-up ottico utilizzato nello strumento in corso di sviluppo presso il DiMeCa è illustrato in fig. 1: il fascio proveniente dalla lampada WLS viene collimato tramite un sistema di lenti ed un filtro spaziale per poi giungere, dopo il passaggio attraverso il Beam Splitter variabile BS₂, il polarizzatore P₁ ed il Beam Splitter cubico BS₃ al Beam Splitter Polarizzato PBS. Questi divide il fascio in ingresso in due parti inviandolo, polarizzato su due piani ortogonali, agli obiettivi O₁ ed O₂ e quindi allo specchio di riferimento M ed al provino T.

I fasci riflessi provenienti da provino e specchio mantengono la loro polarizzazione per cui entrambi giungono inalterati al Beam Splitter BS₃ che, essendo del tipo non polarizzato, li invia al Phase Shifter Geometrico (GPS) costituito da un treno di lamine quarto d'onda, mezz'onda e quarto d'onda [cit Hariaran], per poi giungere, tramite il polarizzatore P₂ alla telecamera.

Sempre in fig. 1 sono illustrati schematicamente il sistema di micro movimentazione di specchio e provino (i due attuatori piezoelettrici PZT), il sistema di misura degli spostamenti dello specchio IDS e due ulteriori sorgenti, questa volta di tipo laser, che consentono l'utilizzo di tecniche MWI a fianco di quelle in luce bianca. Sono invece stati omessi per ragioni di semplicità i sistemi di macro movimentazione del provino e dello specchio in quanto di minore importanza per quel che riguarda il presente lavoro.

Lo schema utilizzato è estremamente versatile e consente l'utilizzo di varie tecniche di misura: escludendo il ramo di riferimento è infatti possibile eseguire misure con la tecnica Out of Focus (si noti la presenza di un attuatore PZT che, movimentando il provino, consente di cambiare la distanza dall'obiettivo O₁); nella stessa configurazione, sostituendo la telecamera con un fotomoltiplicatore ed inserendo un Pin Hole è possibile trasformare lo strumento in un microscopio confocale; infine, utilizzando entrambi i rami si ha a disposizione un interferometro di Twyman-Green con sorgente in luce coerente od incoerente.

Concentrandosi su quest'ultima configurazione, la tecnica di misura sfrutta il fatto che il contrasto delle frange (se presenti) è massimo quando i percorsi ottici nei due rami sono esattamente uguali (fig. 2). Variando di quantità note la lunghezza di uno dei rami è quindi possibile individuare il luogo dei punti che soddisfano questa condizione ed in definitiva, eseguendo una scansione completa, ricostruire la micro geometria dell'oggetto.

Per poter applicare la tecnica è quindi necessario

- un metodo che consenta di valutare la modulazione delle frange interferometriche senza spostamenti del provino;
- la capacità di eseguire delle microtraslazioni di quantità non necessariamente uguali, ma note, dello specchio di riferimento (si noti come, per poter mantenere invariata la messa a fuoco dell'obiettivo O₂ e

nel contempo variare la lunghezza del ramo di riferimento, vengano in realtà movimentati entrambi come un unico blocco).

L'utilizzo del *GPS* consente di risolvere il primo problema: se si considerano infatti i due fasci in ingresso allo sfasatore geometrico, la prima lamina $\lambda/4$ mette i due fasci in polarizzazione circolare (opposta, visto che i fasci entranti giacciono su piani ortogonali), la lamina $\lambda/2$ sfasa di $+2\vartheta$ un fascio e di -2ϑ l'altro (essendo ϑ l'angolo dell'asse veloce della lamina rispetto all'orizzontale), infine la lamina $\lambda/4$ in uscita ripristina la polarizzazione piana [cit Roy, cit calcolo Jones]. In definitiva lo sfasamento introdotto risulta pari a 4ϑ e può essere variato semplicemente regolando l'orientamento della lamina mezz'onda.

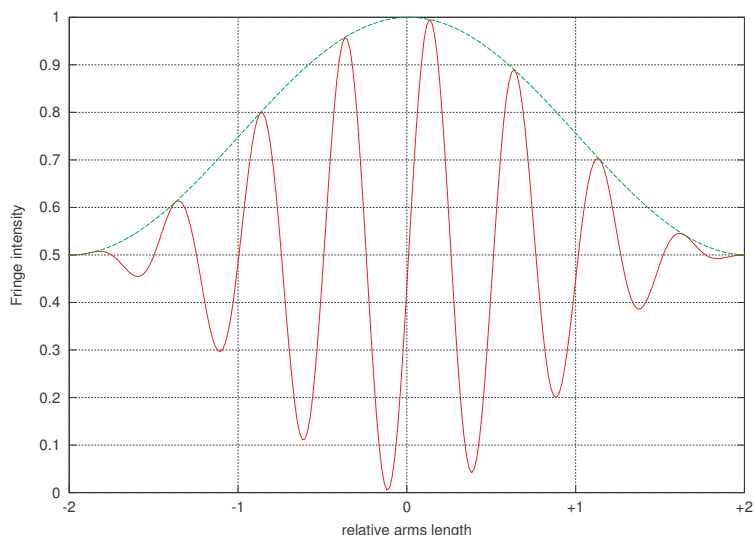


Fig. 2. Variazione della modulazione al variare della lunghezza relativa dei due rami

Per quel che riguarda la movimentazione dello specchio di riferimento, questa non è di per se difficoltosa—esistono da tempo sul mercato sistemi di micro movimentazione sia di tipo piezoelettrico, che elettrotrittivo, che semplicemente meccanici a vite differenziale—ma è richiesta una conoscenza accurata dell'entità dei singoli passi in quanto la precisione della misura è direttamente legata alla conoscenza della posizione relativa del piano di riferimento. Per ovviare a questo problema si è deciso di realizzare un sensore, indicato in fig. 1 con la sigla *IDS* (Interferometric Displacement Sensor), in grado di misurare gli spostamenti imposti dall'attuatore PZT con precisione nanometrica.

2. SENSORE INTERFEROMETRICO DI SPOSTAMENTO

Nelle figure 1 e 3 vengono presentati lo schema ottico del sensore, un esploso delle varie componenti ed un'immagine dello strumento inserito all'interno del set-up. Lo schema ottico dello strumento ricalca in piccolo la configurazione di cui fa parte: si tratta infatti di un interferometro di Michelson in cui il fascio generato dalla sorgente laser *LS*, viene diviso da un Beam Splitter a lamina *BS* ed inviato allo specchio di riferimento M_r ed a quello di misura solidale con la parte mobile M_m .

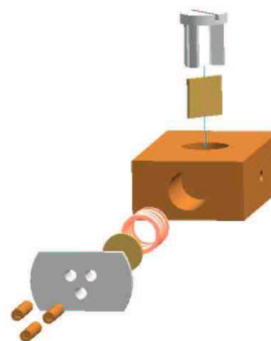
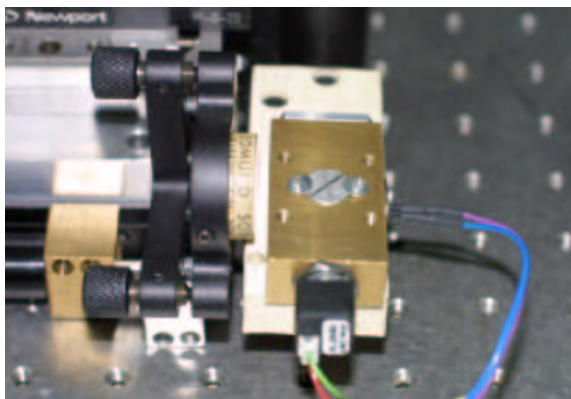


Fig. 3. Immagine e assemblato del sensore interferometrico. La distanza tra due fori filettati del banco è pari a 2.5 cm.

I due fasci riflessi vengono ricombinati dal Beam Splitter e diretti al fotodiode D il cui segnale, opportunamente condizionato, è inviato al sistema di controllo. Per consentire l'allineamento dei fasci lo strumento è stato dotato di un sistema di regolazione dell'angolo di incidenza dello specchio di riferimento rispetto al fascio (fig. 3b), costituito da tre grani che agiscono sul retro dello specchio e da una molla di contrasto. La posizione angolare del Beam Splitter è anch'essa regolabile mentre per lo specchio solidale con la parte mobile si è utilizzato un normale sistema commerciale.

Il sistema di illuminazione è costituito da un diodo laser di lunghezza d'onda nominale di 635_{-10}^{+15} nm, alloggiato all'interno di un contenitore di 10x10x10 mm, che è connesso allo strumento tramite un attacco filettato. Il sensore è un fotodiode Centronics BPW21, sensibile nel visibile e nel vicino infrarosso, tenuto in posizione tramite una coppia di viti.

Il principio di funzionamento del sensore è semplice: al variare della lunghezza del ramo di misura dell'interferometro si ha interferenza costruttiva o distruttiva tra i due fasci a seconda dello sfasamento relativo e quindi una variazione sinusoidale di intensità luminosa rilevata dal fotodiode. Considerando che ad uno spostamento x corrisponde uno sfasamento $2x/\lambda$ (il fascio attraversa il ramo due volte) e che l'intero intervallo di campionamento del segnale analogico corrisponde alla metà di un periodo, la risoluzione teorica dello strumento risulta, nell'ipotesi di utilizzo di un normale convertitore analogico/digitale a 12 bit, pari a $635/4 \cdot 1/2^{12} = 38.75 \pm 19.36$ pm.

A fianco di una risoluzione così elevata, a patto di controllare continuamente il segnale acquisito, il campo di misura risulta illimitato: infatti nel caso di spostamenti maggiori della lunghezza d'onda è sufficiente sommare al numero di periodi rilevato, lo sfasamento relativo:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{n}{2} \pm \frac{\varphi_f - \varphi_i}{2\pi} \right) \quad (1)$$

dove n è il numero di semiperiodi, φ_f e φ_i sono la fase finale ed iniziale ed il segno all'interno della parentesi cambia a seconda del verso del moto.

Per contro lo strumento è affetto da due problemi: da un lato non consente di individuare il segno di una variazione di lunghezza sulla base del solo segnale acquisito, dall'altro, per gli stessi motivi discussi nel paragrafo precedente, non è in grado di fornire misure assolute di distanza, rilevando esclusivamente spostamenti relativi.

Da un punto di vista pratico il primo problema, che apparentemente sembrerebbe il più grave, è invece facilmente risolvibile: poiché lo strumento è stato realizzato al solo scopo di retro azionare gli attuatori piezoelettrici che controllano la posizione dello specchio di riferimento, è ad ogni istante noto il segno del segnale di controllo ed è quindi possibile comprendere il verso della variazione di posizione rilevata.

Costituisce invece un problema l'impossibilità di ottenere una misura assoluta: se, infatti, lo spostamento percorso può essere stimato sulla base del numero di periodi accumulati, un'imprecisione nel conteggio introduce un errore, pari a $\lambda/4$, che non può essere successivamente rilevato e che perturba il valore finale; è quindi necessario monitorare il segnale durante il moto al fine di conteggiare correttamente il numero di semiperiodi attraversati.

2.1 Taratura della sorgente

I dati di targa del diodo laser utilizzato indicano un campo di frequenze di emissione molto vasto, per di più non simmetrico. Poiché la precisione della misura risulta direttamente influenzata da questo errore sistematico, si è effettuata una taratura preliminare al fine di determinare la lunghezza d'onda di emissione del diodo laser.

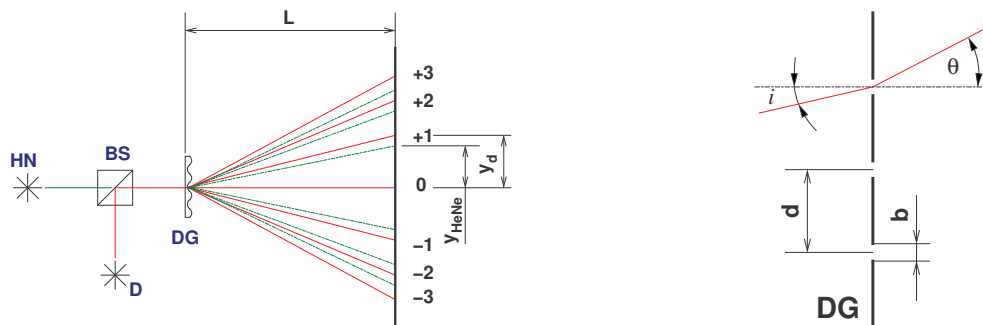


Fig. 4. set-up utilizzato e schema di calcolo

Per effettuare la misura si è fatto uso di un reticolo di diffrazione e di un laser Helio/Neon di lunghezza d'onda nota. Il set-up utilizzato è illustrato in fig. 4: i fasci provenienti dal diodo laser D e dal laser di

riferimento HN vengono inviati al Beam Splitter BS e da questi al reticolo di rifrazione DG. Il fascio incidente viene da questo diffratto e scomposto nei vari ordini, che vanno ad illuminare il piano di misura posto ad una distanza L pari a circa 1.9 m. Sia d il passo del reticolo e b lo spessore delle fessure, l'intensità luminosa in uscita sarà:

$$I(\vartheta) = A_0^2 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \frac{\sin^2(N\gamma)}{\sin^2 \gamma} \quad (2)$$

con

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} b \sin \vartheta \quad \text{e} \quad \gamma = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \vartheta.$$

I massimi della (2) possono essere facilmente trovati osservando che

$$\lim_{\gamma \rightarrow m\pi} \frac{\sin(N\gamma)}{\sin \gamma} = \lim_{\gamma \rightarrow m\pi} \frac{N \cos(N\gamma)}{\cos \gamma} = \pm N$$

per cui si ha un massimo di intensità per $\gamma = m\pi$ ossia $d \sin \vartheta = m\lambda$ con m intero positivo. Con procedimento analogo è possibile ricavare l'equazione del reticolo anche nel caso di angolo di incidenza i non nullo:

$$d(\sin i + \sin \vartheta) = m\lambda. \quad (3)$$

Sostituendo nella (3) la lunghezza d'onda del laser di riferimento λ_{HeNe} e quella incognita λ_d ed uguagliando i due risultati è possibile esplicitare d e quindi ricavare, nota la distanza tra i vari ordini e l'ordine 0, la lunghezza d'onda λ_d :

$$\lambda_d = \lambda_{\text{HeNe}} \frac{\sin\left(\arctan \frac{y_{\text{HeNe}}}{L}\right)}{\sin\left(\arctan \frac{y_d}{L}\right)} \quad (4)$$

dove y_{HeNe} e y_d sono le distanze, rilevate sperimentalmente, dei vari ordini dall'ordine 0.

A parità di parametri geometrici e di reticolo, la distanza tra i vari ordini di diffrazione (nel nostro caso gli ordini 10–13) risulta quindi funzione della sola lunghezza d'onda del fascio incidente: quella del laser He-Ne utilizzato è altamente stabile e pari a 594.2 nm; per il diodo laser sono state eseguite una serie di misurazioni a freddo, dopo circa 1/2 h dall'accensione e dopo 2 h dall'accensione. La lunghezza d'onda media misurata è risultata pari a 638.56 ± 1.06 nm con variazioni insignificanti nel tempo; il campo di errore indicato è essenzialmente dovuto all'imprecisione nella misura delle distanze L ed y .

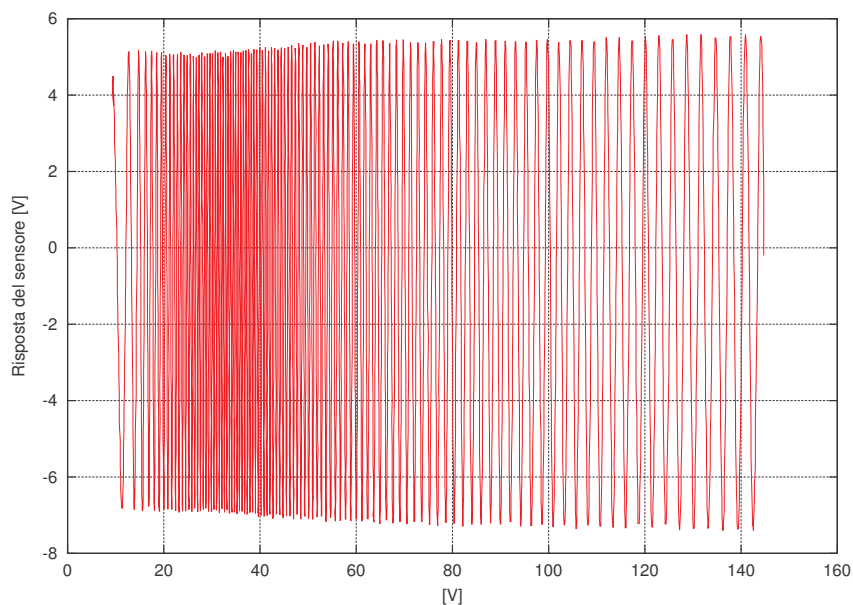


Fig. 5. Segnale acquisito dal sensore durante il moto di un attuttore elettrostrittivo. Si noti come, a fronte di una tensione di controllo (in ascisse) crescente con velocità costante, si osserva una variazione di frequenza nel segnale letto a causa della non linearità di risposta dell'attuttore.

2.2 Campo di misura

Come si è visto, la misura viene effettuata secondo la eq. 1 per cui il campo di lavoro dello strumento è teoricamente infinito. Questo è vero sin tanto che l'ipotesi alla base della eq. 1, ossia che il fascio di luce laser sia coerente, è verificata. In effetti tutti i laser hanno una lunghezza caratteristica, la lunghezza di coerenza, oltre la quale il fascio non può più essere considerato coerente, per cui, se i due rami dell'interferometro differiscono di più della metà di tale valore, non si ha interferenza e lo strumento cessa di funzionare. Nel caso particolare tale grandezza è stata misurata in circa 6 ± 0.5 mm per cui il campo effettivo di misura è limitato a circa 3 mm. Questo valore non è un problema di per se, ma pone una limitazione sul posizionamento relativo del corpo del sensore rispetto alla slitta mobile (la lunghezza del braccio di riferimento è prefissata).

Un limite ulteriore al campo di misura deriva dalla stabilità delle ottiche: se si osserva la fig. 5, corrispondente al segnale acquisito durante una corsa in salita di un attuatore elettrostrittivo; è evidente, a fianco alla variazione di frequenza dettata dalla risposta non lineare degli attuatori stessi, anche una variazione di ampiezza. Questa è attribuibile ai disallineamenti, con conseguente cambiamento del sistema di frange, causati dalle micro rotazioni inevitabili quando si percorrono “lunghe” corse: il campo di misura effettivamente utilizzabile (in una singola misura: se il moto si interrompe, le ottiche possono essere riallineate) risulta quindi limitato a poche centinaia di μm .

2.3 Condizionamento del segnale

Il sistema ottico descritto nei paragrafi precedenti genera un insieme di frange parallele che “traslano” in direzione ortogonale a loro stesse al variare della distanza. Esse vengono acquisite tramite un fotodiodo con un'area attiva di 5 mm^2 per cui la corrente generata, proporzionale all'integrale sull'area dell'intensità luminosa, ha un andamento sinusoidale.

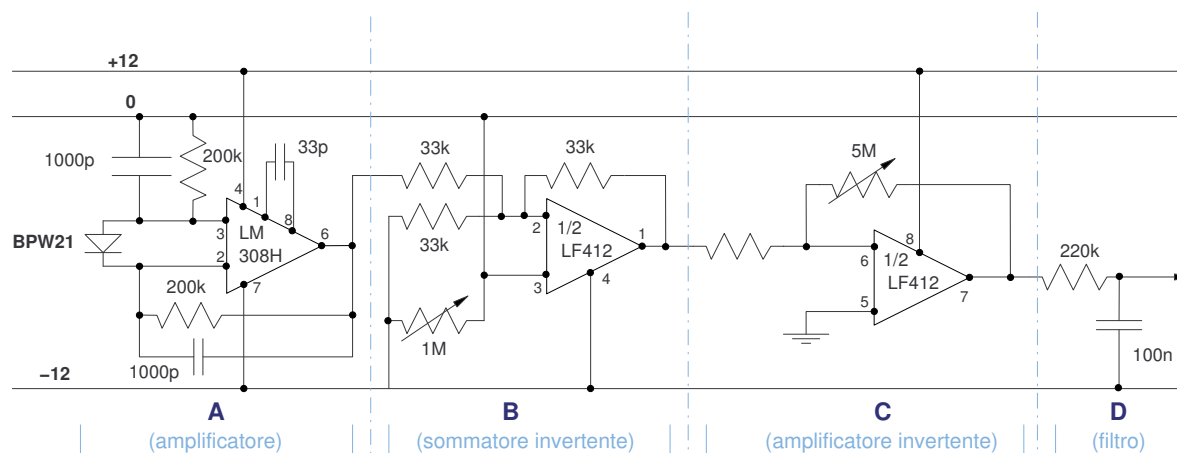


Fig. 6. Schema del condizionatore del segnale.

In figura 6 è riportato parte del circuito di condizionamento del segnale utilizzato (si è ommesso il gruppo alimentatore/raddrizzatore). Esso è composta da 4 stadi in cascata: il primo (A) è destinato all'amplificazione del segnale generato dal fotodiodo; nel secondo (B), al segnale in ingresso viene sommata una tensione (negativa) in modo da poter traslare il campo di misura; infine nei blocchi (C) e (D) si ha un ulteriore stadio di amplificazione ed un filtro passa basso di uscita.

Per quel che riguarda il blocco (A), si tratta di uno schema classico estratto dal data sheet del costruttore; rispetto a quanto suggerito, si è però fortemente ridotto il guadagno vista la quantità di energia incidente, peraltro più che dimezzata per via ottica tramite l'inserimento di una coppia di polarizzatori (P_a e P_b) di fronte al sensore (fig. 1).

L'utilizzo di un doppio stadio di amplificazione è richiesto non tanto dal guadagno del sistema di amplificazione, pari a circa 100, quanto dal fatto che, per gli errori di allineamento del sistema il segnale minimo non è mai nullo (ossia l'intensità luminosa non si annulla mai) per cui una amplificazione diretta di un intervallo tutto positivo implicherebbe una corrispondente amplificazione del valor medio; in definitiva il segnale amplificato risulterebbe esterno al campo di lavoro della scheda di acquisizione analogico/digitale e quindi inutilizzabile; l'inserimento dello stadio sommatore permette invece una traslazione del segnale generato e quindi consente di poterlo amplificare adeguatamente senza incorrere in questi problemi.

2.4 Software di acquisizione

Il segnale analogico condizionato come illustrato nel paragrafo precedente viene acquisito da una scheda di conversione analogico/digitale ed in infine analizzato tramite un programma scritto con il software LabView™. Come accennato nei paragrafi precedenti, quattro sono i casi che devono essere presi in considerazione: x crescente, ramo crescente della sinusoide; x crescente, ramo decrescente; x decrescente ramo crescente ed infine x decrescente e ramo decrescente (fig. 7). A seconda che ci si trovi in un ramo crescente o decrescente della sinusoide, infatti, diversa è la posizione dell'origine e quindi diversa è la formula che si deve utilizzare nel calcolo della fase; quest'ultima deve essere poi sommata o sottratta al valore corrente a seconda che ci si muova nel verso delle x crescenti o decrescenti (si noti che, come evidente dalla eq. 1, si deve anche stimare in modo corretto la fase iniziale, ossia è necessario sapere se ci si trova su di un ramo crescente o decrescente).

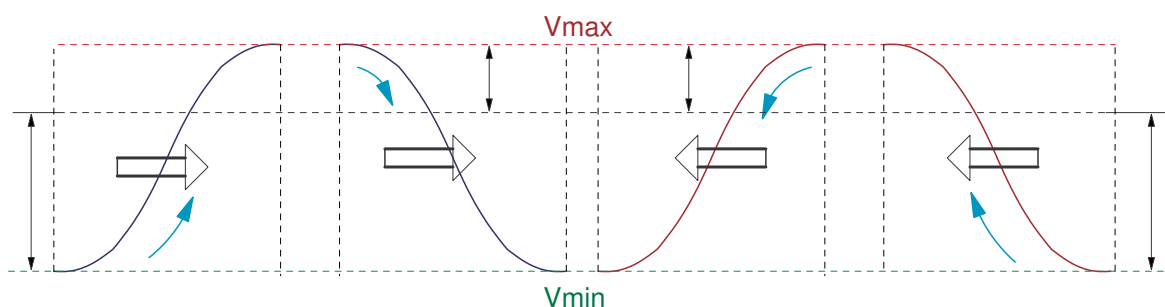


Fig. 7. I diversi casi da considerare durante l'analisi.

Cruciale per il sistema di acquisizione è quindi l'individuazione dei massimi e dei minimi del segnale perché in corrispondenza di essi si deve commutare la modalità di acquisizione, nel contempo accumulando il numero di semi-periodi intercorsi dall'inizio del moto: ad esempio nel caso ci si trovi su di un ramo crescente, infatti, ad una diminuzione del segnale corrisponderà una diminuzione della fase, se si è lontani da un massimo; la commutazione della modalità di trattamento dei dati ed un aumento della fase se si è prossimi ad esso.

Poiché, come si è visto, il valore dei massimi e dei minimi varia dinamicamente a causa delle micro rotazione delle ottiche del sistema, non è possibile utilizzare due soglie prefissate: si è risolto il problema aggiornando i massimi ed i minimi nell'ipotesi che questi varino in modo continuo: un'inversione del verso del segnale viene accettato come massimo (minimo) solo se differisce in valore assoluto meno di una quantità prefissata dal valore dell'inversione nel periodo precedente ($< 5\%$) e se è confermata dall'andamento successivo del segnale (ossia non si tratta di un semplice disturbo); in caso contrario viene trattata come una semplice inversione di segno.

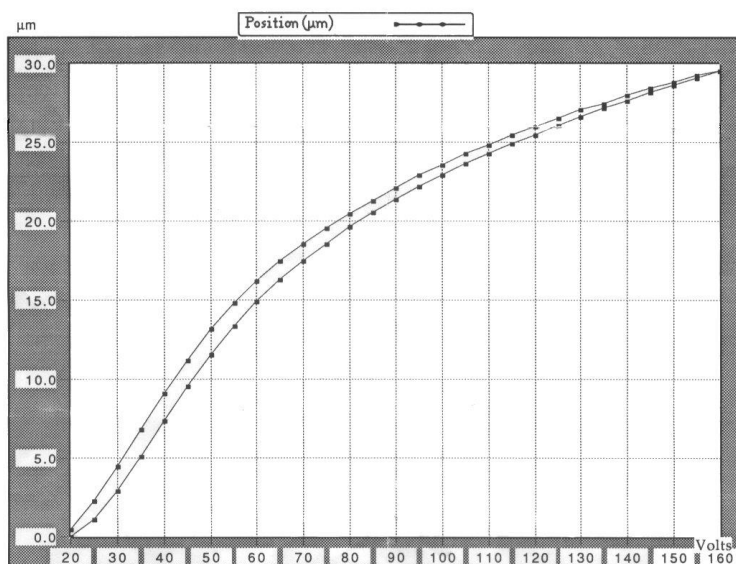


Fig. 8. Curva di taratura di un attuatore elettrostrittivo

3. RISULTATI SPERIMENTALI

Per verificare la funzionalità del sensore si sono caratterizzati due micro attuatori elettrostrittivi disponibili presso il DiMeCa. In figura 8 è riportata la curva di taratura fornita dal costruttore mentre in figura 9 si sono

riportati i valori misurati utilizzando il sensore descritto in questo lavoro (si noti che malgrado l'apparente continuità, si tratta di una serie di punti campionati ad intervalli regolari di tempo).

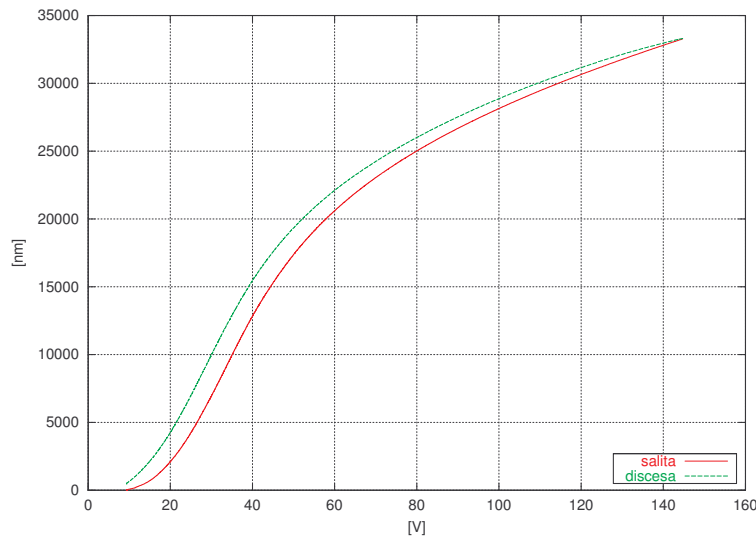


Fig. 9. Curva di taratura misurata con l'IDS

La curva di salita è stata ottenuta imponendo una tensione crescente con velocità costante all'attuatore; successivamente si è ricavata la curva di discesa invertendo la legge di alimentazione; si noti come ad un incremento costante della tensione di eccitazione corrisponda una risposta fortemente non lineare (riscontrabile anche nella variazione di frequenza del segnale di uscita del sensore di fig. 5) e come il sensore presenti una certa isteresi nella risposta.

4. CONCLUSIONI

Il sensore sviluppato si è dimostrato estremamente sensibile ed in grado di garantire la misura accurata dei micro spostamenti dello specchio di riferimento: l'errore massimo su di una corsa di $10\ \mu\text{m}$ può essere stimato in circa $63\ \text{nm}$ ed è legato essenzialmente alle incertezze nella misura della lunghezza d'onda del diodo laser. Per contro l'interpretazione del segnale acquisito richiede la conoscenza a priori del verso del moto; inoltre l'ottenimento di una buona dinamica del segnale è vincolato al corretto allineamento delle ottiche—più alto è il numero di frange, minore è la dinamica—per cui sono necessarie frequenti operazioni di ricalibrazione con conseguente ridefinizione dei parametri di guadagno e di offset del gruppo di condizionamento del segnale.

Per risolvere, o quanto meno ridurre parte di questi problemi è attualmente allo studio una nuova versione del sensore che, generando due segnali in quadratura, permetterà di svincolare la lettura dalla conoscenza a priori del verso del moto semplificando quindi considerevolmente il software di analisi e rendendolo più affidabile.

Bibliografia

- [1] B. R. Masters, "Selected Papers on Confocal Microscopy", *SPIE Milestone Series MS 131*, SPIE Optical engineering Press, Bellingham, Washington, 1996.
- [2] A. Baldi, F. Ginesu, M. Lera, C. J. R. Sheppard, "An application of surface roughness with CLSM: an algorithm to enhance the depth discrimination properties", in *Focus on Microscopy Technical Digest*, Shirahama, 68, 2000.
- [3] P. K. P. Horn, *Robot Vision*, McGraw-Hill, 1986.
- [4] A. Baldi, F. Bertolino, F. Ginesu, M. Lera, "An Application of White Light Profilometry Using Geometric Phase Shifting", in *Interferometry in Speckle Light, Theory and Applications*, Pierre Jacquot and Jean-Marc Fournier eds, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 453–460, 2000
- [5] A. Baldi, F. Ginesu, F. Bertolino, M. Lera, "Analisi della rugosità di superfici con microscopia a scansione laser confocale: un'applicazione su alcuni componenti", negli AIAS 2000. *Atti del XXIX Convegno Nazionale Associazione Italiana per l'Analisi delle sollecitazioni, Lucca, 6–9 settembre 2000*, a cura di G. Nerli et al., Firenze, 1131–1138, 2000
- [6] R. Maytrejee, P. Haiharan "White-light geometric phase interferometer for surface profiling" in *Interferometry VII: Techniques and Analysis*, M. Kajawńska, R. J. Pryputniewica and M. Takeda eds, SPIE Vol 2544, 64–70, 1995