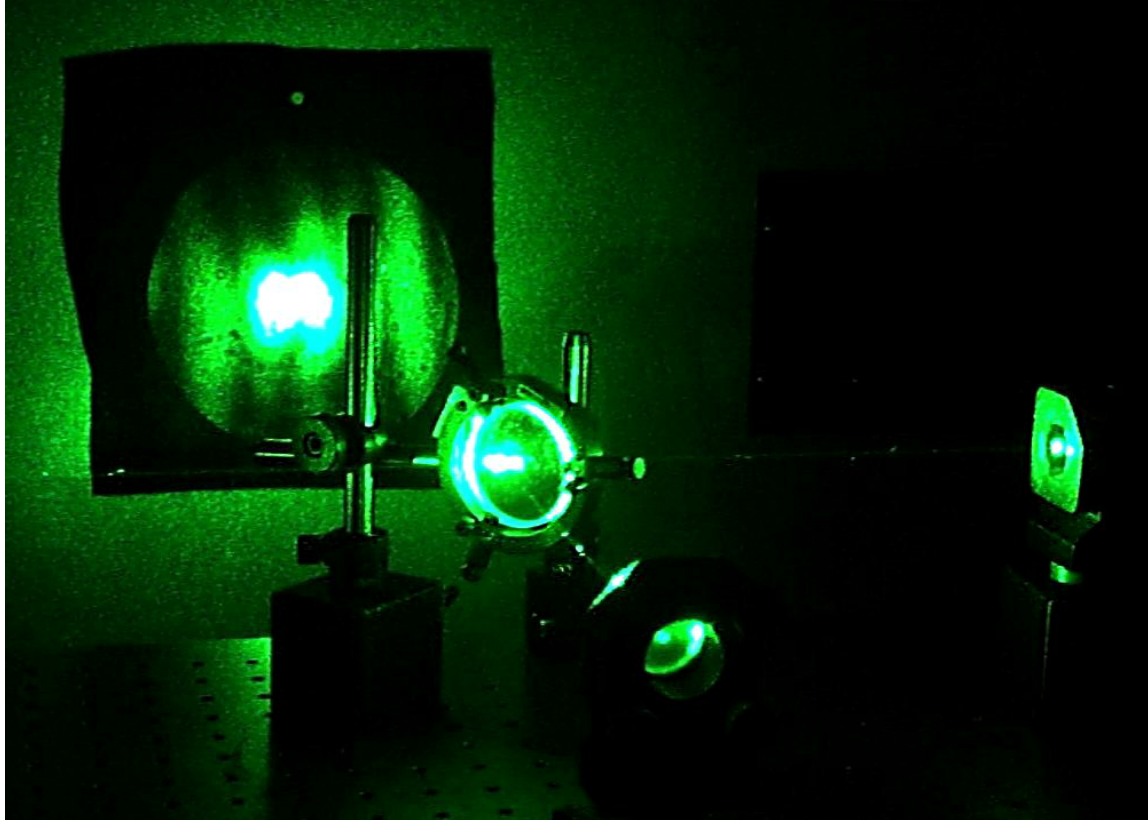




**MISURE DI DISTANZA  
CON  
TECNICA LASER**



Firenze, 28 Agosto 2003

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 1   34 |



### INTRODUZIONE

Rispetto ad una classificazione dei laser in base allo stato chimico-fisico del materiale utilizzato, quello ad He-Ne appartiene alla famiglia dei laser a gas; si tratta, più in particolare, di un laser a gas ad atomi neutri, in quanto la transizione degli elettroni avviene tra i livelli energetici dell'atomo neutro.

Il materiale attivo è appunto una miscela di He-Ne, ove l'He funge da serbatoio di energia per il Ne; possiamo pertanto dire che questo è un particolare laser a tre livelli ove il livello 3 appartiene all'atomo di He, mentre i livelli 1 e 2 fra i quali si instaura la transizione laser appartengono all'atomo di Ne.

Il pompaggio avviene nell'atomo di He tra il livello 1 e il livello 3 metastabile che è quasi coincidente con il livello metastabile superiore del Ne; poiché il trasferimento dell'eccitazione richiede la collisione tra gli atomi di He e di Ne, il livello 3 deve essere metastabile aumentando così la probabilità che avvenga il passaggio dell'eccitazione all'atomo di Ne, ove si verifica l'inversione di popolazione.

La realizzazione pratica del laser prevede tipicamente l'utilizzo di un tubo di vetro a forma di wüstel, all'interno del quale è presente la miscela di gas: di solito la quantità di He è da cinque a dodici volte superiore a quella del Ne e la pressione totale della miscela varia da frazioni di torr a parecchi torr, a seconda delle dimensioni del tubo (abituamente il tubo è abbastanza largo per garantire una buona riserva di gas).

All'estremità del tubo sono presenti due elettrodi: una scarica si propaga dal catodo all'anodo attraverso il gas eccitandolo. È necessario un impulso di innesco con un valore tipico di 10 kV mentre a regime la tensione è di 1000-2000 V e la corrente di alcuni mA.

La luce risuona tra due specchi posti all'estremità del tubo ad una distanza che varia dai 10 cm ai 2 m. Uno è totalmente riflettente l'altro permette la trasmissione di circa l'1% dell'energia incidente, che emerge come raggio.

Alcune realizzazioni prevedono l'utilizzazione di finestre inclinate dell'angolo di Brewster e poste all'interno della cavità, in modo tale che il raggio oscillante (e quindi quello uscente) risulti polarizzato.

Gli specchi delle cavità vengono saldati direttamente alle estremità del tubo, anziché essere incollati: la presenza di colle deteriora infatti l'He, quindi fissando gli specchi senza l'utilizzo di colle si riduce notevolmente il deterioramento dell'He e si può portare la vita media del laser fino a 25000 ore.

La scarica elettrica avviene attraverso un foro capillare di circa 1 mm di diametro; tale processo migliora l'efficienza della scarica, controlla il diametro e la divergenza del raggio e anche la struttura dei modi trasversi.

I pregi del laser a He-Ne sono l'ottima coerenza e la buona qualità del raggio. Esso emette su una banda di lunghezze d'onda che va dai 543.5 nm (verde) fino ai 3392 nm (infrarosso: IR). Il primo e il più usato funziona a  $\lambda = 632.8$  nm nel rosso. Tale linea presenta la più alta potenza possibile per i laser ad He-Ne (tipicamente da 0.5 fino a 15 mW in funzionamento continuo, ma esistono laser con potenze fino a 50 mW) e, rispetto alle altre linee nel visibile, il miglior guadagno; le linee nell'IR presentano guadagni migliori, ma i laser nell'IR hanno minori applicazioni anche perché sono costosi e più difficili da realizzare.

Ricordiamo che, fra i laser che emettono nel visibile, hanno particolare interesse quelli nel verde poiché l'occhio umano presenta la massima sensibilità a 555 nm.

Tipicamente i laser a He-Ne oscillano in un unico modo trasverso producendo un raggio TEM 00, si ha cioè una macchia luminosa unica con distribuzione gaussiana di intensità. Il numero di modi longitudinali diminuisce con il decrescere della lunghezza della cavità (il massimo di lunghezza affinché il laser risulti unimodale è di 15 cm).

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 2   34 |



La lunghezza di coerenza è comunemente di 20-30 cm (a cui tipicamente corrisponde una larghezza di linea di una parte su 300000) e aumenta se il laser è unimodale, si possono però anche avere lunghezze di coerenza di alcuni Km per laser termostatati.

Nell'applicazione seguente, vengono sfruttati i pregi dei laser a He-Ne che sono l'ottima coerenza, la buona qualità del raggio e la lunghezza d'onda nel visibile.

Vengono usati per effettuare misure interferometriche di superfici e contorni.

Esiste una variante costituita dal laser ad anello adoperata come giroscopio, nella navigazione (aerea): i giroscopi a laser presentano tre o quattro specchi che definiscono un percorso chiuso ad anello all'interno della cavità laser: la luce risuona nell'anello nei due versi: valutando le differenze di frequenza tra i due raggi contropropaganti, si possono rilevare informazioni riguardo alle rotazioni del giroscopio attorno all'asse centrale.

Costruito per la prima volta nel 1961 nei laboratori AT&T, il primo laser a He-Ne emetteva a 1153 nm (nell'IR) mentre nel 1962 si ebbe il primo laser a He-Ne con la tipica  $\lambda = 632.8$  nm (nel rosso); di questi ultimi se ne sono venduti a milioni dagli anni '60 in qua, soprattutto del tipo usato come dimostrativo nelle scuole e nei musei. Attualmente però i laser a semiconduttore stanno guadagnando ampie fette di mercato poiché sono più piccoli, più economici, più efficienti e non richiedono elevate tensioni.

Nel settore di mercato che riguarda quest'applicazione, i laser a He-Ne prevalgono su quelli a semiconduttore per le loro qualità; negli anni '80 c'è stato un notevole aumento di vendita dei laser a He-Ne causato dall'apertura del mercato dei lettori di codici a barre, specialmente nella versione per supermercati e negozi. Nei lettori di codici a barre portatili invece, sono nettamente più utilizzati i diodi laser per le loro ridotte dimensioni.

Il mercato dei laser a He-Ne sopravvive anche per la produzione di ricambi per le strumentazioni preesistenti.

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 3   34 |



**Indice**

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | Principi di misura                                  | 6  |
| 1.1.   | Misura di distanza e velocità                       | 7  |
| 1.2.   | Misura di angoli                                    | 8  |
| 1.3.   | Misure di piani                                     | 9  |
| 1.4.   | Misure di rettilineità                              | 9  |
| 1.5.   | Misure di ortogonalità                              | 10 |
| 1.6.   | Misure di parallelismo                              | 10 |
| 2      | Considerazioni sulla misura                         | 10 |
| 2.1.   | Sistema di misura                                   | 10 |
| 2.2.   | Precisione, accuratezza, risoluzione                | 12 |
| 2.2.1. | Precisione  | 12 |
| 2.2.2. | Accuratezza   | 13 |
| 2.2.3. | Risoluzione   | 13 |
| 2.3.   | Fattori che influenzano accuratezza e precisione    | 14 |
| 2.4.   | Fattori relativi alla macchina                      | 14 |
| 2.5.   | Errori di offset                                    | 14 |
| 3      | Misura della distanza                               | 16 |
| 3.1.   | Specifiche operative                                | 16 |
| 3.2.   | Assemblamento ottico                                | 18 |
| 3.2.1. | Assemblaggio dell'interferometro                    | 18 |
| 3.3.   | Installazione e allineamento ottico                 | 20 |
| 3.3.1. | Considerazioni importanti                           | 20 |
| 3.3.2. | Descrizione   | 20 |
| 3.3.3. | Procedura   | 20 |
| 3.3.4. | Controllo rettilineità del fascio                   | 26 |
| 3.3.5. | Controllo dell'allineamento per l'errore del coseno | 27 |
| 3.3.6. | Misura lungo un'asse perpendicolare                 | 28 |
| 3.3.7. | Altri accorgimenti nel montaggio                    | 29 |
| 3.4.   | Impostazioni del display di misura, uso di sensori  | 29 |
| 3.4.1. | selezione "unità di misura"                         | 29 |
| 3.5.   | Uso di sensori                                      | 30 |
| 3.5.1. | Fissaggio dei sensori                               | 30 |
| 3.5.2. | Disposizione dei sensori                            | 30 |
| 3.5.3. | Regolazione dell'umidità                            | 31 |
| 3.6.   | Misurazioni   | 31 |
| 3.6.1. | Controllo del sistema                               | 31 |
| 3.6.2. | Procedura   | 32 |
| 3.7.   | Cosa influenza l'accuratezza?                       | 32 |
| 3.7.1. | Errori dovuti alla distanza della misura            | 32 |
| 3.7.2. | Compensazione della velocità della luce             | 33 |
| 3.7.3. | Misura della temperatura dei materiali              | 33 |

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 4   34 |



**Indice delle figure**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Sistema di misura laser – diagramma a blocchi semplificato | 6  |
| Figura 2  | Misura di distanza e velocità                              | 8  |
| Figura 3  | Misure di angoli   | 9  |
| Figura 4  | Gradi di libertà   | 11 |
| Figura 5  | Ortogonalità tra due assi                                  | 12 |
| Figura 6  | Accuratezza, precisione e risoluzione                      | 13 |
| Figura 7  | Esempio di errore di offset del calibro                    | 15 |
| Figura 8  | Hardware richiesto per qualsiasi misura di distanza        | 17 |
| Figura 9  | Componenti hardware opzionali                              | 18 |
| Figura 10 | Assemblaggio dell'interferometro                           | 19 |
| Figura 11 | Posizionamento del gruppo ottico                           | 22 |
| Figura 12 | Montaggio dell'interferometro                              | 24 |
| Figura 13 | Montaggio schermo riflettente                              | 25 |
| Figura 14 | Interferometro e schermo riflettente                       | 26 |
| Figura 15 | Indicatore dell'errore del coseno                          | 27 |
| Figura 16 | Posizionamento ottico dei tre assi                         | 28 |
| Figura 17 | Corretto angolo di montaggio                               | 29 |
| Figura 18 | Disposizione dei sensori                                   | 31 |

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 5   34 |

## 1 Principi di misura

La testa del laser a gas elio/neon, produce un fascio di luce coerente. Un magnete permanente cilindrico, intorno alla cavità, provoca una piccola oscillazione del laser, intorno a due diverse frequenze. Tale oscillazione è detta sdoppiamento di Zeeman. Le due componenti della frequenza  $f_1$  e  $f_2$  sono distinguibili tramite le loro polarizzazioni circolari opposte.

Il fascio di luce che esce dal laser, contiene entrambe le frequenze  $f_1$  e  $f_2$ , passate attraverso vetri ottici di  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  onda, convertendo la polarizzazione circolare delle due frequenze in una polarizzazione perpendicolare lineare (una verticale ed una orizzontale).

Il fascio lineare polarizzato viene fatto espandere in un telescopio coassiale, dopo di che la maggior parte del fascio è trasmesso tramite un divisore di fascio a  $45^\circ$  fuori dalla testa del laser. Una porzione del fascio splittato a  $45^\circ$ , viene campionata. Buona parte di questo campionamento alimenta il ricevitore, che analizza la differenza in frequenza tra le due componenti ottiche  $f_1$  e  $f_2$ . Tale differenza sarà compresa tra 1.5 e 2 MHz ed è rappresentato in figura 1. La rimanente quota di laser campionato serve a controllare la sintonia, in modo da mantenere l'uscita del fascio a frequenza costante.

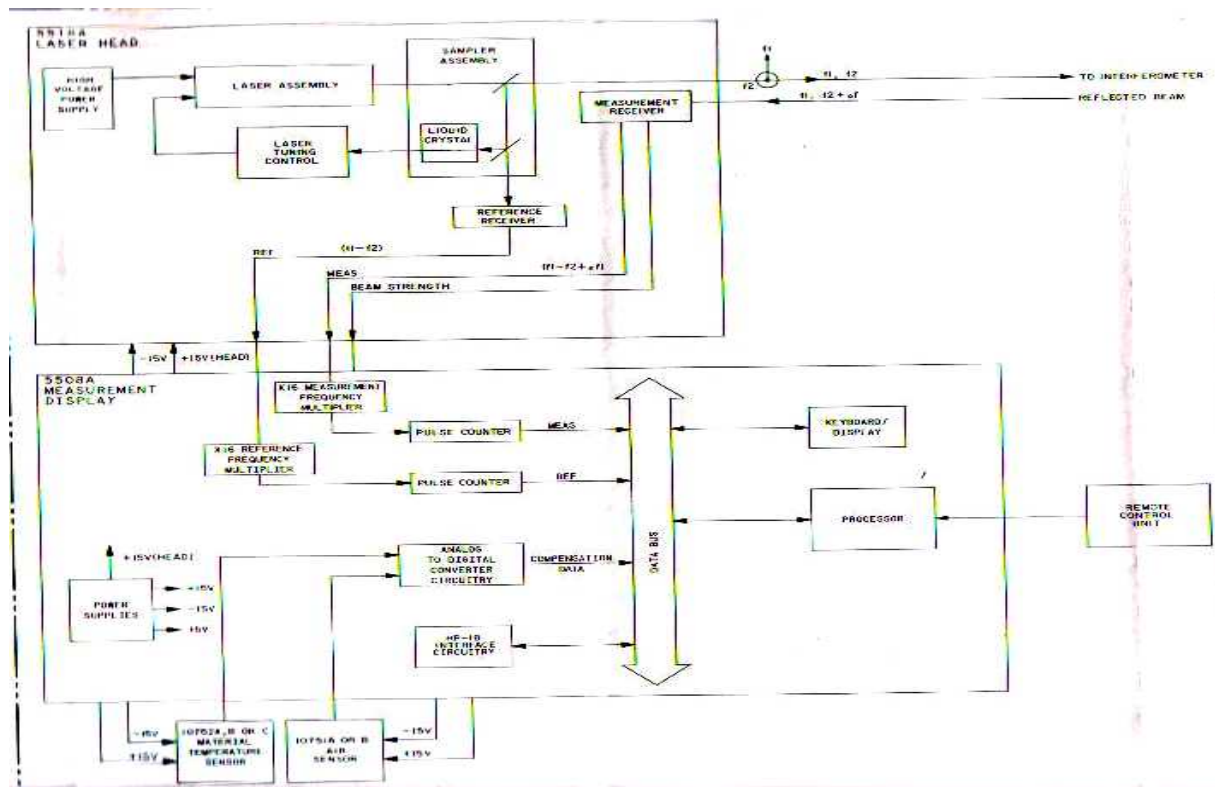


Figura 1 Sistema di misura laser – diagramma a blocchi semplificato

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 6   34 |



Durante la misura, il fascio laser, è diretto attraverso un percorso ottico fino alla testa del ricevitore. Questo ricevitore rileva una parte del segnale che ritorna, di frequenza  $f_1$ - $f_2$ , più una componente slittata Doppler  $\Delta f$ , qualora esista moto relativo tra il sistema ottico e il percorso di misura.

Le due frequenze non interferiscono finché il fascio non raggiunge il demodulatore polarizzato, montato in fronte al ricevitore, dato che le loro polarizzazioni sono ortogonali tra loro. I segnali di ogni ricevitore laser (riferimento + ricevitore) sono contati e visualizzati in due separati contatori di impulsi (uno per il riferimento ed uno per il segnale). Questi contatori rilevano il conteggio assoluto e la frequenza determina il tasso con cui i conteggi sono accumulati.

**Effetto Doppler.**

Si manifesta con la variazione di frequenza percepita da un osservatore che si trova in moto relativo rispetto alla sorgente di emissione. Gli atomi di un materiale che emette sono in movimento e quindi la frequenza dei fotoni emessi varia in maniera diversa a seconda della velocità di spostamento dell'atomo. Globalmente si vede un allargamento della campana.

Dunque l'unità di misura:

- a) Sottrae continuamente il conteggio di riferimento dal conteggio di misura in questione (in termini di lunghezza d'onda)
- b) Esegue le necessarie funzioni elettroniche per calcolare misure particolari
- c) Modifica i risultati ottenuti al punto "b", attraverso i valori impostati di messa a punto e compensa le informazioni attraverso le informazioni del sensore d'aria e del materiale (se usati)
- d) Visualizza le informazioni della misura a video

**1.1. Misura di distanza e velocità**

I due fasci di frequenze  $f_1$  e  $f_2$  che lasciano la testa del laser, sono diretti su di un interferometro lineare che divide le due frequenze del fascio polarizzando i fasci splittati (vedi figura 2). La componente  $f_1$  diventa la distanza fissata di riferimento, mentre  $f_2$  è inviata al punto da raggiungere, che la riflette all'interferometro. Il moto relativo tra l'interferometro lineare e lo specchio causa il ritorno, per effetto Doppler, di una componente  $\Delta f_2$  della frequenza.

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 7   34 |



Dunque, il ricevitore posto sulla testa del laser, vede una differenza di segnale data da  $f_1 - f_2 \pm \Delta f_2$ .

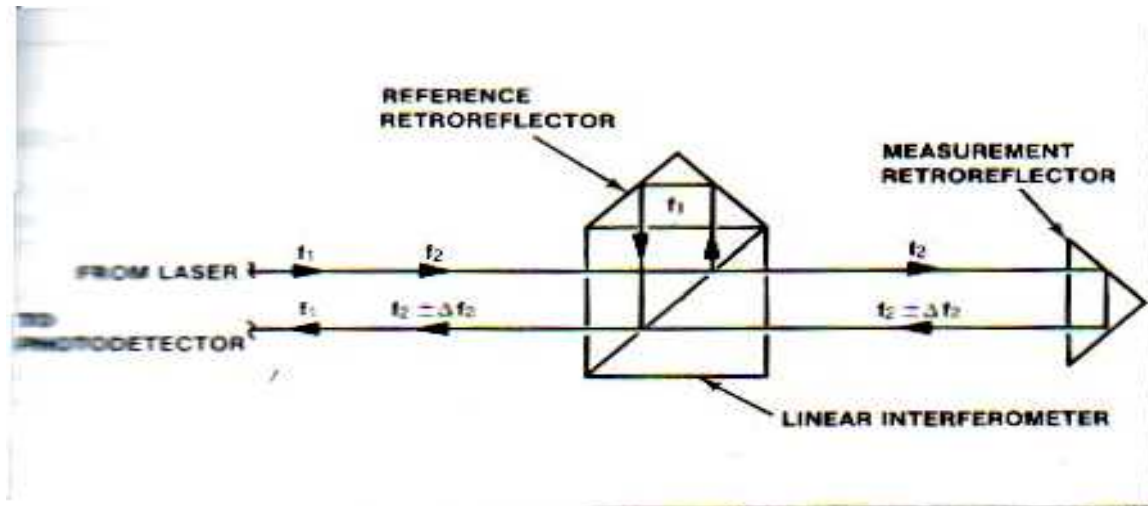


Figura 2 Misura di distanza e velocità

Il segnale di rientro  $f_1 - f_2 \pm \Delta f_2$ , dall'interferometro lineare esterno, viene confrontato all'interno dell'unità di misura, col segnale di riferimento  $f_1 - f_2$ . La differenza  $\Delta f_2$ , è relazionata elettronicamente alla velocità, dunque alla distanza. Quest'informazione, infine, è manipolata per mezzo di relazioni presenti all'interno del sistema, in modo da produrre in uscita, sul video, il valore della grandezza, nella sua unità di misura. La corretta separazione tra il fascio uscente e quello entrante è data da ogni riflettore posteriore.

## 1.2. Misura di angoli

Il sistema ottico angolare crea due fasci paralleli attraverso l'interferometro angolare, di frequenze  $f_1$  e  $f_2$ . La distanza attraverso i due fasci è nota, pertanto i due schermi riflettenti sono precisamente posizionati tra l'angolo di riflessione.

Inizialmente, l'angolo tra l'interferometro angolare e la parte riflettente è assunto essere "0" e i due percorsi, tra loro, hanno una certa lunghezza relativa. Se l'angolo dell'interferometro o quello dello schermo riflettente varia, cambia la distanza relativa tra i due fasci; provocando una variazione Doppler della frequenza nel fascio che ritorna alla testa del laser, dall'interferometro angolare.

Il sistema elettronico di misura laser, calcola infine e visualizza la variazione dell'angolo a video, tramite la nuova frequenza calcolata e il nuovo percorso ottico.

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 8   34 |



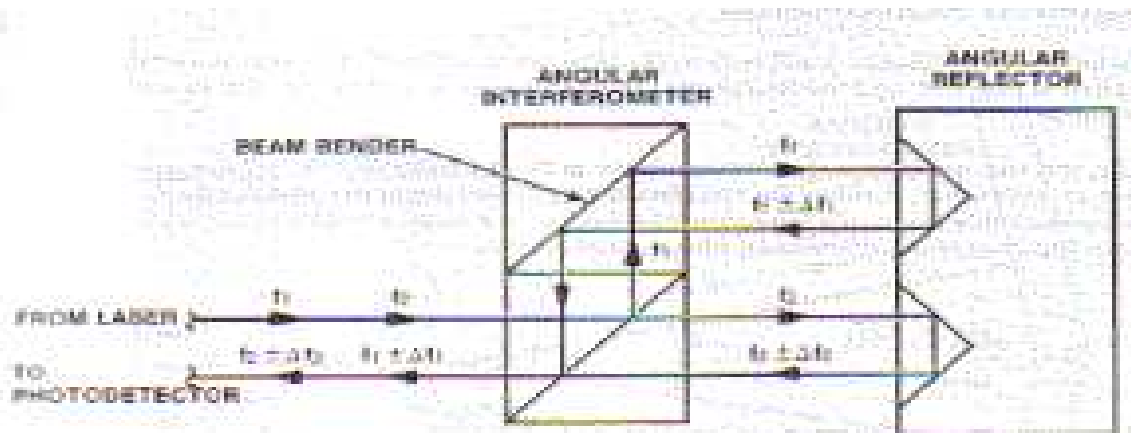


Figura 3 Misure di angoli

### 1.3. Misure di piani

La misura di un piano è fatta integrando una serie di misure angolari prese dal sistema di misura angolare lungo un tragitto di misura. La figura 4 mostra il processo di rilievo delle misure di un piano.

La posizione "A" è assunta essere la posizione di "RESET", ovvero lo "0" dell'elevazione. La posizione "B" è il passo del campionamento. L'altezza tra il raggio riflesso nella posizione "A" e quella del raggio riflesso nella posizione "B" è calcolata mediante l'angolo tra i due raggi e la lunghezza del passo. Similmente la posizione "C", ha la stessa distanza di "B" da "A" e l'altezza è determinata sommando algebricamente l'altezza determinata in precedenza da "B" (ed eventualmente da "A", se questo avesse determinato un valore diverso da "0"), in modo da trovare la distanza complessiva al di sopra o sotto lo "0".

Questo processo continua per tutto il percorso di misura ed ad ogni nuovo passo, l'altezza determinata è aggiunta algebricamente alla misura.

### 1.4. Misure di rettilineità

In questa tecnica di misura aiuta a visualizzare lo schermo riflettente, immaginarlo come uno schermo dritto tenuto ad un'estremità, lungo il quale scorre l'interferometro.

Inizialmente, i due fasci provenienti dall'interferometro verso lo schermo riflettente ( $f_1$  e  $f_2$ ) hanno una certa lunghezza relativa. Se l'interferometro o lo schermo riflettente, sono mossi, da una parte all'altra (dello schermo riflettente), la lunghezza relativa dei due fasci, cambia. Il cambiamento, rilevato in termini di ampiezza accumulata, vale  $2D \sin(\vartheta/2)$ . Dove  $D$  è la distanza dello schermo e  $\vartheta$  è l'angolo tra i due fasci che lasciano l'interferometro.

|      |             |             |             |        |        |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
|      |             |             |             |        |        |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 9   34 |



Generalmente  $\theta$  è  $1.5^\circ$  per interferometri a campo ristretto e  $0.15^\circ$  per interferometri a campo largo. Per avere il corretto valore in uscita dallo strumento, l'apparecchio moltiplica automaticamente l'ampiezza del segnale considerato per il reciproco di  $2 \sin(\theta/2)$ .

Piccole imperfezioni, imbarcate o rollii, non sono rilevati come differenze, dall'interferometro, dunque non affettano l'accuratezza della misura.

I due fasci di rientro dallo schermo riflettente, sono combinati, attraverso un prisma, nello stesso punto da dove erano stati divisi. Il raggio, così combinato, è rinviato alla testa del laser, lungo lo stesso cammino fatto all'uscita. Un raggio curvatore, alla porta di uscita della testa del laser, commuta nella posizione settaggio anello della torretta destra della testa del laser "DRITTO", flettendo il raggio proveniente dall'interferometro a rettilineità, in basso, al rilevatore ottico, alle spalle della normale porta di rientro del raggio. (Questo ingrandimento del cammino di ritorno è molto simile a ciò che avviene in un periscopio o in un binocolo prismatico).

### 1.5. Misure di ortogonalità

La misura di ortogonalità consiste di due misure di rettilineità fatte dallo stesso apparecchio riflettente. La perpendicolarità è acquisita utilizzando una squadra ottica.

La perpendicolarità è calcolata aggiungendo o sottraendo i picchi per ogni misura di rettilineità al corretto angolo (determinato dalla squadra ottica).

### 1.6. Misure di parallelismo

La misura di parallelismo è simile a quella angolare, a differenza del sistema ottico, che non è più a squadra). Ancora una volta si fanno due misure di rettilineità, lungo lo stesso asse, dal medesimo schermo riflettente.

Il parallelismo è calcolato confrontando i picchi delle due misure di rettilineità.

## 2 Considerazioni sulla misura

### 2.1. Sistema di misura

Per caratterizzare pienamente le geometrie della macchina, occorre misurare:

- I sei gradi di libertà, per ogni asse di misura
- Ortogonalità tra gli assi di misura
- Parallelismo tra gli assi di misura

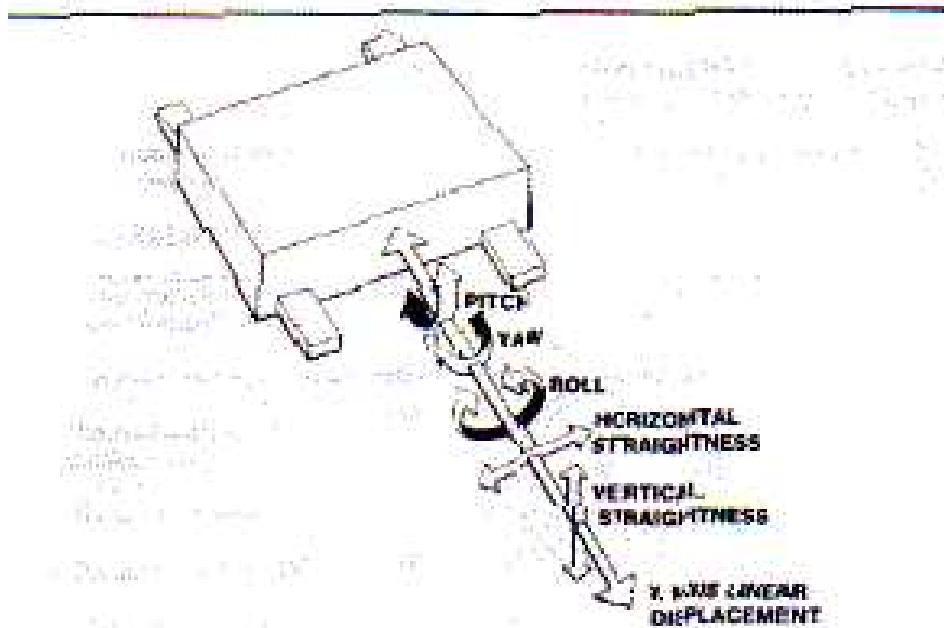
|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 10   34 |



Per quanto riguarda i sei gradi di libertà, abbiamo:

- Scostamento lineare
- Scostamento angolare, sull'asse di misura:
  - Di picco
  - Imbardata
  - Rollio
- Scostamento perpendicolare dall'asse di misura:
  - Rettitudine del piano verticale
  - Rettitudine del piano orizzontale

Queste sei variabili sono utilizzate per spezzare i movimenti di un pallet che scorre in due diverse direzioni in fattori che possono essere meglio maneggiati. (vedi figura 4)

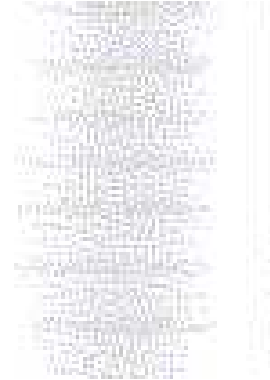
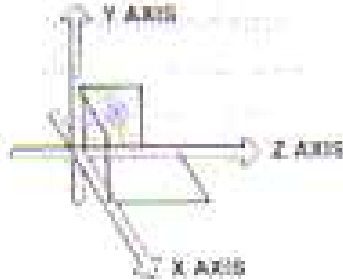


**Figura 4** Gradi di libertà

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 11   34 |



Perpendicolarità e parallelismo tra due assi, caratterizzano come questi sono posizionati tra loro. Tutte le misure sono compiute effettuando due misure di rettitudine. (vedi figura 5)



**Figura 5** *Ortogonalità tra due assi*

Ognuna di queste caratteristiche contribuisce all'accuratezza e la precisione nel posizionamento dei punti all'interno dell'area di lavoro della macchina.

Tutte queste misure (eccetto il rollio), possono essere effettuate col sistema di misura laser.

## **2.2. Precisione, accuratezza, risoluzione**

Queste tre definizioni: "precisione", "accuratezza", e "risoluzione", sono importanti da capire. In molti contesti industriali, sono utilizzati. Questi termini non sono intercambiabili.

### 2.2.1. Precisione

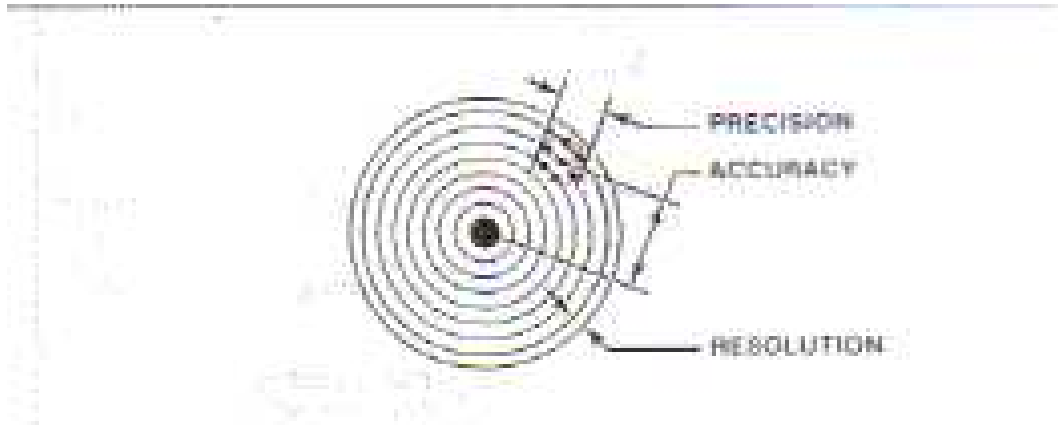
Precisione è spesso chiamata "REPETEABILITY" ed è la differenza media delle misure effettuate su una posizione target (precisione attribuibile all'equipaggiamento).

Per avere un'idea chiara del concetto, si può pensare ad un bersaglio da colpire con una pistola.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 12   34 |



La circonferenza entro la quale stanno tutti i tiri effettuati, mostra la precisione del tiratore. (figura 6)



**Figura 6** *Accuratezza, precisione e risoluzione*

Si può pensare similmente alla precisione, quando si effettuano misure laser. Bravura dell'operatore, stabilità e geometria della macchina e condizioni ambientali, influenzano la misura.

#### 2.2.2. Accuratezza

Rappresenta quanto si avvicina la misura al dato standard. A paragone, la precisione è quanto le misure sono in accordo tra di loro. Nel nostro esempio del tiro al bersaglio, la distanza del centro della circonferenza, dal centro del bersaglio è l'accuratezza del tiro. Inoltre è bene ricordare che precisione e accuratezza non sono la stessa cosa; è possibile essere precisi, facendo centro, ma non accurati, non ripetendo la misura più volte.

Nelle misure lineari, l'accuratezza è la differenza tra la posizione media del gruppo di misure e la posizione del target, di queste. Parti accurate, sono esattamente uguali al disegno di queste parti. Parti precise, sono esattamente uguali tra loro. Un lotto di parti, sono rigettate per la stessa imprecisione, perché sono precise, ma non accurate.

#### 2.2.3. Risoluzione

La risoluzione è come per una fotografia, l'ordine di grandezza del bersaglio in questione.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 13   34 |



### 2.3. Fattori che influenzano accuratezza e precisione

Accuratezza e precisione sono fattori influenzati da molti aspetti, che possono essere separati in due gruppi:

Fattori che riguardano la macchina

- Fattori che riguardano la messa a punto

I fattori che riguardano la macchina sono:

- Geometria della macchina
- Scala della macchina e sue precisione e accuratezza
- Ambiente
- Risposta della macchina al cambiamento dell'ambiente

### 2.4. Fattori relativi alla macchina

La calibrazione di una macchina è più complessa della ricerca dell'accuratezza e la precisione. Può accadere che una macchina messa a punto, perda di accuratezza e di precisione, a causa:

- Ambiente dove si trova (incluse temperatura e vibrazioni)
- La risposta della macchina ai cambiamenti dell'ambiente (stabilità della macchina)
- Accuratezza e precisione delle geometrie della macchina
- Accuratezza e precisione della scala della macchina

Ognuno di questi fattori è ugualmente importante. Misure dell'accuratezza e della precisione hanno significato solo quando le geometrie e l'ambiente sono noti

### 2.5. Errori di offset

Un errore di questo tipo può apparire, nella misura laser come nel metodo di misura più tradizionale. E' il risultato di:

- 1) Un non corretto allineamento del sistema di misura
- 2) Una divergenza tra l'asse di misura e l'asse di scala del sistema di misura

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 14   34 |



L'errore di offset provocherà una visualizzazione della distanza più lunga o più corta di quella reale. Questo in funzione dell'angolo di offset, come mostra la figura 7. L'ammontare dell'errore della misura è dato da:

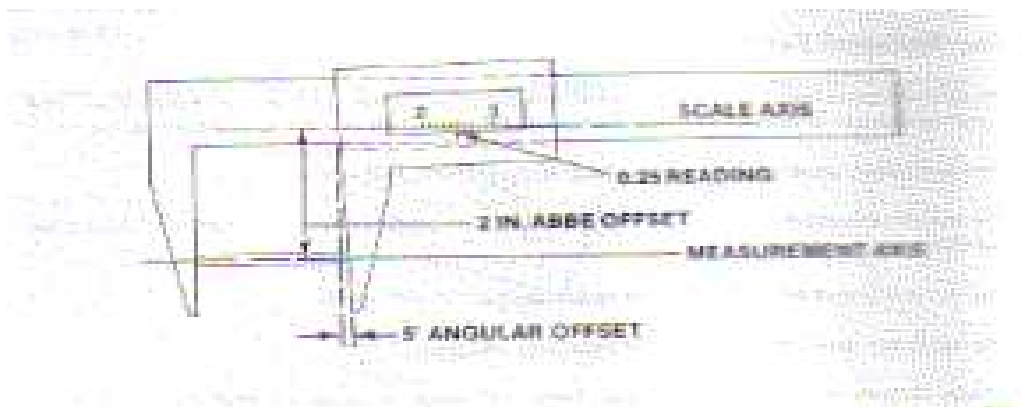
- Distanza d offset x angolo di offset

Per angoli di 20° o inferiori, la tangente dell'angolo, divisa per l'angolo, in arcsec, è tra  $5.05 \times 10^{-6}$  e  $4.84 \times 10^{-6}$ . Questo significa che è possibile avere una buona approssimazione della misura dell'errore, moltiplicando la distanza misurata di offset per:

$$\frac{5 \times 10^{-6}}{\text{arcsec}} \times \text{angle size in arcsec}$$

L'unità di misura dell'errore sarà la stessa della misura (e dell'offset, es. mm, cm.), pertanto il valore della tangente è adimensionale.

L'errore di offset, aumenta in proporzione alle dimensioni dell'angolo di offset e della distanza di offset ed è veramente una questione di: "Cosa stai cercando di misurare?". Per esempio, se stai cercando di determinare la precisione e l'accuratezza del registro del piano della macchina, o della scala, occorre mantenersi il più possibile vicino al registro o alla scala. Se si intende conoscere quanto accurato è il taglio di uno strumento, occorre fare la misura intorno al percorso fatto dallo strumento; questo dà una reale rappresentazione dell'accuratezza del posizionamento e compensa, inoltre, le eventuali imperfezioni geometriche del sistema di misura.



**Figura 7** Esempio di errore di offset del calibro

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 15   34 |





Nell'esempio del calibro, l'angolo di offset è 5 arcmin e l'offset lineare tra l'asse di misura e l'asse di scala è 50 mm. L'errore dovuto all'offset tra l'asse di misura e l'asse di scala può essere calcolato come:

$$error = \frac{5 \times 10^{-6}}{ar \ csec} \times 5 \ arc \ min \times \frac{60 \ ar \ csec}{arc \ min} = 0.075 \ mm$$

Minimizzando l'offset tra i due assi, l'errore è significativamente ridotto.

Per esempio, se la distanza di offset è 10 mm, anziché 50 mm, l'errore si riduce a:

$$error = 10 \frac{5 \times 10^{-6}}{ar \ csec} \times 300 \ ar \ csec = 0.015 \ mm$$

Può essere meritevole menzionare che un micrometro può non essere soggetto a errori di offset, dal momento che il suo asse di misura e di scala sono lo stesso.

Si consideri di migliorare l'accuratezza di uno strumento montato su un mulino. Per minimizzare l'effetto dell'offset, nella misura, occorre mettere a punto il laser in modo che il cammino ottico dia l'esatta informazione su come lo strumento si sta muovendo.

La calibrazione degli assi può essere dislocata nei punti più critici dell'area di lavoro della macchina. Una volta compensata, la macchina, posizionerà accuratamente l'asse di calibrazione. L'accuratezza peggiore della macchina si avrà col più grande offset dell'asse di calibrazione.

### 3 Misura della distanza

#### 3.1. Specifiche operative

- Accuratezza: (vedi messa a punto dell'accuratezza)
- Risoluzione: 0.00001 mm - 1.0 mm
- Range:

|  |
|--|
| Lunghezza del cammino ottico (per un range di temperatura da 15 a 25 °C) |
| ±40 metri * (muovendo lo schermo riflettente)                            |
| ±10 metri (muovendo interferometro)                                      |
| Distanza tra la testa del laser e lo schermo riflettente                 |
| ±61 metri* (muovendo lo schermo riflettente)                             |
| ±25 metri (muovendo interferometro)                                      |
| * interferometro entro 5 metri   |

- Velocità massima: ±18000 mm/min

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 16   34 |

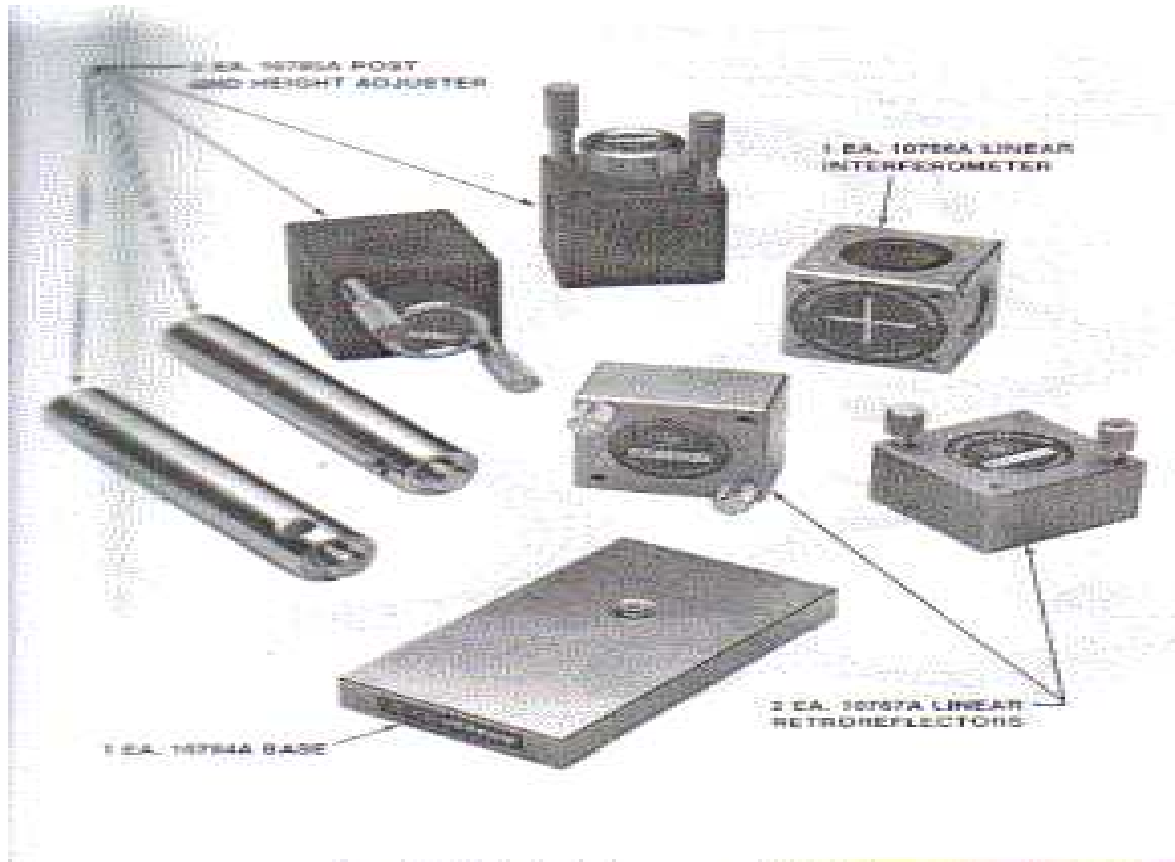


Figura 8 Hardware richiesto per qualsiasi misura di distanza

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 17   34 |



**Figura 9** Componenti hardware opzionali

### 3.2. Assemblamento ottico

#### 3.2.1. Assemblaggio dell'interferometro

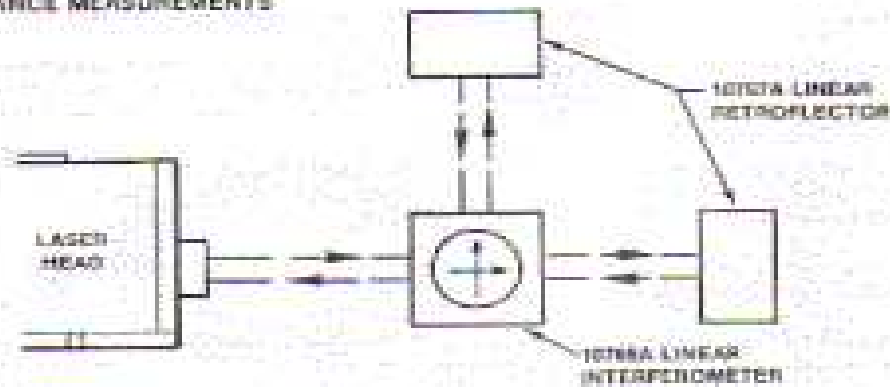
La misura della distanza è effettuata utilizzando due schermi riflettori e un interferometro. L'interferometro è posto nel cammino tra la testa del laser e i due riflettori, come mostra la figura 10a. Nella pratica uno dei riflettori viene fisicamente attaccato all'interferometro e l'altro viene lasciato libero di muoversi rispetto all'interferometro. Quando si fa la messa a punto della macchina, è importante notare che la "coda" finale di una delle frecce, sulla targa dell'interferometro, deve essere verso la testa del laser e la "testa", di entrambe le frecce, deve puntare attraverso il vetro riflettore, se attaccato o mobile.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 18   34 |

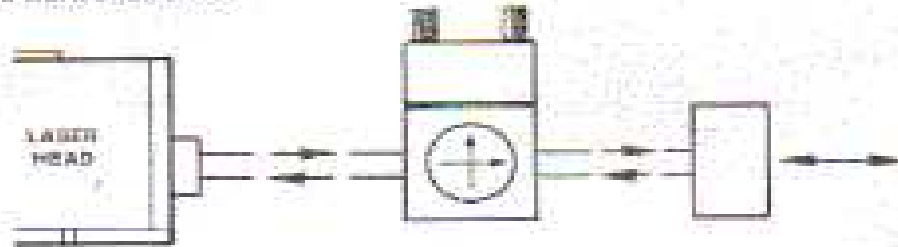
Quando la misura che si vuole fare è lungo il fascio laser, l'interferometro è assemblato come in figura 10b. Quando, invece, la misura da eseguire è lungo un'asse che forma un angolo a destra del fascio laser, occorre assemblare l'interferometro come mostrato in figura 10c.

Attaccato lo schermo riflettore all'interferometro, come in figura 10b, usando due piccole viti zincate, incluse col riflettore. Nella pratica, si dispone il sistema come in figura 10b, eccetto la rotazione della freccia, non indica la direzione da misurare.

A. DISTANCE MEASUREMENTS



B. IN-LINE MEASUREMENTS



C. MEASUREMENTS ALONG A PERPENDICULAR AXIS

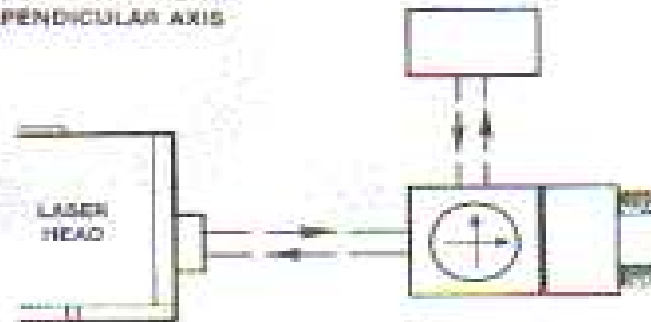


Figura 10 Assemblaggio dell'interferometro

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 19   34 |



### 3.3. Installazione e allineamento ottico

#### 3.3.1. Considerazioni importanti

1. L'assemblaggio dell'interferometro deve essere fatto tra la testa del laser e il riflettore nel fascio laser
2. Il fascio che arriva dalla testa del laser, deve entrare nell'interferometro alla "coda" di una delle due frecce mostrate sull'etichetta
3. Vibrazioni e perdite di connessione, devono essere minimizzate attraverso un montaggio appropriato. Evitare lunghe estensioni. Un albero, per esempio, deve essere assicurato, affinché non ruoti, attraverso un freno (se il freno non fosse disponibile, provare utilizzando una pinza o un cuneo)
4. Il fascio laser deve rientrare nella porta superiore della testa, sulla torretta
5. Il gruppo ottico deve essere ben allineato al fascio laser, in modo da tenere l'indicatore di rettilineità a un livello accettabile (accuratezza della misura)
6. Il gruppo ottico deve essere ben allineato al fascio laser, in modo da tenere l'indicatore di rettilineità nella regione verde lungo il percorso interno
7. Se il gruppo ottico angolare è stato precedentemente installato, è possibile installare il gruppo per la misura della rettilineità, semplicemente cambiando il gruppo ottico, senza cambiare l'hardware
8. L'anello della torretta deve essere settato su "OTHER"

#### 3.3.2. Descrizione

1. Posizionare il gruppo ottico attorno al fascio laser, mentre si è vicini al finecorsa.
2. Aggiustare la testa del laser, in modo da tracciare la progressione ottica lungo il cammino ottico, mantenendo il fascio vicino alla fine del tragitto
3. Controllare l'allineamento per le considerazioni importanti fatte nei punti 5 e 6.

#### 3.3.3. Procedura

- 1) La parte mobile della macchina deve essere avvicinata il più possibile alla testa del laser. Notare che le parti mobili della macchina, dipendono dall'asse che si sta misurando. La parte mobile, potrebbe essere l'asse x, y o z. Questo assicurerà la macchina da urti alla testa del laser e aiuterà a stabilire il fine corsa.
- 2) Visualmente, allineare la testa del laser più parallelamente possibile alla direzione di lavoro, con un'adeguata altezza.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 20   34 |



Alcune cose da considerare sono:

- La posizione appropriata dell'asse, a seconda della misurazione che si deve effettuare
  - Se si pensa di effettuare una misura di rettilineità o perpendicolarità, successivamente, stabilite l'asse di misura ad un'altezza tale che consenta il successivo cambio delle lenti. Per fare questo montare uno specchio riflettore sul regolatore di altezza che scorre sul pattino sulla parte alta del tavolo; quindi posizionare la testa del laser in modo che il fascio ritorni dal riflettore, alla porta in basso della testa del laser.
  - Usare l'autoriflessione, per aiutarsi nel compiere questa manovra in modo da rendere pratico il settaggio del sistema di misura. Se si usa l'autoriflessione, non sarà necessario effettuare ulteriori allineamenti. Occorrerà solo controllare la rettilineità del fascio e l'errore di coseno, una volta installate le lenti.
- 3) Decidere dove posizionare il gruppo ottico in modo che:
- L'interferometro sia tra il riflettore e la testa del laser
  - Una lente sia montata sullo strumento e l'altra sia dove è montato il pezzo
  - Le lenti siano vicine al fine corsa (questo significa che ogni altro movimento del pezzo oltre il fine corsa, non sarà rilevato dal laser)
  - Se si vuole fare misure di ortogonalità dalla stessa posizione della testa del laser, posizionare l'interferometro sulla parte della macchina che si manterrà stazionaria, durante le misure e che può essere presa come origine degli assi.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 21   34 |

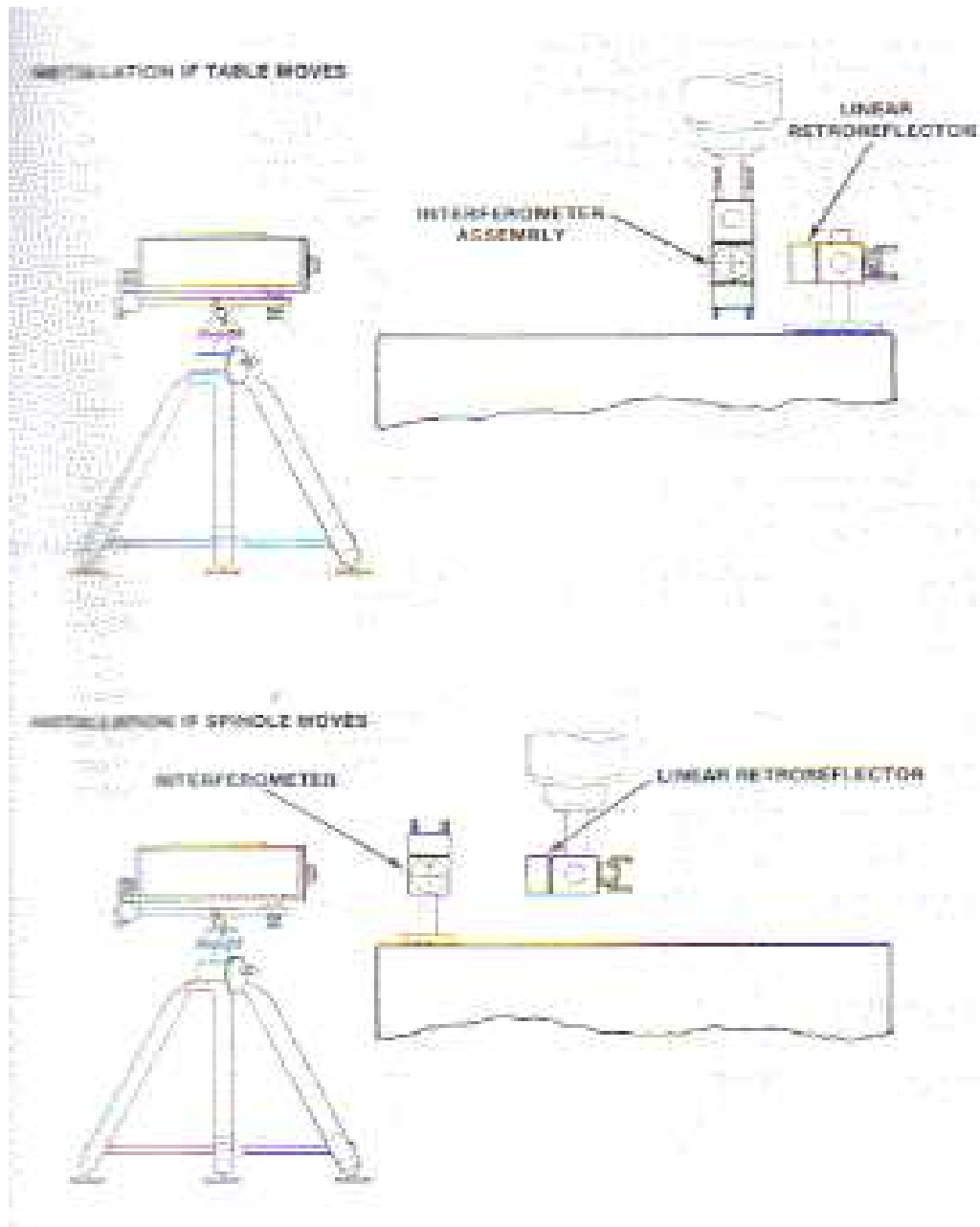


Figura 11 Posizionamento del gruppo ottico

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 22   34 |





- 4) Attaccare l'interferometro e il riflettore al registro di altezza e accomodare la posizione che si è scelta nel punto 3 (vedi figure 12 e 13).
  - 1) Per le lenti montate sul tavolo, supportare il pattino con la base. Se si pensa di effettuare misure di rettitudine o ortogonalità, successivamente, posizionare il registro di altezza sul pattino scorrevole in alto, in modo da consentire facili scambi delle lenti.
  - 2) Per le lenti montate sull'alberino, è possibile attaccare il pattino sul registro di altezza, come se fossero montate sul tavolo o girare il pattino nel registro di altezza dopo aver rimosso la manopola di regolazione zigrinata. Questo secondo arrangiamento, renderà più semplice il cambio delle lenti per la misura di rettitudine.
  - 3) Per lunghe distanze è importante ridurre il fascio (dispersione del fascio) assicurandosi che il raggio del laser non urti contro gli angoli del vetro del riflettore. Fare questo girando il riflettore in modo che nessun angolo sia verticale. Si possono vedere gli angoli come tre linee vicine al fronte della superficie del riflettore. Le altre tre linee sono linee riflesse. Questo aiuterà a massimizzare la rettitudine del fascio.
- 5) Selezionare la piccola apertura per la porta d'uscita della testa del laser, e girare la targa nella posizione sopra la parte inferiore della testa del laser (porta di ritorno)
- 6) Muovere l'interferometro nel fascio laser mentre è diretto verso la testa del laser. Posizionare l'interferometro della testa del laser in modo che il fascio di ritorno centri la testa del laser (targa della porta di ritorno).
- 7) Assicurare l'intero assemblaggio della macchina in modo che l'interferometro sia il più in squadra col fascio che di ritorno (rilevamento limite  $\pm 2^\circ$ , imbardata  $\pm 5^\circ$ ). I limiti di rilevamento sono implicitamente rispettati qualora si stia utilizzando il pattino col registro di altezza.
- 8) Posizionare il riflettore il più vicino possibile all'interferometro. Guardare di fronte alla testa del laser e aggiustare il riflettore fin quando il suo fascio di ritorno copre anche la targa della porta inferiore. Bloccare il percorso del fascio laser tra l'interferometro e il riflettore, per distinguere tra i due fasci di ritorno. (La freccia che rimane sul fronte della testa del laser è il fascio di ritorno dell'interferometro. Potrebbe aiutare cominciare l'allineamento dal lato del riflettore, verso l'interferometro).
- 9) Assicurare l'assemblaggio del riflettore alla macchina.
- 10) Attaccare le targhe all'interferometro e al riflettore, in modo che:
  - Il buco dell'interferometro sia centrato dal fascio
  - Le linee che si incrociano sulla targa del riflettore, siano anch'esse centrate dal fascio (vedi figura 14)
- 11) Siete dunque pronti ad allineare il laser al percorso ottico.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 23   34 |

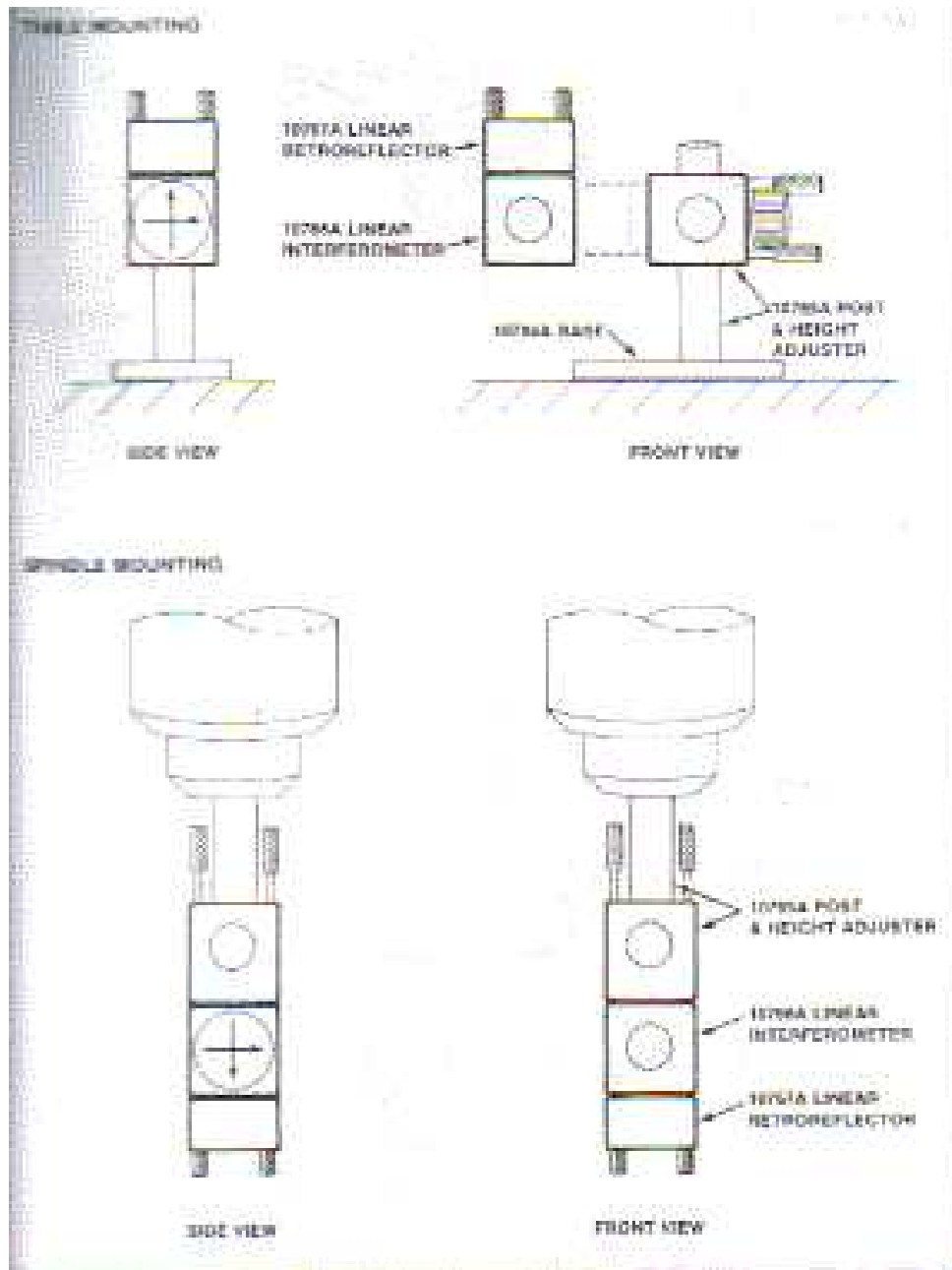


Figura 12 Montaggio dell'interferometro

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 24   34 |

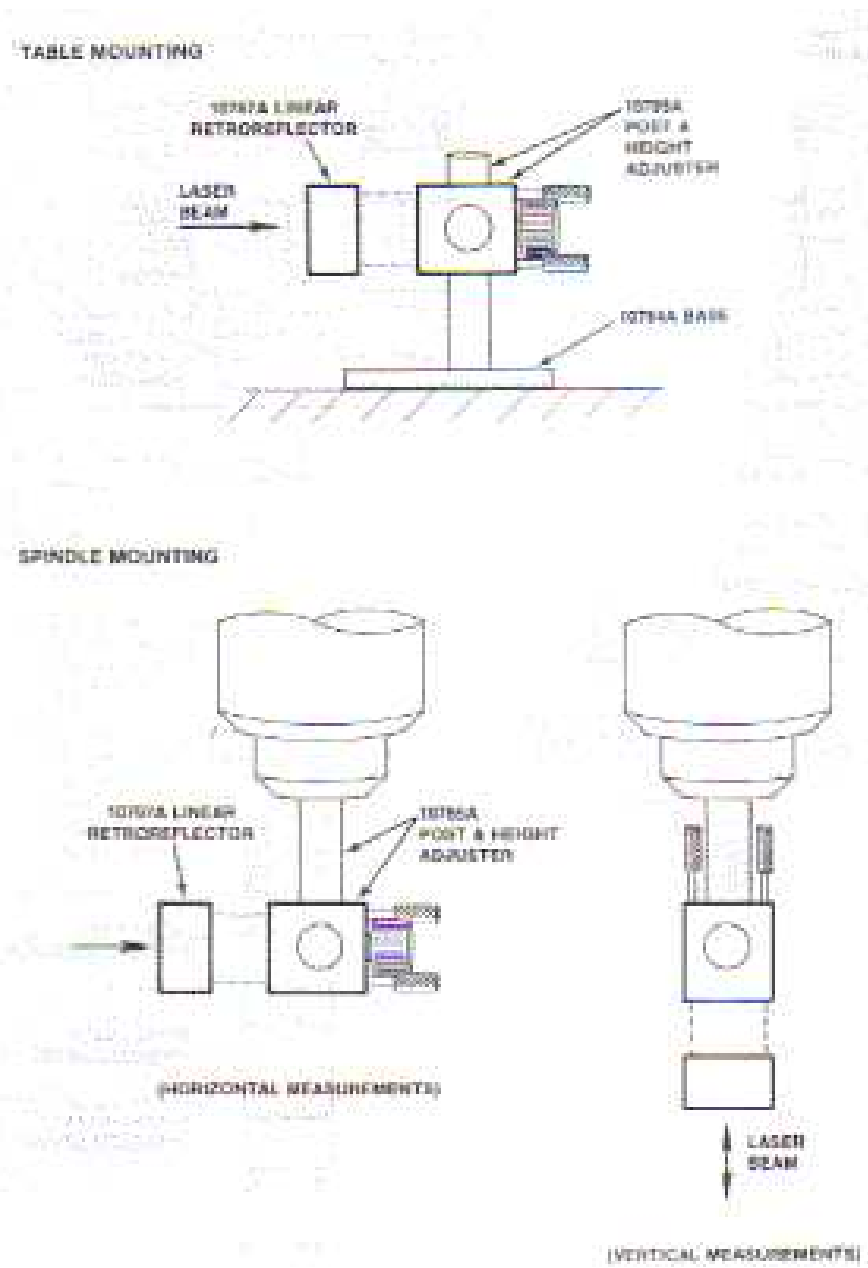
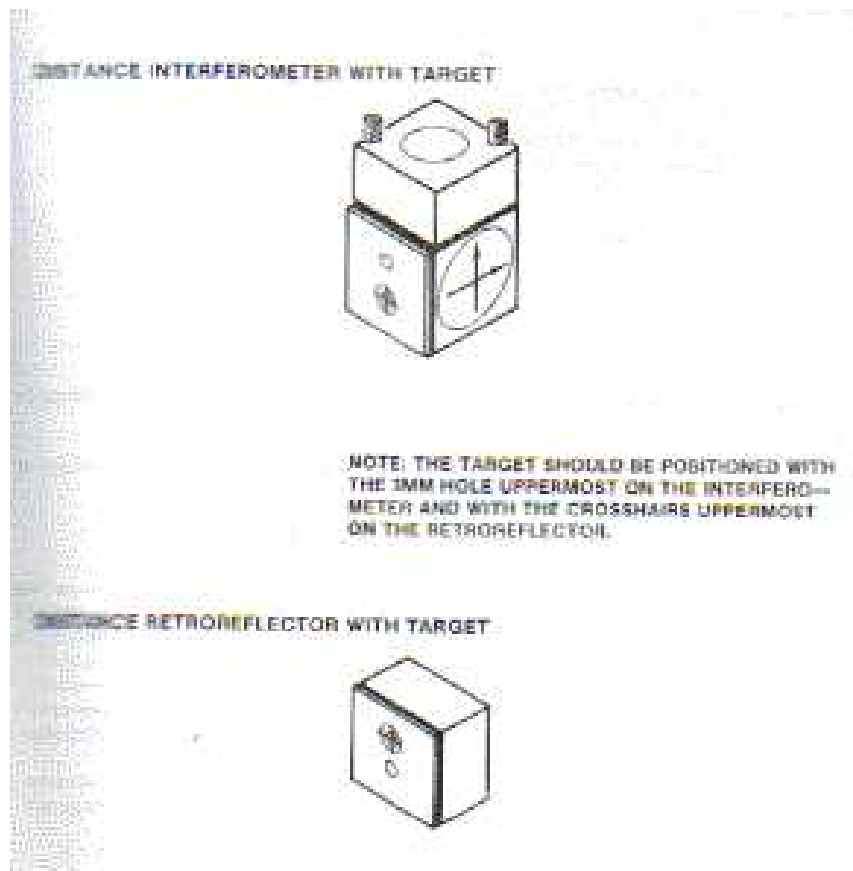


Figura 13 Montaggio schermo riflettente

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 25   34 |



**Figura 14 Interferometro e schermo riflettente**

3.3.4. Controllo rettitudine del fascio

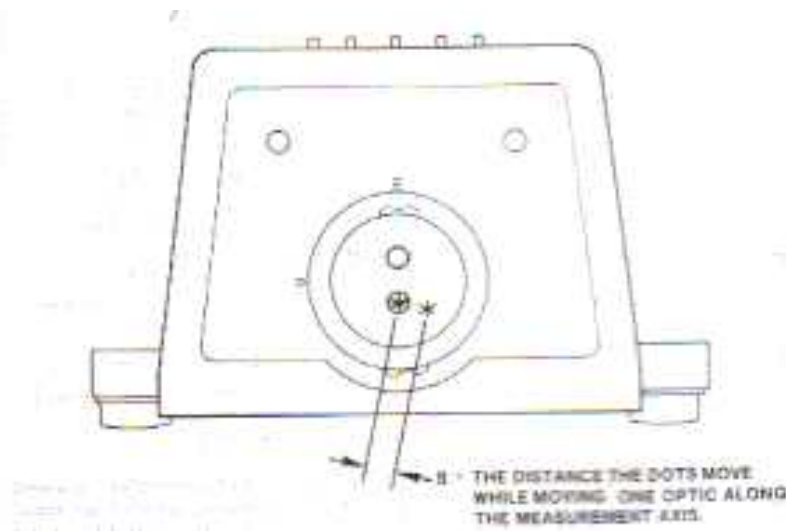
- Adesso ci si deve assicurare di avere un fascio sufficientemente dritto lungo tutto il percorso.
- Aprire entrambe le parti della testa del laser alla loro massima apertura.
- Muovere le lenti su tutta la lunghezza del percorso, controllando l'indicatore di rettitudine del fascio. Ogni lettura dell'indicatore che sta sull'area verde indica sufficiente rettitudine del fascio.
- Se la lettura dell'indicatore, va nell'area rossa, in qualsiasi istante, riportare le lenti nella posizione di "fine corsa del cammino ottico". Posizionarle e riposizionarle in modo che i fasci ricoprano le frecce poste sulla targhetta della testa del laser (dopo ruotare la targhetta nella posizione della porta di ritorno e ruotare la piccola apertura nella posizione della porta d'uscita). Dunque ripetere il controllo degli allineamenti.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 26   34 |

3.3.5. Controllo dell'allineamento per l'errore del coseno

- Rimuovere le targhette delle lenti, se queste sono usate. Assicurarsi che l'apertura della piccola porta d'uscita sia selezionata, dunque la targhetta della porta di ritorno è al suo posto.
- Osservare le due frecce sulla targa di ritorno della testa del laser. Le frecce potrebbero essere completamente ricoperte (si vede come una sola freccia).
- Muovere il pezzo che si sta misurando attraverso tutta la lunghezza del tragitto.
- Osservare quanto è il moto relativo tra le due frecce. Notare se esiste cambiamento nello spazio tra le frecce durante il tragitto, non lo spazio che c'è in origine. Una freccia, non dovrebbe muoversi, dipende da quale delle due è stazionaria. Se esiste moto relativo, l'errore di coseno è presente (vedi figura 15).
- Calcolare l'ammontare dell'errore del coseno, come segue:
  - a) Stabilire l'ammontare del moto relativo tra le frecce. Il movimento minimo percepibile è circa 0,25 mm. Questa è la distanza "S", della formula qui sotto.
  - b) Determinare la lunghezza della macchina (percorso ottico). Questo è il valore "D" della formula.
  - c) L'errore "E" di coseno, sarà:

$$E = \frac{S^2}{8D^2}, \text{ in parti per milione, oppure } E \times D, \text{ in termini assoluti.}$$



**Figura 15 Indicatore dell'errore del coseno**

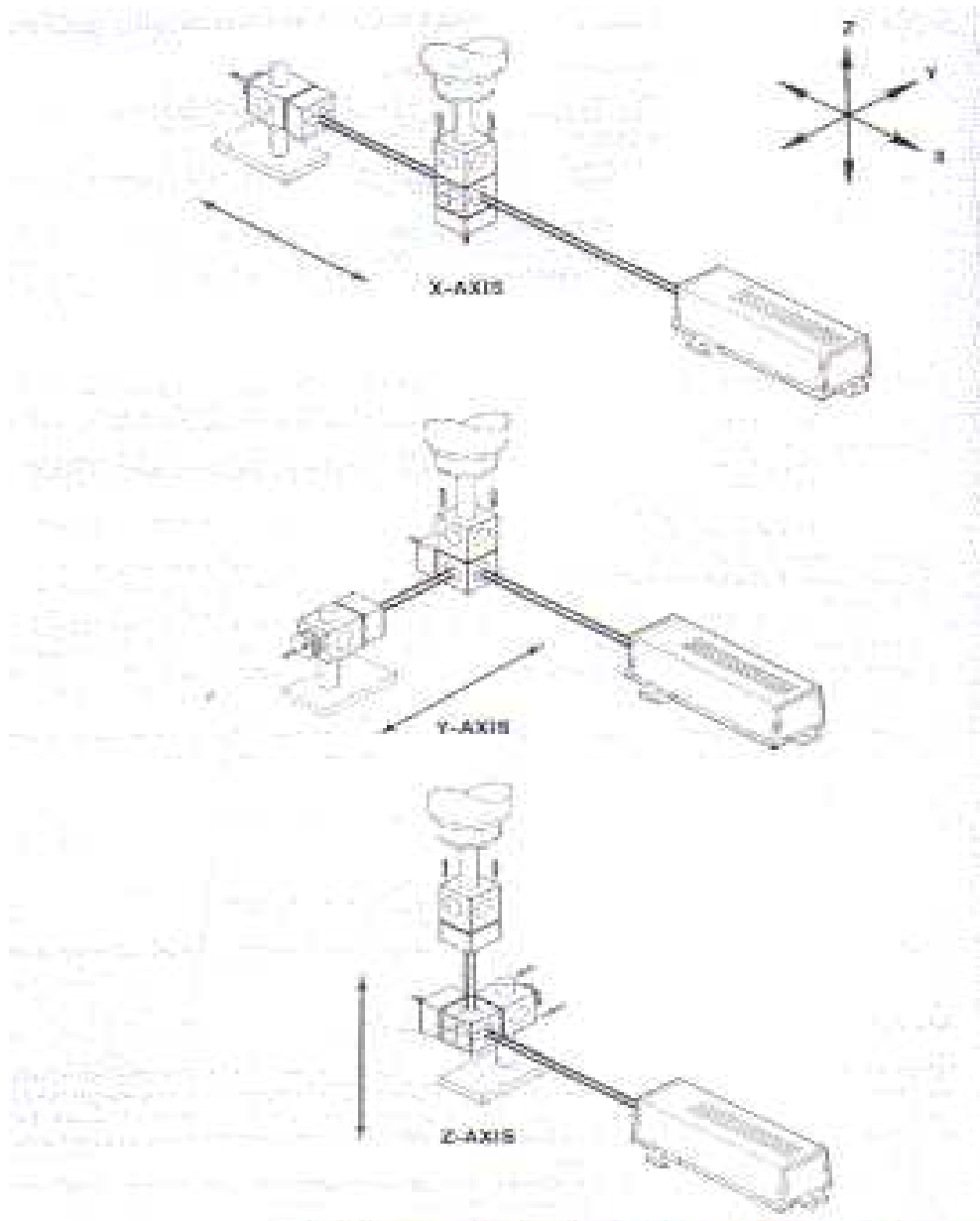
Usare le specifiche di riferimento per stabilire se l'errore del coseno, nella misura che si sta effettuando, è rilevante o meno. Se l'errore di coseno è maggiore del massimo consentito,

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 27   34 |

utilizzare il metodo della sovrapposizione delle frecce, per ridurre il moto relativo tra esse. In alcuni casi, dove la lunghezza del percorso ottico è molto corta, può sussistere l'errore del coseno, pur non essendovi moto relativo tra le frecce.

### 3.3.6. Misura lungo un'asse perpendicolare

Quando la misura di un'asse è perpendicolare al fascio laser, montare l'interferometro in linea col laser, alla fine dell'asse di misura (vedi fig.16)



**Figura 16** *Posizionamento ottico dei tre assi*

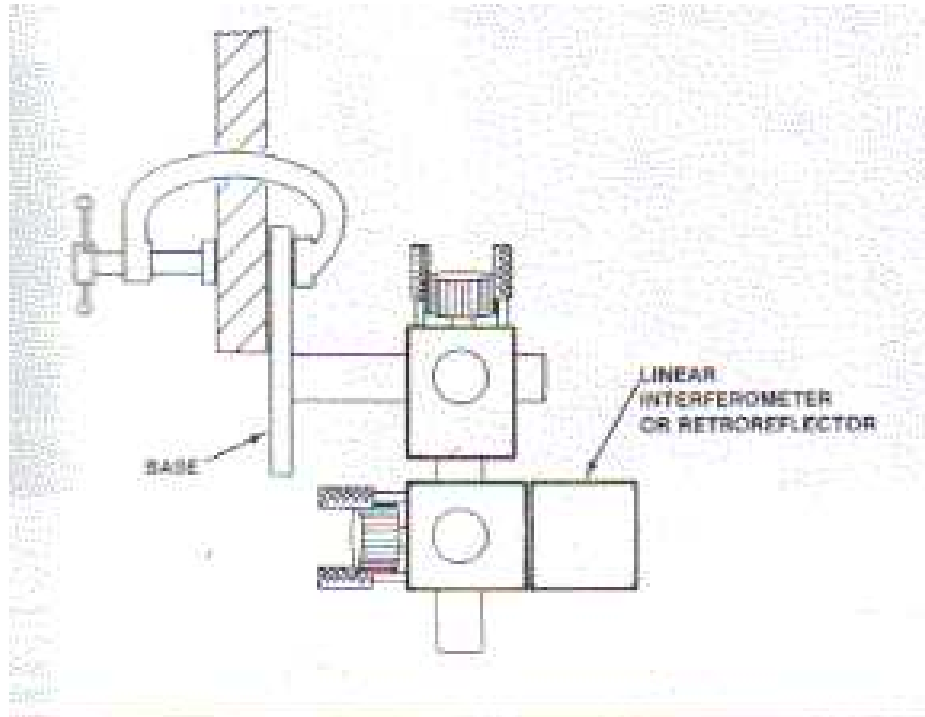
|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 28   34 |



Assicurarsi di ruotare l'interferometro in modo che le frecce siano allineate al fascio laser e all'asse di misura. Per allineare il sistema di misura lungo l'asse perpendicolare al fascio laser, attaccare la targhetta dell'interferometro all'apertura della faccia della testa del laser (vedi fig.14)

### 3.3.7. Altri accorgimenti nel montaggio

Oltre alla massima flessibilità illustrata del sistema di misura laser, possono esistere situazioni in cui occorre maggior capacità. La figura 17 mostra come si possono utilizzare questi strumenti.



**Figura 17** *Corretto angolo di montaggio*

## 3.4. Impostazioni del display di misura, uso di sensori

### 3.4.1. selezione "unità di misura"

Il monitor del sistema di misura, può dare risultati con unità di misura inglesi o metriche. Si può impostare la selezione tramite il selettore sul pannello delle unità di misura posteriore. Per cambiare il settaggio dell'unità di misura sul pannello posteriore, occorre prima sbloccare il selettore tirando gentilmente la leva, mantenendola nella sua posizione e infine muoverla nella posizione desiderata. Al termine dell'operazione posizionarla nella posizione di blocco.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 29   34 |





Quando si immettono dati tramite la tastiera del sistema di misura, ricordarsi di selezionare i valori appropriati alle unità di misura selezionate; inoltre è possibile utilizzare contemporaneamente misure metriche e inglesi. Se si cambia il settaggio dal pannello posteriore, tutti i valori precedentemente inseriti, saranno automaticamente convertiti nei rispettivi valori equivalenti nel nuovo sistema di misura. Provvedere a dare al sistema di misura le informazioni relative all'ambiente, le condizioni del materiale, al tempo della misura, usando la procedura appropriata, qui sotto che dipende dal numero di accessori connessi al sistema di misura.

### **3.5. Uso di sensori**

#### 3.5.1. Fissaggio dei sensori

I sensori d'aria e temperatura dovrebbero essere già posizionati (per prevenire possibili danneggiamenti al sistema, assicurarsi che la tensione sia scollegata prima di connettere o disconnettere i cablaggi al pannello posteriore).

#### 3.5.2. Disposizione dei sensori

Per ottenere corrette informazioni delle letture degli strumenti, occorre collocare i sensori dove possono accuratamente monitorare le condizioni che influenzano il laser. Il sensore d'aria (che monitorizza le condizioni atmosferiche), dovrebbe sempre essere montato il più vicino possibile al percorso di misura, in modo da rilevare le corrette condizioni termoidrodinamiche. Quando la temperatura è tale da determinare allungamento del materiale, il sensore di temperatura del materiale, deve essere messo sulla parte del corpo che si trova alla temperatura più influente sulla misura che si sta effettuando. Se si prende in considerazione la figura 18, il corretto posizionamento del sensore ambientale è attraverso il percorso ottico del laser, mentre il sensore di temperatura deve essere montato sul tavolo dato che esso può trasmettere la temperatura al pezzo con cui sta in contatto.

Nota: il sensore d'aria, per massimizzare la sua accuratezza, deve essere montato con le frecce che indicano verso l'alto.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 30   34 |



Figura 18 Disposizione dei sensori

### 3.5.3. Regolazione dell'umidità

Il sensore d'aria è dotato dell'interruttore situato sul lato (opposto al suo cavo di connessione). Si deve necessariamente posizionare la leva dell'interruttore in corrispondenza dell'umidità relativa dell'aria che si sta misurando). Le scelte sono 25%, 50%, o 75%.

## 3.6. Misurazioni

### 3.6.1. Controllo del sistema

- Assicurarsi che entrambe le porte della testa del laser abbiano le aperture grandi attive.
- La torretta della testa del laser deve essere settata su "OTHER".
- L'indicatore di lettura della testa del laser deve avere luce stazionaria (non deve lampeggiare).

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 31   34 |



- Assicurarsi che il sistema di misura laser sia propriamente interfacciato agli altri strumenti come necessita la registrazione che ci si appresta ad effettuare.
- Se si registrano i dati manualmente, non si necessita di interface.
- Se si vuole registrare automaticamente i dati, ma non si sta utilizzando un sistema di interfaccia dello stesso costruttore, bisogna assicurarsi che il sistema in questione sia compatibile col pannello di controllo remoto. Si deve anche assicurarsi che il monitor del sistema sia impostato per inviare i dati alla postazione remota.
- Occorre inoltre avere dei software adatti al tipo di misure che si sta effettuando, accompagnati da manuali d'uso.

#### 3.6.2. Procedura

- Premere l'azzeramento, sul monitor di misura, oppure sul telecomando connesso al monitor di misura. Ricordarsi di effettuare quest'operazione solo quando le lenti sono più vicine possibile tra loro, per prevenire l'errore di perdita del percorso ottico.
- Muovere le lenti a distanza predeterminata.
- Premere il pulsante di registrazione sul telecomando. Ogni volta che si preme il pulsante, una misurazione sarà effettuata.

### 3.7. Cosa influenza l'accuratezza?

L'accuratezza della misura della distanza del sistema di misura dipende dall'abilità del sistema di adeguarsi ai cambiamenti dell'ambiente di misura e dall'abilità dell'operatore a settare il sistema correttamente. Saranno descritti i potenziali errori di misura e le cause che li determinano, oltre a cosa può essere fatto per massimizzare l'accuratezza della misura.

Il sistema di misura laser ha un accuratezza di 0,1 ppm. Tutti gli errori di misura devono essere addizionati di questo valore.

#### 3.7.1. Errori dovuti alla distanza della misura

Le sorgenti di errore dovuti alla distanza, sono:

- Misura della temperatura dell'aria, pressione, e umidità, per determinare la velocità della luce (compensazione V.O.L.).
- Misura della temperatura del materiale.
- Allineamento tra il tragitto della macchina e l'asse di misura del laser (errore di coseno).
- Errori dovuti alla mancata compensazione delle lenti lungo il percorso ottico (errore di fincorsa).

L'accumulo di tutti gli errori di misura, determina il calcolo totale dell'accuratezza del sistema di misura laser, della vostra applicazione.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 32   34 |



### 3.7.2. Compensazione della velocità della luce

La lunghezza d'onda della luce prodotta dal laser è usata come referenza della distanza di misura. La lunghezza d'onda di qualsiasi luce, dipende comunque dalla velocità della luce che attraversa l'aria. Questo, di conseguenza, dipende dalla temperatura, pressione e umidità. Pertanto, l'accuratezza assoluta del sistema di misura del laser, è determinata direttamente da quanto sono accurate e conosciute le condizioni ambientali. Specificatamente, la misura di distanza può variare di un ppm, per ognuna di queste cose:

- Variazione della temperatura ambiente di 1 °C
- Variazione della pressione ambiente di 2,5 mm di colonna di mercurio
- Variazione del 30% dell'umidità relativa

#### 3.7.2.1. Minimizzazione degli effetti

Il monitor del sistema di misura, moltiplica il numero della lunghezza d'onda, che è considerato (dalla testa del laser) attraverso fattori di compensazione che dipendono dalla velocità della luce, nelle condizioni dell'aria circostante, quindi corretti per ogni differenza tra la velocità della luce in aria, rispetto alla velocità della luce nel vuoto. Questo fattore di calibrazione, può essere determinato e immesso anche tramite la tastiera. Il sensore d'aria, dà automaticamente il fattore di calibrazione al monitor.

### 3.7.3. Misura della temperatura dei materiali

Molti materiali cambiano misura a seconda del cambiamento della temperatura. Se una parte è misurata a due diverse temperature, il risultato saranno due diverse misurazioni (ovviamente, a meno che la lunghezza d'onda, non cambi dello stesso tasso). Questa differenza può facilmente essere dello 0,01%. Ciò è causa del più significativo errore che è possibile commettere, nella misura di distanze. Errori di misura sono dovuti all'allungamento o contrazione del materiale a causa di un fenomeno termico non controllato. Idealmente ogni misurazione fatta col laser deve essere effettuata in una ambiente controllato termicamente (riferimento 20 °C). In queste condizioni, tutte le parti avranno la loro misura standard. Dal momento che non sempre è possibile effettuare le misure in ambienti controllati, alcuni modi per comparare le misure fatte a differenti temperature, sono necessari. L'importante è che si deve conoscere la temperatura del materiale al momento della misura. Questa affermazione, insieme al coefficiente di dilatazione termica, del materiale, consente di determinare la variazione delle misure effettuate a diverse temperature.

|      |             |             |             |        |         |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|---------|
|      |             |             |             |        |         |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina  |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 33   34 |



### 3.7.3.1. Minimizzazione degli effetti

Il sistema di misura laser, può minimizzare automaticamente gli effetti dovuti alle variazioni di temperatura, sulle misure effettuate. Ciò è ottenibile, aggiustando la misura effettuata attraverso il valore ipotetico della misura, se questa fosse effettuata alle condizioni standard (20 °C), fornendo temperatura dell'ambiente, al tempo della misura, e coefficiente di dilatazione termica del materiale. Per aggiustare la misura, occorre:

- Controllare il coefficiente di dilatazione termica del materiale.
- Inserire il valore tramite il pannello di controllo del sistema.
- Determinare la temperatura del materiale (attraverso il sensore di temperatura o tramite altri metodi).
- Inserire la temperatura del materiale nel monitor (non necessario attraverso il sensore di temperatura).

|      |             |             |             |        |                      |
|------|-------------|-------------|-------------|--------|----------------------|
|      |             |             |             |        |                      |
| 0    | Emesso      | R.Curtatone |             | Lingua | Pagina               |
| Rev. | Descrizione | Preparato   | Controllato | I      | 34                   |
|      |             |             |             |        | <b>!Syntax Error</b> |