

# MISURE DI SPOSTAMENTO

## Introduzione

Le misure di spostamento sono misure diffuse sia a livello industriale che di applicazioni domestiche. Le misure di spostamento possono essere suddivise in categorie a partire da diversi parametri:

- Lineari = spostamento lungo una linea retta / Angolari = misure di rotazione
- Misure quasi statiche / Tempovarianti (o dinamiche)

I trasduttori di spostamento possono essere suddivisi secondo diverse categorie:

- Analogico/digitale = analogico nel funzionamento e seguiti da un convertitore A/D
- A contattato/senza contatto = misurano lo spostamento relativo tra lo statore e il tasto sonda. Misurano dunque lo spostamento dell'oggetto rispetto a qualcos'altro. È spesso negativo perché richiede la presenza di un punto di riferimento a cui ancorare lo stato del trasduttore, ciò implica che spesso non è facile ricavare lo spostamento assoluto di oggetti.
- Principio fisico dello strumento

## Misure di spostamento a contatto

### Trasduttori di spostamento resistivi

La prima tipologia di trasduttori di spostamento a contatto è rappresentata dai trasduttori di spostamento resistivi. Tra questi la principale categoria è quella dei potenziometri. Il trasduttore di spostamento potenziometrico basa il suo principio di funzionamento sul partitore di tensione. Esso è composto da una resistenza elettrica  $R_{tot}$ , formata ad esempio da un filo conduttore avvolto attorno ad una barra non conduttrice, oppure da un unico conduttore. Questa resistenza è alimentata da una tensione  $E_0$ . Nella porzione di cavo sotto la resistenza non c'è tensione perché il punto è messo a terra, dunque nella porzione di cavo prima della resistenza è concentrata tutta la tensione fornita dall'alimentatore. Se si misura poi con l'ausilio di un voltmetro la tensione a metà della resistenza si nota che questa sarà pari alla metà della tensione erogata dal generatore. Intuiamo dunque che la quantità di tensione in una determinata porzione del circuito dipenderà anche dalla quantità di resistenza considerata. Indichiamo con  $R_x$  la porzione di resistenza che si sta considerando. A seconda della posizione del voltmetro è possibile avere tensioni diverse e quindi dalla tensione misura si può dedurre la posizione che si sta analizzando. I potenziometri sono trasduttori che si basano proprio su questo principio di funzionamento (quello del partitore di tensione).

$$R_x = R_{tot} \frac{x}{l_0}$$

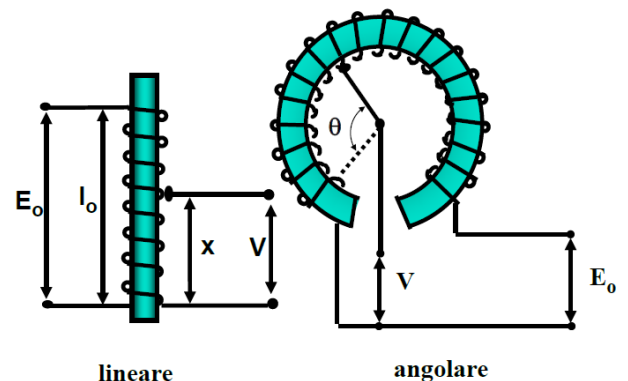
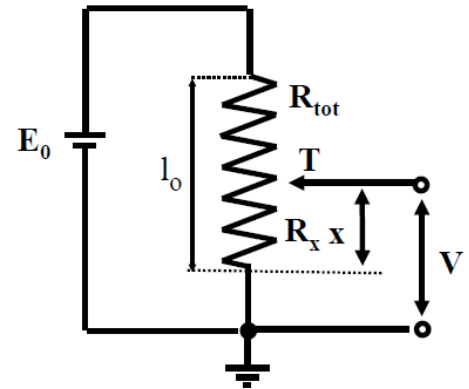
$$i = \frac{E_0}{R_{tot}}$$

$$V = R_x i = R_{tot} \frac{x}{l_0} * \frac{E_0}{R_{tot}} = \frac{x}{l_0} E_0$$

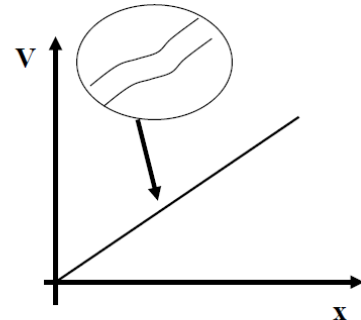
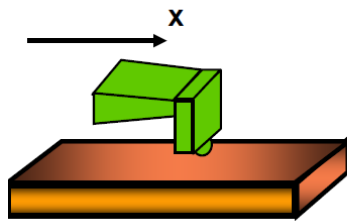
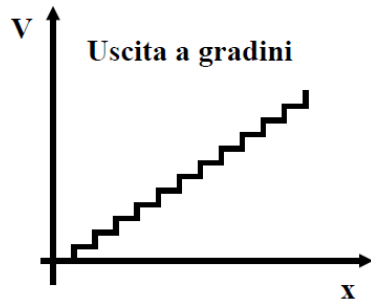
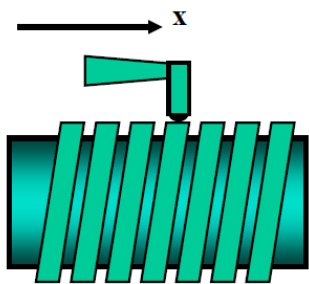
$$x = \frac{V}{E_0} l_0$$

Su questo principio è possibile realizzare potenziometri per misure:

- Lineari
- Angolari



Se la resistenza è realizzata per mezzo di spire avvolte, lo spostamento del tastatore genererà un'uscita a gradini in funzione dello spostamento: questo perché la tensione in uscita non varia fintanto che il tastatore non "salta" da una spira alla successiva. In corrispondenza del salto fra spire si genera invece un gradino di tensione in uscita. I potenziometri sono realizzabili anche senza la spirale di materiale conduttore, ma basandosi su una lamina di materiale conduttore con resistività abbastanza elevata. In questo caso il tastatore non è soggetto a saltellamenti; in teoria si ha una risoluzione infinita anche se in pratica non è così nonostante sia più precisa del caso precedente.



Risoluzione:  $\frac{l_0}{n}$

n: numero di spire

Risoluzione: infinita (teorica)

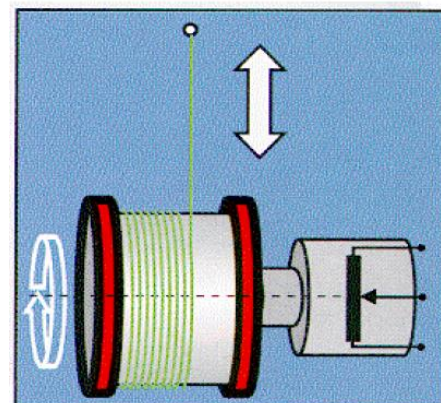
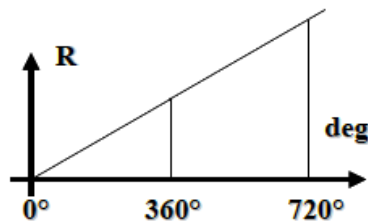
Analizziamo ora più nello specifico il potenziometro angolare. Nel montaggio di un trasduttore angolare occorre fare attenzione a montare l'asse del trasduttore coincidente con l'asse di rotazione. Visto che spesso non è possibile avere una perfetta coincidenza, si utilizza in genere un giunto elastico, che permette piccoli disallineamenti, ma trasmette la rotazione: in questo modo il trasduttore misura in modo corretto la rotazione dell'albero a cui è calettato. Questi tipi di trasduttori possono essere di due diversi tipi:

1. A giri infiniti: è possibile applicare all'albero del trasduttore infiniti giri. In questo caso il trasduttore misura solo la posizione angolare fra un angolo zero (di riferimento convenzionale) e l'angolo giro. Se si applica al trasduttore N giri interi + 30° la misura sarà uguale a quella che si avrebbe applicando solo una rotazione di 30°. In questo tipo di trasduttori è presente dunque una perdita di segnale
2. A giri finiti: in questo caso il trasduttore misura anche angoli maggiori di un angolo giro. Sono trasduttori che misurano da un angolo assunto come zero, fino ad un massimo di N giri. Non si può applicare una rotazione maggiore di N giri a causa della presenza di un blocco, tuttavia il trasduttore rileva non solo la frazione di giro effettuata ma anche tutti i giri precedenti.

### Giri infiniti



### Giri finiti



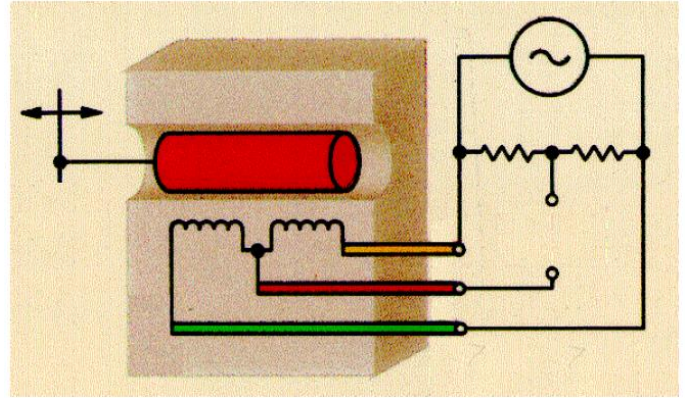
È possibile utilizzare un trasduttore angolare per eseguire misure lineari. Tali strumenti sono costituiti da un rocchetto su cui è avvolto del filo che, srotolandosi, permette di effettuare una misura lineare tramite la misurazione dell'angolo di rotazione del rocchetto stesso. Tramite questo tipo di strumento si ottiene una misura di spostamento con fondo scala elevato, senza la necessità di avere un

trasduttore ingombrante. Dunque il principale vantaggio di questo tipo di potenziometro è che permette di misurare spostamenti estremamente elevati avendo un ingombro estremamente ridotto. Lo spostamento viene misurato come il prodotto tra l'angolo  $\alpha$  di rotazione dell'albero su cui è agganciato il rocchetto e il raggio del rocchetto stesso:

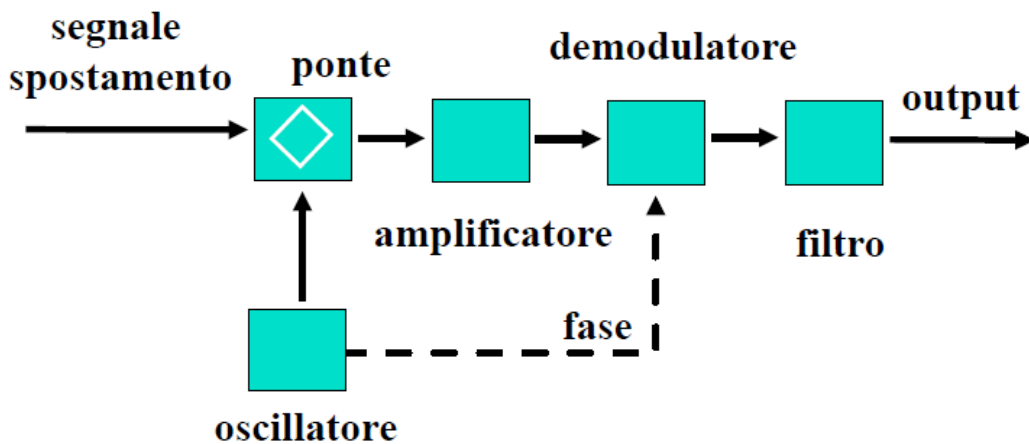
$$x = \alpha \frac{D}{2}$$

### Trasduttori di spostamento induttivi

Un traduttore induttivo è costituito da una parte metallica ferromagnetica che può scorrere all'interno di un involucro. Su questo involucro sono avvolte due bobine: una che occupa la metà di sinistra e una che occupa la metà di destra. Spostando il nucleo ferromagnetico si crea una variazione dell'induttanza delle bobine: l'induttanza di una bobina cresce man mano che il nucleo entra nella bobina stessa. Dunque, ad esempio, se il cilindro di materiale ferromagnetico si sposta all'interno dell'involucro verso sinistra diminuirà l'induttanza della bobina di destra e aumenterà quella della bobina di sinistra; questo perché il valore dell'induttanza delle bobine dipenderà dalla quantità di materiale ferromagnetico al loro interno. Quando il nucleo è in posizione intermedia, e quindi quando è inserito nelle due bobine della stessa quantità, il ponte risulta bilanciato. Le bobine sono collegate in serie tra loro e nel circuito sono inoltre presenti due impedenze: si ha quindi un circuito che è il ponte di Wheatstone poiché sono presenti 4 lati che formano una maglia e sono presenti le due diagonali quella di misura e quella di alimentazione. I trasduttori a spostamento induttivi misurano uno spostamento valutando la variazione di induttanza. Affinché tutto possa funzionare correttamente il ponte deve essere alimentato solo in alternata (poiché sono presenti delle induttanze). Anche con questi traduttori occorre avere un demodulatore. **Il fatto di avere due bobine in serie permette di raddoppiare la sensibilità: infatti mentre aumenta una bobina, diminuisce l'altra.**

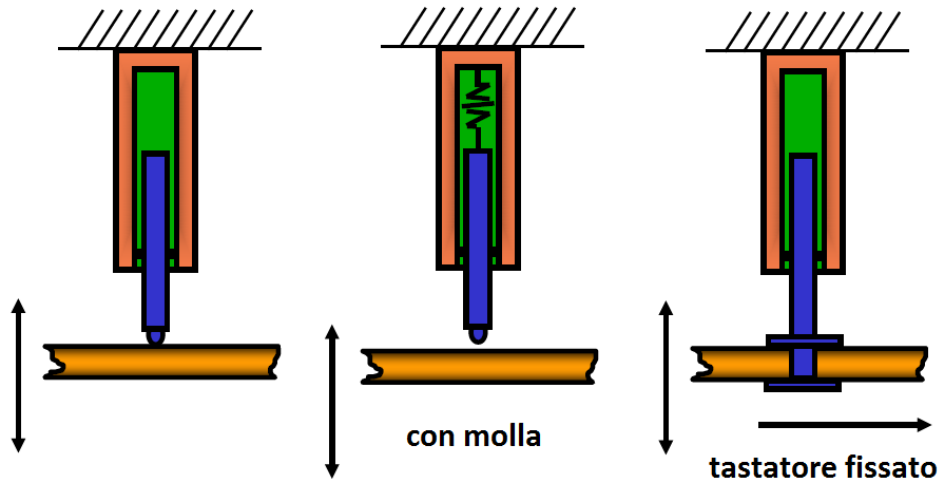


Quando il nucleo è in posizione intermedia, e quindi quando è inserito nelle due bobine della stessa quantità, il ponte risulta bilanciato. Le bobine sono collegate in serie tra loro e nel circuito sono inoltre presenti due impedenze: si ha quindi un circuito che è il ponte di Wheatstone poiché sono presenti 4 lati che formano una maglia e sono presenti le due diagonali quella di misura e quella di alimentazione. I trasduttori a spostamento induttivi misurano uno spostamento valutando la variazione di induttanza. Affinché tutto possa funzionare correttamente il ponte deve essere alimentato solo in alternata (poiché sono presenti delle induttanze). Anche con questi traduttori occorre avere un demodulatore. **Il fatto di avere due bobine in serie permette di raddoppiare la sensibilità: infatti mentre aumenta una bobina, diminuisce l'altra.**



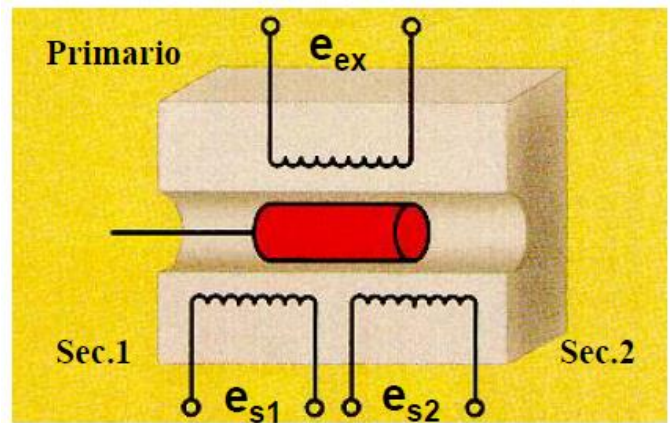
Analizziamo ora i problemi di montaggio di un trasduttore di spostamento induttivo. Se il trasduttore ha il tastatore semplicemente appoggiato non si hanno significativi effetti di carico tuttavia si ha un limite: il misurando non deve abbassarsi con un'accelerazione maggiore di quella di gravità, altrimenti il tastatore si distacca dal misurando. Successivamente il tastatore tornerà a contatto con il misurando, creando rimbalzi del tastatore stesso. Dunque si ha un saltellamento del tasto sonda se l'accelerazione dell'elemento vibrante è maggiore di quella di gravità. Per mantenere il tastatore a contatto con il misurando anche per accelerazioni molto elevate occorre montare una molla. Tale molla permette quindi di mantenere il tastatore a contatto con il misurando anche per accelerazione maggiori di quelle di gravità. Il precario dato dalla molla è in genere di pochi newton, tuttavia si può avere un effetto di carico, soprattutto se

il misurando è molto leggero e sottile. Un'altra soluzione consisterebbe nel fissare il tastatore al misurando con un collegamento filettato. Il problema di questo caso è che il misurando non è più libero di muoversi in direzione ortogonale all'asse di misura.



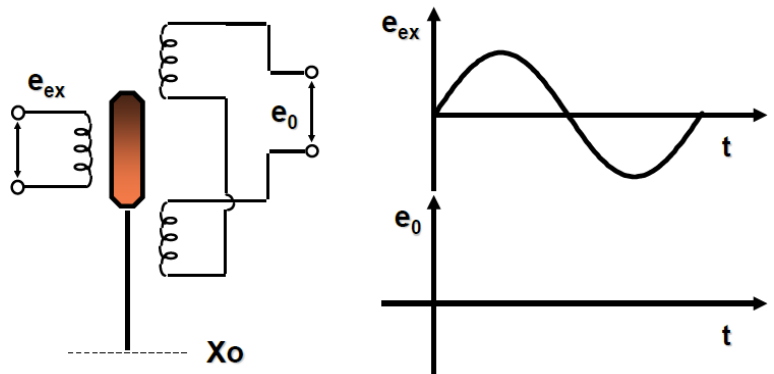
### Trasduttori di spostamento a trasformatore differenziale variabile (LVDT)

Il trasduttore di spostamento a trasformatore differenziale ha la stessa struttura di base del trasduttore a spostamento induttivo con però una bobina in più avvolta sopra le altre due. Tali trasduttori si basano però su un principio completamente diverso da quello usato per i trasduttori induttivi; in questo caso si basano infatti sul principio del trasformatore differenziale: alimentando il primario (cioè la bobina che si avvolge sopra le altre due) viene generata una tensione nel secondario (le due bobine sotto il primario) che sarà maggiore o minore di quella del primario in base al numero di avvolgimenti. Generalmente se il numero di avvolgimenti è ridotto si abbassa la tensione, al contrario se è elevato, la tensione aumenta. La cosa importante da sottolineare è che

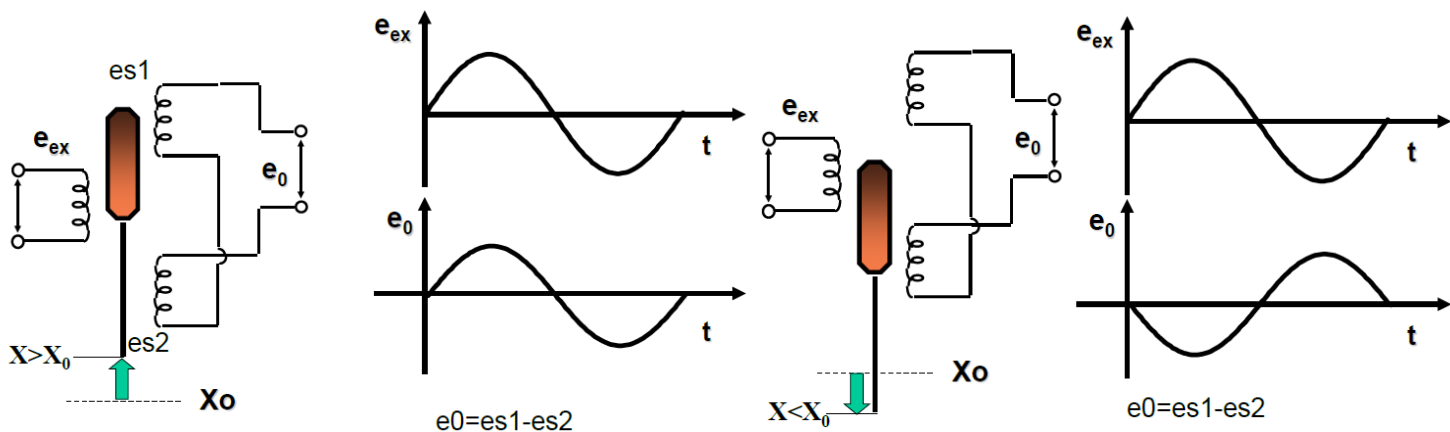


quando viene alimentato in alternata il primario si genera un campo magnetico che concatena la parte delle due bobine che è riempita dal materiale ferromagnetico; quando il materiale ferromagnetico si sposta a sinistra, accoppia l'avvolgimento primario maggiormente con il secondario 1 (se il materiale ferromagnetico si sposta a sinistra la maggior parte del flusso si concatena alla bobina secondaria di sinistra) e quindi induce sul secondario 1 una tensione maggiore di quella che induce sul secondario 2. Quando il materiale ferromagnetico si pone in posizione intermedia, le tensioni indotte su due secondari sono equivalenti, mentre quando si posta a destra induce una tensione maggiore del secondario 2. Misurando le tensioni ai due secondari ed elaborando i dati si può stimare la posizione del materiale ferromagnetico. Se le due tensioni fossero uguali il materiale ferromagnetico sarebbe esattamente a metà; in questo

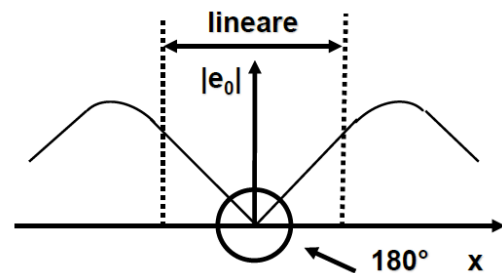
caso la tensione in uscita sarebbe quindi nulla questo perché la tensione in uscita è la differenza tra le tensioni delle due bobine. Le due bobine non solo collegate tra loro in serie ma in contro serie: il capo inferiore della seconda bobina si collega con il capo superiore della prima bobina. Collegando i due secondari in controserie si ottiene in uscita la differenza delle tensioni dei due secondari. Quindi nel caso di nucleo in posizione intermedia la tensione complessiva sarà  $e_0 = e_{s1} - e_{s2}$ , ma essendo  $e_{s1} = e_{s2}$  si ha uscita nulla. Se il nucleo ferromagnetico si sposta verso l'alto, accoppia maggiormente il



primario con il secondario 1. Quindi  $e_{s1} > e_{s2}$ . In definitiva, essendo  $e_0 = e_{s1} - e_{s2}$ , si ha che  $e_0$  non è nulla, e assume valori di ampiezza crescenti al crescere dello spostamento del nucleo ferromagnetico rispetto alla posizione di zero (ovvero rispetto alla posizione di mezzeria fra le 2 bobine). Ovviamente  $e_0$  è un oscillante armonica ed ha la stessa frequenza di  $e_{ex}$ . Nel caso sotto disegnato, essendo il nucleo ferromagnetico infilato maggiormente nel secondario 1, il segnale  $e_0$  è positivo negli istanti in cui  $e_{ex}$  è positivo. Si ha una concordanza di segno istante per istante fra  $e_{ex}$  ed  $e_0$ . Nella misura, non sapremo a priori da che parte si è spostato il nucleo: se il segno di  $e_0$  è concorde istante per istante con il segno  $e_{ex}$ , significa che il nucleo si è spostato verso il secondario 1. Se invece i segni sono discordi, significa che il nucleo si è spostato verso il secondario 2 (seconda foto).

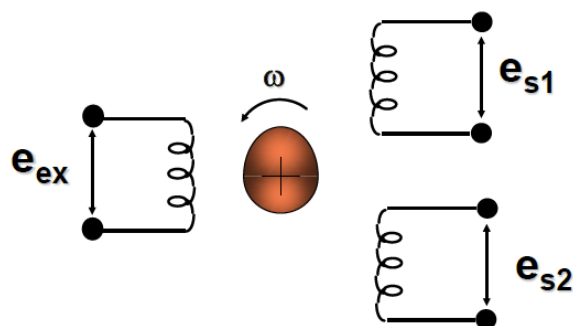


Sottolineiamo che il valore ampiezza in modulo del segnale di uscita  $e_0$  è lineare con lo spostamento solo fino a un limite di spostamento che dipende dalle caratteristiche costruttive del trasduttore, fra cui la lunghezza degli avvolgimenti.



### Trasduttori angolari a trasformatore differenziale

La differenza rispetto alla categoria precedente è che al posto del cilindro di materiale ferromagnetico la geometria è tale per cui l'accoppiamento tra primario e le due bobine secondarie si modifica in funzione della posizione angolare del materiale ferromagnetico.

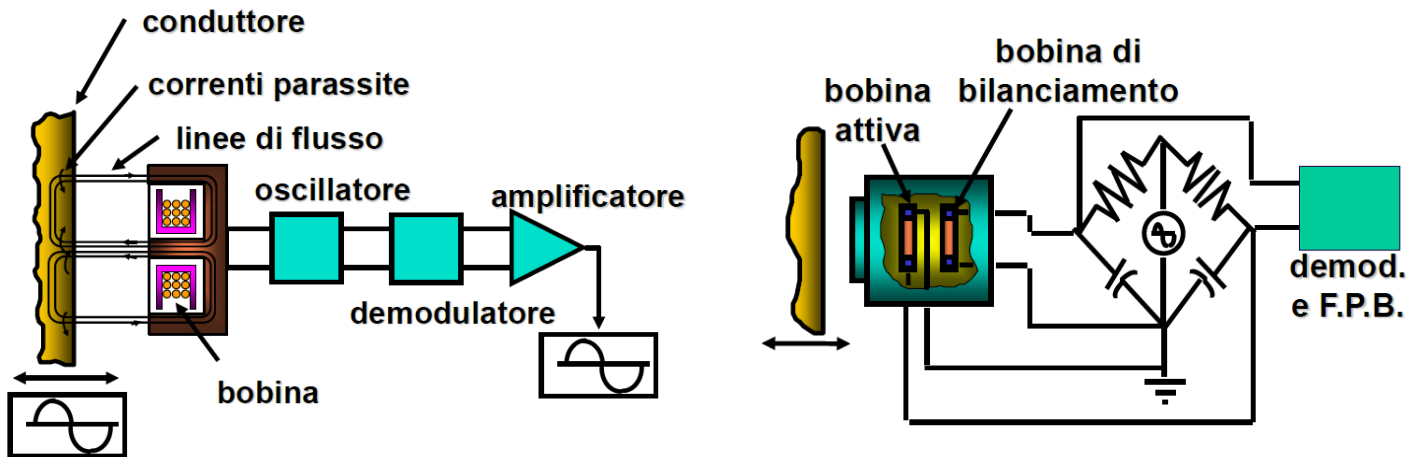


## Misure di spostamento senza contatto

### Trasduttori a correnti parassite

I trasduttori a correnti parassite sono composti, nella loro versione più semplice, da una bobina posta davanti a un materiale conduttore. La bobina è alimentata da un oscillatore cioè un circuito elettronico che genera tensione alternata; non appena viene percorsa dalla corrente alternata la bobina genera un campo magnetico variabile. Se vi sono materiali conduttori di fronte alla bobina, il campo magnetico induce delle correnti parassite sulla superficie del conduttore. L'intensità delle correnti indotte è maggiore se la distanza fra la bobina e il conduttore si riduce; dunque spostandosi verso il cuore del materiale l'intensità delle correnti indotte diminuiscono fino ad essere trascurabili. L'intensità delle correnti parassite dipende anche dal tipo di materiale conduttore e dalla frequenza di alimentazione; tanto più cresce la frequenza di alimentazione, tanto più le correnti parassite si concentrano sulla superficie del conduttore stesso. Questo effetto è detto "effetto di pelle". Convenzionalmente il 37% delle

correnti indotte si trovano fino a una profondità  $\delta$ . Il valore di  $\delta$  diventa sempre più piccolo quando la frequenza di alimentazione della bobina cresce. Cerchiamo ora di capire come misurare queste correnti indotte. Come abbiamo già detto le correnti parassite, indotte dalla bobina alimentata in alternata, hanno intensità maggiore se il conduttore è più vicino alla bobina. Dato che le correnti parassite modificano l'induttanza della bobina (perché creano a loro volta un campo elettromagnetico), misurando tale induttanza di ha un indice proporzionale alla distanza bobina-conduttore. Generalmente l'elettronica di condizionamento genera in uscita dal sensore un segnale analogico proporzionale all'induttanza della bobina, ma modulato dal segnale di alimentazione. Si ha quindi la necessità di un demodulatore e di un filtro passa-basso. È anche possibile realizzare trasduttori a correnti parassite con due bobine: una effettua la misura mentre l'altra è di bilanciamento delle variazioni di temperatura. Il condizionamento può essere fatto con un ponte di Wheatstone.



Come già accennato l'entità delle correnti parassite indotte dipende molto dal tipo di materiale e quindi delle sue caratteristiche fisiche. Il trasduttore va quindi tarato sullo specifico materiale. Il materiale su cui si effettua la misura deve ovviamente essere un conduttore perché altrimenti le correnti parassite non sono presenti. Lo svantaggio è che può non essere usato per tutti i materiali mentre il vantaggio è che se sono disposti dei materiali di disturbo tra il trasduttore e il materiale di cui si vuole misurare lo spostamento la misura non è intaccata. Applicazioni:

- Trasduttori di prossimità on-off
- Trasduttori di spostamento
- Ricerca difetti superficiali = difetti o cricche sul misurando limitano o modificano le correnti parassite e quindi modificano la misura. Il trasduttore viene appoggiato sulla superficie del materiale da controllare: questo genera delle correnti parassite che sono correnti che corrono sulla superficie del materiale; queste correnti modificano l'impedenza del trasduttore quindi c'è un certo valore di sbilanciamento del ponte. Facendo scorrere il trasduttore lungo il pezzo: se il pezzo è omogeneo la misura non varia, se vi sono delle cricche le correnti, intersecando la cricca, si riducono di intensità. Viene dunque misurata questa discontinuità elettrica che rileva una differente induttanza e quindi lo sbilanciamento sarà diverso. Più è grande la cricca più lo sbilanciamento sarà elevato.
- Riferimento di fase = misuro un certo valore e si conosce la posizione angolare a cui lo si ha

### Trasduttori capacitivi

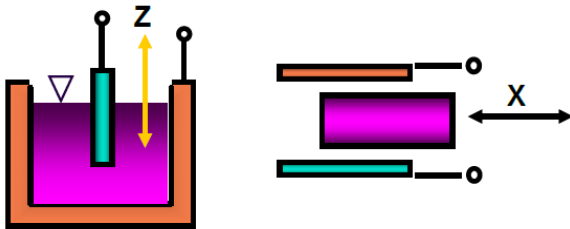
I trasduttori capacitivi sono misuratori senza contatto che effettuano misure di spostamento sfruttando una caratteristica elettrica: si basano sull'idea di misura di capacità di un condensatore. Se si affacciano due piastre metalliche separate da un dielettrico si crea un condensatore. La capacità di questo condensatore è proporzionale all'area delle due facce metalliche, è inversamente proporzionale alla distanza:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

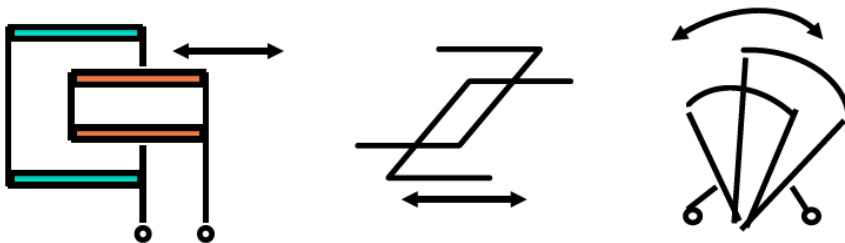
- dove:  $C$       capacità del condensatore  
 $\epsilon_0$       costante dielettrica dell'aria (del vuoto)  
 $\epsilon_r$       costante dielettrica del materiale tra le armature  
 $A$       area delle armature  
 $d$       distanza tra le armature

I trasduttori capacitivi misurano la distanza tra le due armature proprio misurando la capacità del condensatore. La capacità può variare in funzione di:

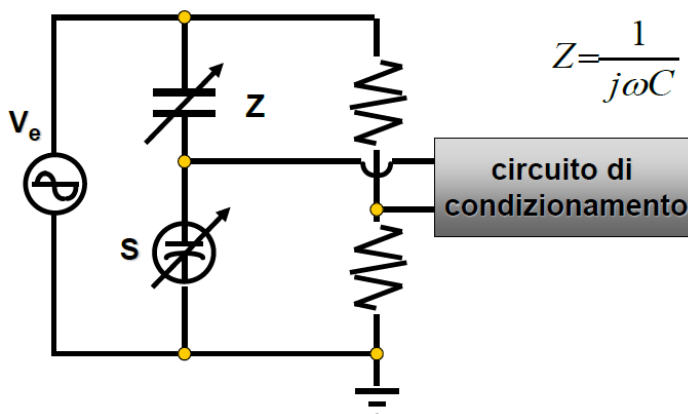
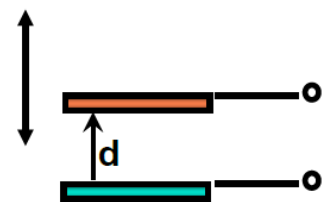
- $\epsilon_r$  = La capacità varia con il variare della percentuale di materiale dielettrico all'interno delle piastre. Cambiando la posizione del dielettrico cambia in modo proporzionale la capacità del condensatore. In questo caso dunque la capacità varia perché si modifica il valore della costante dielettrica del materiale: tale variazione avviene perché si modifica la percentuale di area delle armature fra le quali si trova il materiale da misurare. Il materiale tra le due armature può essere sia solido che liquido. Utilizzando un dielettrico liquido il condensatore si ottiene prendendo una barra di metallo e un contenitore conduttore che costituiscono le armature. Se questo serbatoio è riempito di dielettrico si ha una determinata capacità del condensatore. Variando il livello del fluido (cioè del dielettrico) si può variare il valore della capacità del condensatore.



- $A$  = le due armature possono scorrere l'una sulle altre dunque muovendo un'armatura rispetto all'altra senza cambiare la distanza relativa varia la capacità. Tale valore cambia perché si modifica il valore dell'area delle due armature che si trova affacciata.



- $d$  = in questo caso la capacità varia perché si modifica la distanza fra le armature. È possibile realizzare una delle armature del condensatore direttamente sul misurando e misurare la distanza  $d$ . Per la misura della capacità del sensore spesso si utilizza il ponte di Wheatstone capacitivo: si mettono nel circuito due impedenze fisse e due che possono variare.



Vediamo ora i vantaggi di questo tipo di trasduttori:

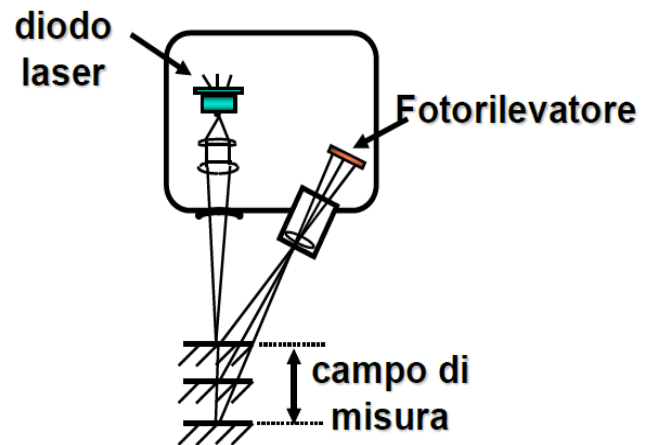
- Elevata sensibilità e stabilità
- Poco sensibili alle variazioni di temperatura

Gli svantaggi invece sono:

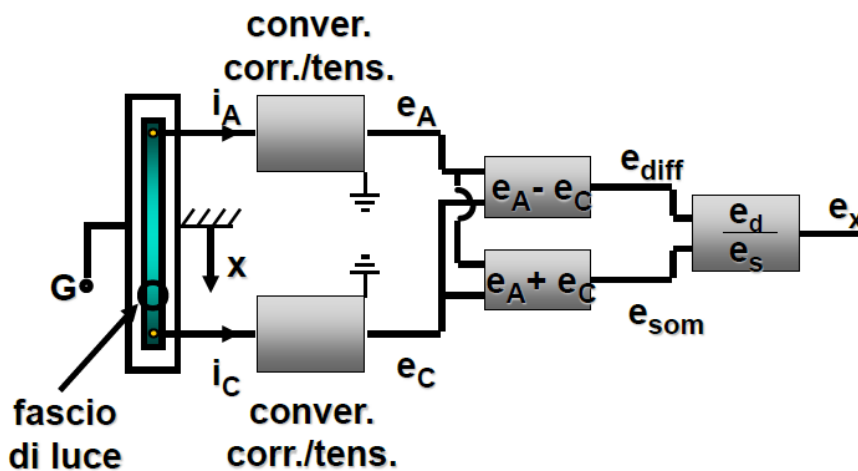
- Sensibili alle variazioni di capacità del cavo
- Sensibili alle variazioni delle caratteristiche del dielettrico
- Elevata impedenza

### Laser a triangolazione

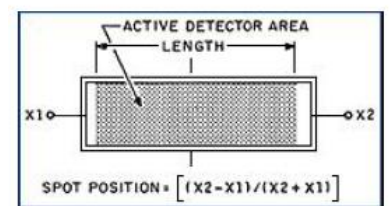
I laser a triangolazione sono misuratori di spostamento che si basano sul principio di triangolazione utilizzando una luce laser. Il diodo laser proietta un punto luminoso focalizzato sulla superficie dell'oggetto da misurare. Uno di questi raggi diffusi passerà attraverso uno strumento costituito da una superficie completamente opaca e un forellino infinitesimo, finendo poi nel fotorilevatore cioè un sensore. Sul rilevatore arriva dunque un punto luminoso in una posizione che dipende dalla posizione in cui si trova l'oggetto da misurare. Leggendo in che punto è arrivato il fascio luminoso sul rilevatore è possibile dunque dedurre in che posizione era l'oggetto. Se, ad esempio, il punto luminoso si trova tutto a destra all'ora l'oggetto sarà alla massima distanza, se tutto a sinistra sarà alla minima distanza e in mezzo si avrà un comportamento lineare. I fotorilevatori possono essere principalmente due:



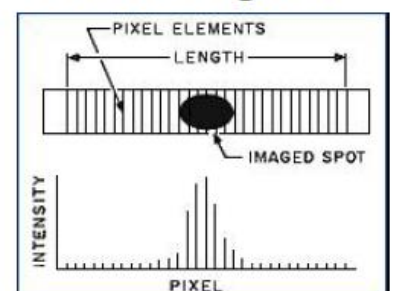
- Sensore analogico = agli estremi sono presenti dei collegamenti elettrici che, quando arriva la luce, generano delle microscopiche tensioni che hanno intensità differenti in base alla posizione: se è a destra l'uscita elettrica sarà maggiore verso destra, se è nel centro l'uscita elettrica sarà uguale in ambo i lati e viceversa. Conoscendo l'uscita elettrica si può dedurre la posizione originaria dell'oggetto; dunque la posizione dell'oggetto dipende dalla posizione del punto luminoso sul sensore analogico. Non dipenderà anche dall'intensità luminosa poiché l'uscita della triangolazione si ottiene come rapporto tra la differenza e la somma dell'intensità luminosa.



### Sensore analogico



### Sensore digitale



- Sensore digitale = è costituito da una serie di piccole cellette (migliaia) che sono sensori fotodiodi che misurano la quantità di intensità di luce che ricevono. Misurando questa intensità si ottiene un grafico. Facendo una serie di calcoli è possibile ricavare il baricentro che è il punto in cui incide il fascio luminoso cioè il picco di luminosità.

Si definisce tempo di integrazione il tempo impiegato dal laser per effettuare la misura. I laser a triangolazione possono essere usati per misurare delle vibrazioni,



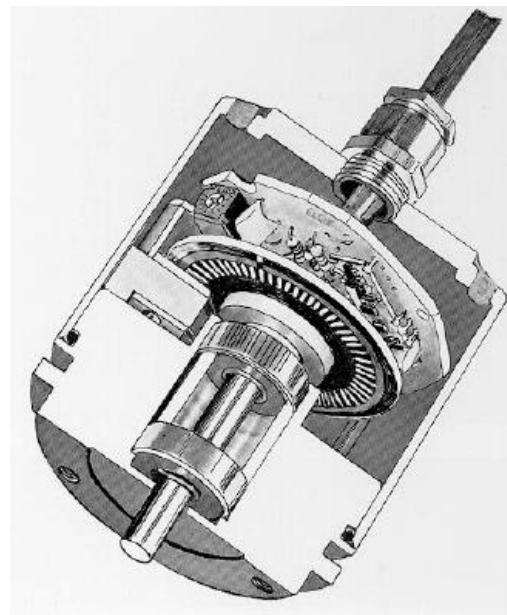
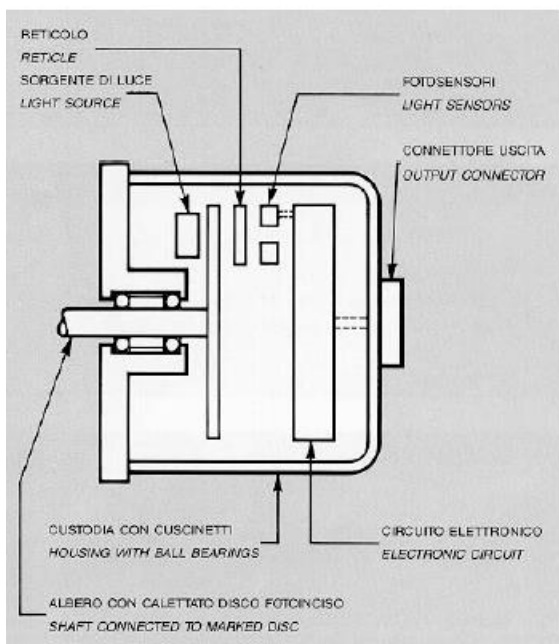
posizionare i bracci robot, effettuare misure di livello o misure di spessore e controllare i processi produttivi.

### Encoder: introduzione

Gli encoder sono misuratori di spostamento angolari. Gli encoder non sono a rigore misuratori senza contatto, in quanto normalmente sono a contatto il misurando; tuttavia il principio di funzionamento è senza contatto e non richiede dunque che ci sia un contatto tra l'oggetto da misurare e il misuratore. È costituito da un albero rotante e da un disco calettato. Il disco è opaco con delle tacche trasparenti che permettono il passaggio della luce. Il principio di base è il seguente:

- Una sorgente luminosa, ad esempio un led, genera della luce
- Il disco, munito di una corona di aree opache e trasparenti alterante è posto di fronte alla sorgente luminosa
- Un reticolo, anch'esso costituito da zone opache e da zone trasparenti alternate, con lo stesso passo di quello del disco, viene posto subito dopo il disco stesso
- Un fotosensore rileva l'intensità luminosa che attraversa sia il disco che il reticolo
- A seguito della rotazione del disco, si ha un'alternanza di intensità luminosa trasmessa elevata e bassa, l'uscita sarà quindi acceso o spento poiché misura luce ombra. Contando i cicli di crescita e decrescita della luminosità, si ha la stima dell'angolo di rotazione

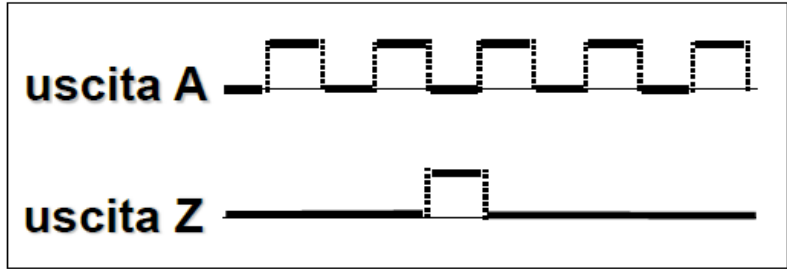
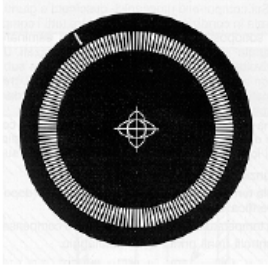
Il segnale di uscita è quindi costituito da una successione di  $N$  (= numero di incisioni) di impulsi per giro. Nella maggior parte di questi strumenti c'è un circuito elettronico che traduce il segnale ricevuto in una funzione quadra binarizzandolo. Sia che sia un encoder incrementale che uno assoluto, di cui parleremo più avanti, di solito l'uscita è un'onda quadra.



### Encoder: incrementali

Un tipo di encoder sono quelli incrementali; in questi strumenti non si ha la possibilità di avere la posizione angolare assoluta, ma solo l'incremento angolare da quando si inizia a contare gli impulsi dunque il riferimento angolare viene perduto se si interrompe l'alimentazione. In questa configurazione base non è possibile avere la stima del verso di rotazione. Esistono due tipi di encoder incrementali:

1. Monodirezionale = in questi tipi di encoder, aggiungendo un ulteriore corona di misura caratterizzata da una sola tacca trasparente, con un ulteriore fotorilevatore, si genera un'uscita Z (sarà 1 solo impulso per giro). Tale configurazione permette di sapere quando il disco dell'encoder passa per la posizione angolare di riferimento. Negli encoder incrementali monodirezionali si hanno quindi due uscite: uscita A che indica il numero degli impulsi per giro e l'uscita Z che indica l'impulso di riferimento.



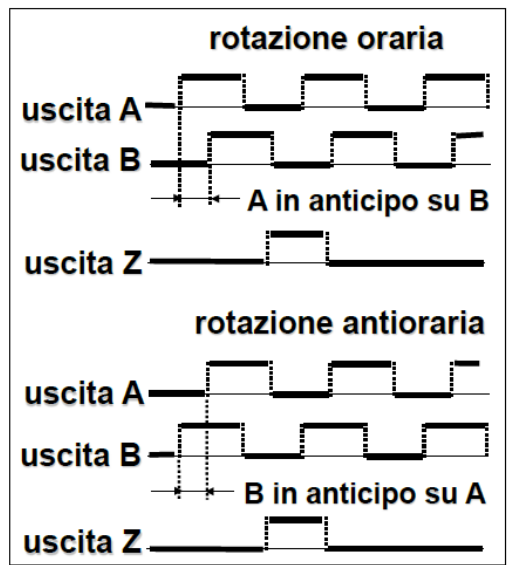
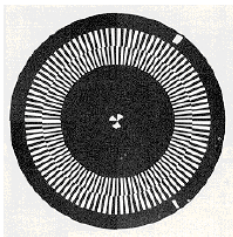
2. Bidirezionale = questi tipi di encoder permettono di ricavare anche il verso di rotazione dell'albero. Per ricavare la direzione di spostamento si utilizzano due tracce e quindi due fotorilevatori. Le tracce sono sfasate tra di loro di  $\frac{1}{4}$  del passo della griglia. Un passo della griglia corrisponde a un'intera tacca trasparente. Le tacche opache e quelle trasparenti hanno di solito la stessa larghezza, quindi  $\frac{1}{4}$  di passo corrisponde a metà della larghezza di una tacca. Con questo sfasamento di tacche si ottengono due segnali in uscita detti A e B. Analizzando quale dei due segnali commuta prima durante il moto si può riconoscere il verso di rotazione. In questi encoder è sempre presente l'uscita Z.

Negli encoder incrementali il numero massimo di incisione N che si possono realizzare dipende dal diametro del disco. Da N dipende la risoluzione angolare calcolata come:

$$\Delta\vartheta = \frac{360^\circ}{N}$$

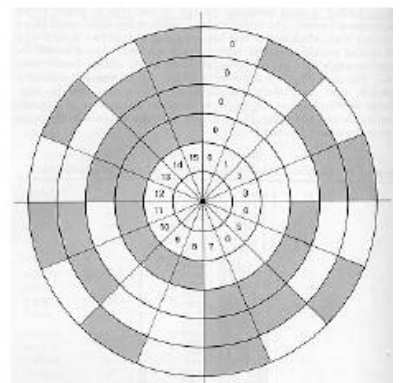
Tali strumenti possono essere utilizzati per misurare la velocità angolare di rotazione di un albero che può essere ricavata contando gli impulsi k dal riferimento Z:

$$\vartheta = k\Delta\vartheta$$



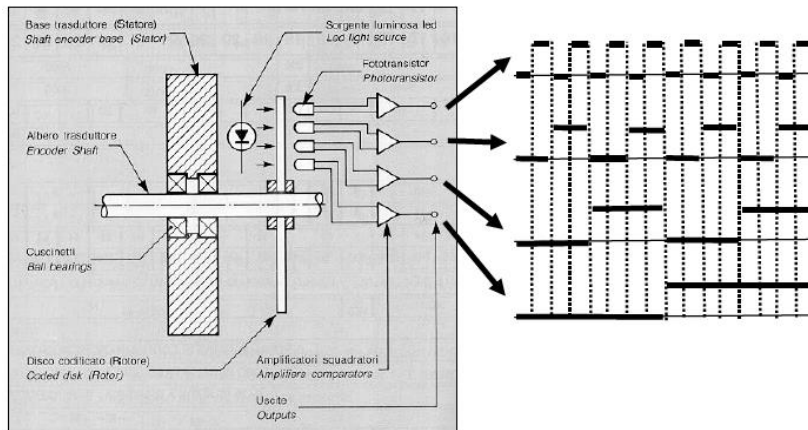
### Encoder: assoluti

Gli encoder assoluti sono formati da un numero N di piste, ciascuna con una diversa distribuzione di tacche opache e tacche trasparenti. La prima pista è costituita da metà tacche opache e metà trasparenti: in questo modo il fotorilevatore identifica il quale metà dell'angolo giro si trova il disco dell'encoder. La seconda pista invece è divisa in quattro parti: due opache e due trasparenti. Noto in che metà dell'angolo giro ci si trova, grazie al primo rilevatore, il secondo fotorilevatore raffina la misura identificando in quale quarto dell'angolo giro ci si trova realmente. Aumentando il



numero di piste si raffina ulteriormente la risoluzione: con tre piste si riconosce l'ottavo di angolo giro, con quattro piste il sedicesimo di angolo giro e così via. Il disco codificato con n piste che vengono quindi lette simultaneamente fornisce un'uscita in codice binario. Le n piste vengono lette da n fotorelevatori differenti. Dal diametro del disco dipende il numero di piste n e da n dipende la risoluzione angolare calcolata come:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2^n}$$



Un particolare tipo di encoder assoluti sono quelli basati sul codice Gray: tali strumenti hanno sempre n piste, come gli assoluti appena descritti, ma hanno tuttavia la distribuzione delle aree opache e trasparenti sulle varie piste diversa: è ottimizzata in modo che vi sia sempre una sola pista alla volta che commuta di stato. In questo modo si riduce il rischio di ambiguità della lettura.

Il problema di questi encoder è che in alcuni casi non si può conoscere il valore assoluto della posizione; nello specifico non si può comprendere tale valore in corrispondenza della zona limite. Un altro problema che riguarda però tutti gli encoder è il rischio che la frequenza di taglio dei cavi modifichi il segnale onda quadra. I cavi di collegamento sono sostanzialmente delle resistenze e delle capacità distribuite, questo porta ad avere un effetto filtro passa-basso. La frequenza di taglio dipende dalle caratteristiche dei cavi. Visto che gli encoder hanno spesso un numero elevato di tacche al giro e hanno velocità di rotazione non trascurabili, la frequenza dell'onda quadra generata cresce facilmente. Ricordiamo che il cavo di collegamento può essere schematizzato come un cavo coassiale, cioè un cavo esterno conduttore. Questa struttura serve per ridurre notevolmente il disturbo elettromagnetico. In uscita non si avrà dunque un'onda quadra ma una frequenza arrotondata dunque il fronte d'onda sarà arrotondato. Un ulteriore problema è quello del giunto, analogo dunque al problema dell'accoppiamento visto per i trasduttori di spostamento angolare a contatto.

