

Tecniche di topografia superficiale

Le tecniche ottiche garantiscono elevate prestazioni e misure non invasive; la maggior parte utilizza metodi interferometrici ma vi sono anche strumenti in grado di operare in condizioni di campo vicino

Le tecniche di topografia di superficie trovano oggi sempre più impieghi nel settore industriale, per scopi diversi, che vanno dalla modifica delle proprietà chimico-fisiche dei materiali, al controllo di qualità dei processi di produzione, fino ai tentativi di reverse engineering; in alcuni casi vi sono anche esempi d'impiego in ambito medico.

Molte delle tecniche sono di tipo ottico e hanno in generale il vantaggio di non richiedere il contatto diretto della sonda con la superficie, evitando così di poterne modificare la struttura (soprattutto su scala nanometrica). I sensori ottici, inoltre, hanno un range dinamico più ampio e un minore livello di rumore, oltre a una prontezza maggiore, rispetto ad analoghi strumenti di tipo elettronico o meccanico. Molti si basano sulla scansione puntuale della superficie illuminata, misurando la distanza di ogni punto da un riferimento, così da ricostruire con elevata precisione il profilo dell'oggetto. Vi sono però pure strumenti di tipo a scansione di area, che richiedono un numero inferiore di misure e offrono una risposta più veloce; sono tipicamente usati in processi di controllo di produzione automatizzata.

In genere, le tecniche di scansione ottica forniscono risoluzione e accuratezze elevate nella misura del profilo verticale (corrispondente alla profondità dell'oggetto), mentre le prestazioni nelle due altre direzioni longitudinali, nel caso particolare degli strumenti puntuali, dipendono spesso dalla capacità di riposizionamento meccanica dello scanner.

Pro e contro delle diverse tecniche

Una delle più comuni tecniche di tipo ottico si basa sull'utilizzo di sensori confocali. Il sistema consiste di una sorgente di luce focalizzata, per esempio un laser, che illumina l'oggetto

attraverso un beam splitter. La luce riflessa viene rilevata da un foto-rivelatore. La posizione del punto illuminato viene quindi stimata aggiustando la posizione della sorgente, in

modo tale da mettere a fuoco l'immagine del punto illuminato. Lo svantaggio principale di tale metodo è la necessità di scansione 3D dell'oggetto e la relativa capacità di movimentazione verticale della sorgente, da cui dipendono del resto intrinsecamente la risoluzione e l'accuratezza della misura. Un'interessante variante di questo metodo si ha adottando una sorgente di luce alogena. In questo caso si può sfruttare l'aberrazione cromatica propria dell'oggetto; a causa di questa, lasciando fisso il fuoco del sistema, la luce riflessa catturata dal foto-rivelatore sarà colorata e il colore dipenderà direttamente dalla distanza del punto illuminato. Si evita pertanto di dover scandire verticalmente l'oggetto.

Un sistema di topografia confocale cromatica ha tipicamente una distanza di lavoro di 6,5 mm, una risoluzione nella misura della distanza di 20 nm su un intervallo massimo di misura di 0,9 mm e una in direzione laterale di 2 μm . È inoltre interessante osservare che, nel caso di oggetti trasparenti, si vedranno sul foto-rivelatore due diversi colori, corrispondenti alla radiazione riflessa dalle due superfici dell'oggetto stesso. Rilevando entrambe le lunghezze d'onda è possibile misurare indirettamente lo spessore del bersaglio illuminato. La tecnologia di imaging confocale cromatica è stata inventata nel 1995 dal Stil (Sciences et Techniques Industrielles de la Lumière) che ne detiene anche il brevetto; Micromesure è il sistema di misura dell'azienda francese che adotta tale tecnologia e dedicato alla microtopografia 3D. Un sistema diverso è quello dell'olografia conoscopica. In questo caso il bersaglio viene illuminato con luce polarizzata monocromatica; il raggio

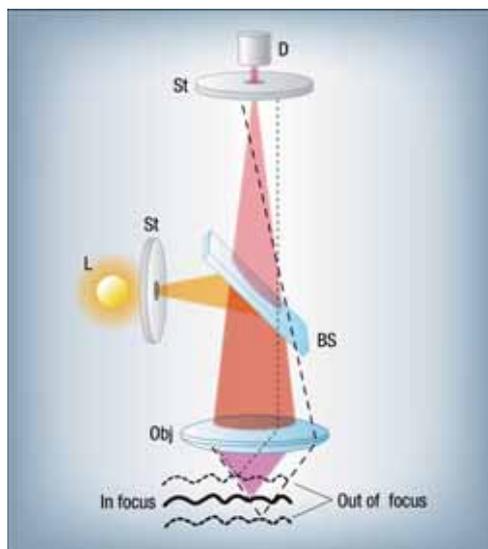


Fig. 1 - Schema di principio di un sensore confocale

riflesso viene quindi fatto passare attraverso una serie di lenti, filtri di polarizzazione e cristalli birifrangenti. Il risultato di tale interferenza è la creazione di una serie di frange concentriche, il cui diametro dipende dalla distanza del punto di riflessione dal bersaglio. Caratteristiche tipiche di un sensore conoscopico sono un intervallo di misura di 1,8 mm con una riproducibilità inferiore a 0,4 μm , una



Fig. 2 - Micromesure di Stil si basa su un sensore confocale

distanza di funzionamento di 15 mm e una frequenza massima di misura di 1 Hz con risoluzione laterale di 12 μm . L'olografia conoscopica viene spesso usata nell'ambito delle perizie calligrafiche, ma è anche stata proposta per la scansione delle su-

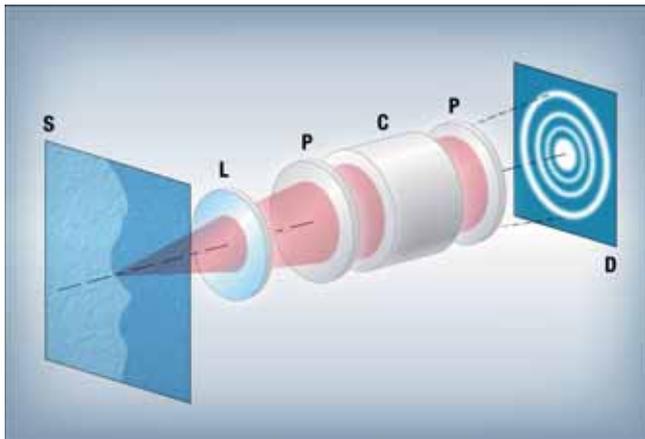


Fig. 3 - Schema di principio di un sensore confocale

perfici marmoree in opere di restauro. I vantaggi principali di questa tecnica sono la relativa insensibilità alle vibrazioni dello strumento e alle variazioni di temperatura grazie alla sua struttura collineare, l'assenza di effetti di ombatura, risultando così utilizzabile anche per la scansione di oggetti con discontinuità superficiali nette, la non stretta dipendenza da una sorgente coerente. Quest'ultimo aspetto, in particolare, contribuisce a rilassare i requisiti stringenti di stabilità e sensibilità propri, invece, dei metodi interferometrici con sorgente laser e che sono alla base del costo più elevato di tali strumenti. Come tutti i metodi interferometrici che utilizzano una singola frequenza di luce, però, anche l'olografia conoscopica soffre di uno svantaggio, che in certe applicazioni può non essere trascurabile: fornisce risultati non ambigui soltanto per distanze di separazione minori della metà della lunghezza d'onda della radiazione utilizzata.

Tale limitazione è in parte superata dai metodi Mwli (Multiwavelength Interferometry) che utilizzano luce con più lunghezze d'onda. In questo caso si può dimostrare che le diverse componenti di luce riflesse dall'oggetto illuminato sono caratterizzate da una differenza di fase direttamente proporzionale alla distanza del bersaglio dalla sorgente e inversamente proporzionale a quella che è definita lunghezza d'onda sintetica, dove l'inverso di tale lunghezza è dato dalla differenza degli inversi delle lunghezze d'onda usate dallo strumento. Maggiore è la lunghezza d'onda sintetica, maggiore sarà l'intervallo di misura non ambiguo dello strumento. Un tipico strumento Mwli può lavorare, per esempio, con due lunghezze d'onda a 1.540 ± 40 nm, caratterizzandosi così per un intervallo di misura non ambiguo di 2 mm su una distanza dall'oggetto fino a 1 m e con risoluzione longitudinale di fino anche a 0,5 nm. Strumenti di misura basati su interferometria Mwli sono disponibili, fra gli altri, da Lumphos, spin-off dell'Institute for Applied Physics della TU Darmstadt (Germania) nato nel 2006; l'azienda tedesca nel 2009 ha annunciato l'innovativo progetto di un modello basato su un massimo a quattro sensori Mwli.

Altri strumenti disponibili

Sempre di tipo interferometrico, ma basato sull'utilizzo di sorgente di luce bianca, è lo strumento mostrato in Figura 4; tuttavia, mentre i precedenti sono di tipo puntuale, questo è a

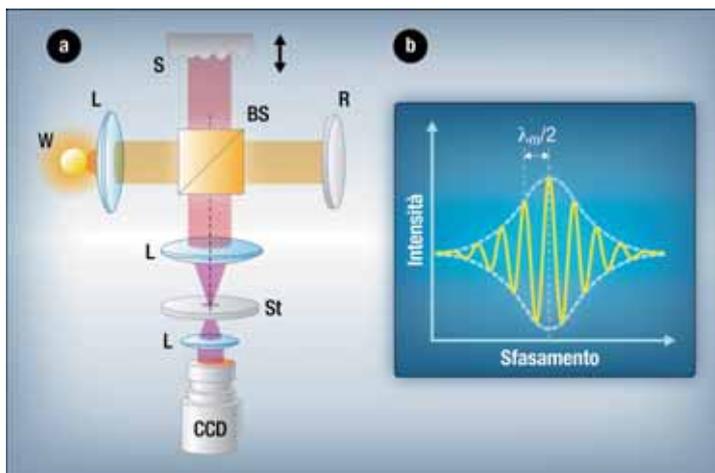


Fig. 4 - Schema di un interferometro a luce bianca

scansione di area. Consiste sostanzialmente di un interferometro di Michelson, in cui uno dei due specchi (Figura 4a) è sostituito dalla superficie che si intende scannerizzare. Al solito, la radiazione ad ampio spettro è separata in due fasci mediante beam splitter. I raggi riflessi sono ricombinati e rilevati da un sensore CCD. L'intensità su ogni pixel (Figura 4b) è massima quando il punto illuminato sull'oggetto è alla stessa distanza del secondo specchio dell'interferometro; ciò è dovuto all'interferenza costruttiva che si determina. Più in generale, si può dimostrare che l'andamento dell'intensità in funzione del diverso cammino ottico seguito dalla luce sui due bracci è di tipo gaussiano, con un fattore di modulazione di tipo sinusoidale avente periodo pari alla metà della lunghezza di coerenza della

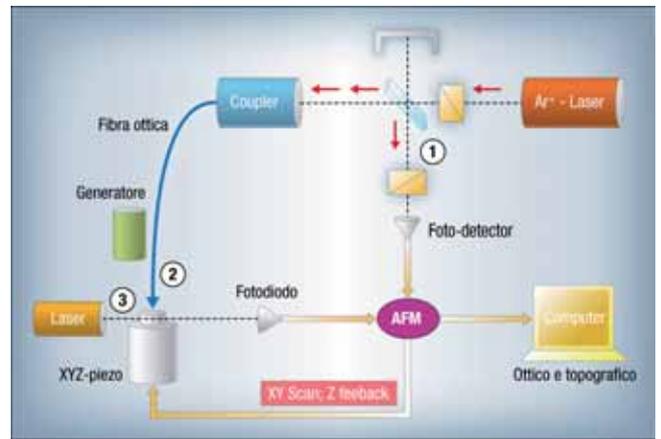


Fig. 5 - Schema di un microscopio Nsom

radiazione. Mediante misure a diverse distanze dello specchio secondario è possibile ricostruire l'involuppo di tale andamento e determinare la distanza dell'oggetto illuminato.

La richiesta di utilizzare una luce bianca, in questo caso, deriva dal fatto che essa ha una piccola lunghezza di coerenza, essendo ad ampio spettro, quindi offre un'elevata risoluzione. Gli strumenti che utilizzano interferometria mediante luce bianca hanno tipicamente intervallo di misura di fino a 500 μ m, con risoluzione inferiore a 40 nm in direzione longitudinale e inferiore a 39 μ m in quella laterale. Applicazioni particolari di questi strumenti si hanno in medicina, per esempio nelle tecniche di tomografia a coerenza ottica (OCT), dove si usa però

luce infrarossa e si sfrutta la sua capacità di penetrare nei tessuti fino a 2 mm di profondità; un esempio di tali applicazioni si trova, in particolare, in oftalmologia, dove mediante tali tecniche si riesce a eseguire la scansione della superficie della retina con risoluzione assiale di 5 μ m. Del tutto diverso è invece il principio di funzionamento degli strumenti, tipicamente microscopi ottici, a campo vicino (Near-field Scanning Optical Microscopy o Nsom), i quali si basano sulla cattura delle proprietà delle onde evanescenti, ovvero le onde formate alla superficie di separazione tra due mezzi con proprietà distinte. Tali onde decadono esponenzialmente e richiedono pertanto che il rivelatore sia posto in prossimità della superficie stessa, tipicamente a distanza inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione. La necessità di catturare tali onde nasce in effetti dal limite di risoluzione (limite di Rayleigh-Abbe) intrinseco a cui sono soggetti tutti gli strumenti ottici tradizionali che lavorano in condizioni di campo lontano. La loro risoluzione longitudinale, infatti,

è direttamente proporzionale alle dimensioni dell'obiettivo, ma inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata. Un microscopio Nsom utilizza tipicamente una sorgente laser; la radiazione viene focalizzata in una fibra ottica mediante polarizzatore e beam splitter; nel caso qui mostrato, la fibra serve anche come sonda (Figura 5). Fondamentale è il controllo del corretto posizionamento di questa rispetto al bersaglio al fine di rilevare le onde evanescenti.

Multiview 2000 di Nanonics Imaging, per esempio, è un microscopio a sonda ottica ultrasensibile che supporta, tra le altre, la modalità di misura mediante tecnica Nsom. Lo strumento ha un range di misura fino a 200 μ m con risoluzione di 0,002 nm in direzione longitudinale e 0,005 nm nel piano XY.