POLITECNICO MILANO 1863 | DIPARTIMENTO DI ELETTRONICA INFORMAZIONE E BIOINGEGNERIA

Fondamenti di robotica

Sensori per il controllo del moto

09.04.2025 | Paolo Rocco

Contenuti

1. Resolver
2. Encoder incrementali
3. Encoder assoluti
4. Misure di velocità

Resolver

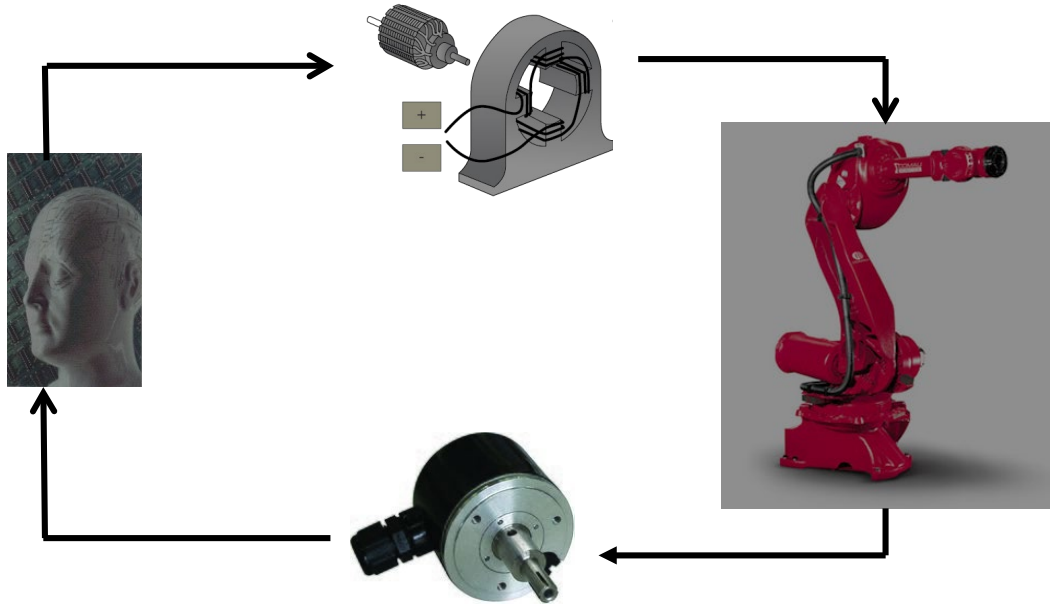
01

Sensori di posizione per il controllo del moto

I sensori di posizione forniscono un segnale elettrico correlato allo spostamento di una parte meccanica rispetto a un riferimento

- **Sensori lineari**
  - Potenziometri, LVDT (Linear Variable Differential Transformer), righe ottiche
- **Sensori rotativi**
  - Potenziometri, resolver, sensori a effetto Hall, encoder ottici rotativi

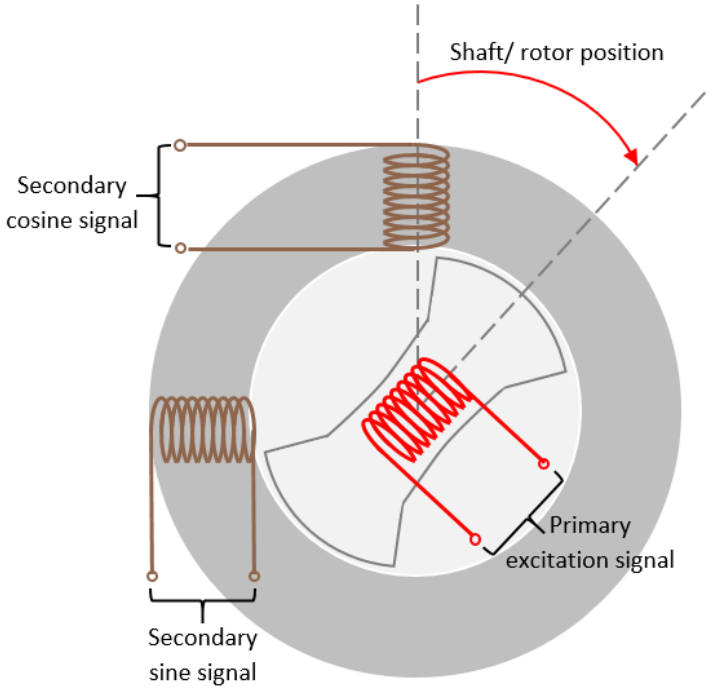
Il metodo di misura può essere assoluto o incrementale.



Sistemi induttivi assoluti: il resolver

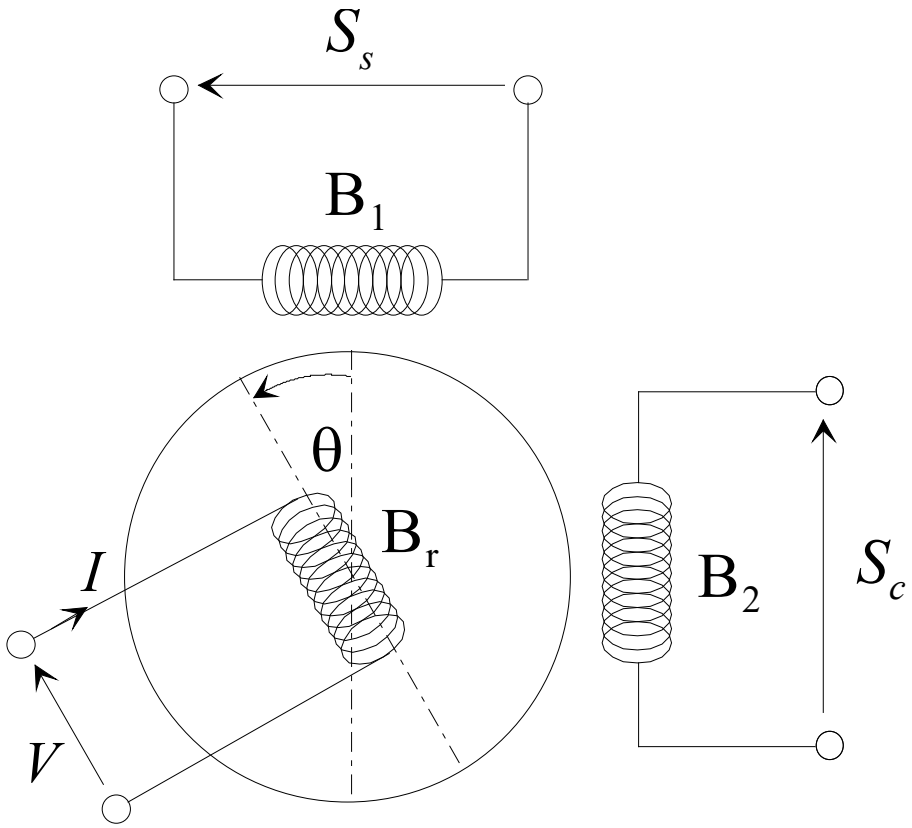
Un primo sistema per la misura dell'angolo di rotazione di un rotore è il **resolver**

Si basa sulla variazione dell'accoppiamento elettromagnetico tra circuiti elettrici



Resolver: principio di funzionamento

Sul rotore è disposto l'avvolgimento di eccitazione, sullo statore sono disposti due avvolgimenti (pick-up) in quadratura spaziale



Il circuito di rotore può essere eccitato tramite contatti striscianti o tramite trasformatore

Gli avvolgimenti sono realizzati in modo da ottenere le seguenti **mutue induttanze** (tra circuito di rotore e ciascuno dei due circuiti di statore)

$$M_s(\theta) = M\sin(\theta)$$
$$M_c(\theta) = M\cos(\theta)$$

Resolver: principio di funzionamento

Si eccita il resolver con una tensione alternata ad alta frequenza, che induce le seguenti tensioni sugli avvolgimenti di statore:

$$V(t) = \bar{V}\cos(\omega t) \quad \Rightarrow \quad S_s(\theta, \dot{\theta}, t) = \frac{d(M_s(\theta)I)}{dt}$$

$$S_c(\theta, \dot{\theta}, t) = \frac{d(M_c(\theta)I)}{dt}$$

Supponendo trascurabile la resistenza del circuito d'eccitazione ($V = L\frac{dI}{dt} \Rightarrow I(t) = \frac{\bar{V}}{\omega L}\sin(\omega t)$):

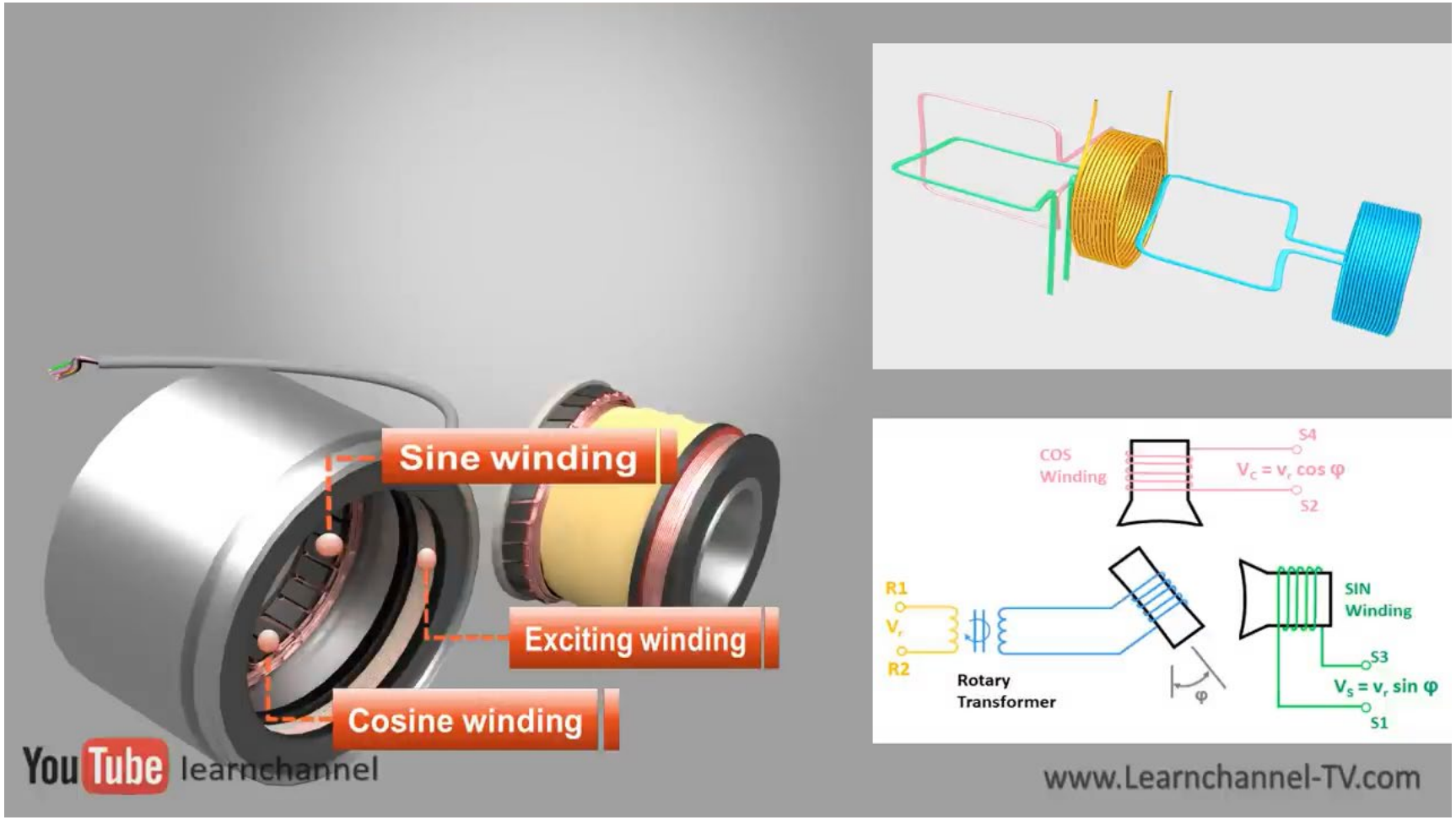
$$S_s(\theta, \dot{\theta}, t) = M_s(\theta)\frac{dI}{dt} + \frac{dM_s(\theta)}{dt}I = A\sin(\theta)\cos(\omega t) + (\dot{\theta}/\omega)A\cos(\theta)\sin(\omega t)$$

$$S_c(\theta, \dot{\theta}, t) = M_c(\theta)\frac{dI}{dt} + \frac{dM_c(\theta)}{dt}I = A\cos(\theta)\cos(\omega t) - (\dot{\theta}/\omega)A\sin(\theta)\sin(\omega t)$$

con $A = \bar{V}M/L$. Scegliendo ω elevato: $\dot{\theta}/\omega \cong 0$

Rilevando le tensioni S_s e S_c, con un opportuno circuito è possibile **estrarre segnali rappresentativi del seno e del coseno di θ** e quindi ricavare la misura dell'angolo stesso.

Resolver: principio di funzionamento



https://www.youtube.com/watch?v=7PKJ52b1Qvs

Resolver: vantaggi e svantaggi

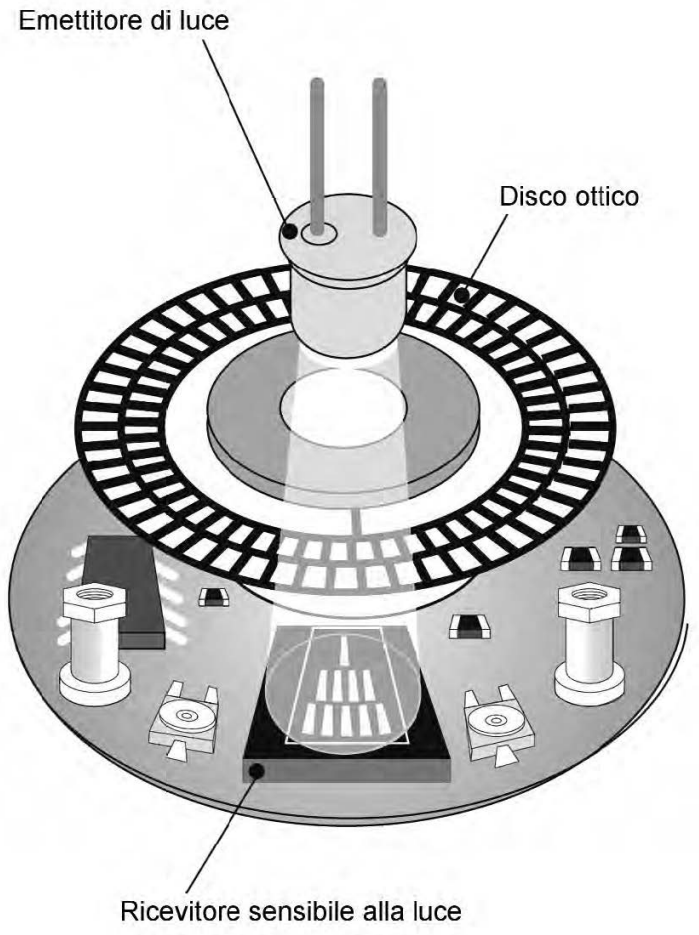
- Il resolver è un sistema affidabile, preciso e robusto
- Richiede una significativa competenza tecnica per il corretto uso, è costoso e ingombrante

Encoder incrementali

02

Encoder

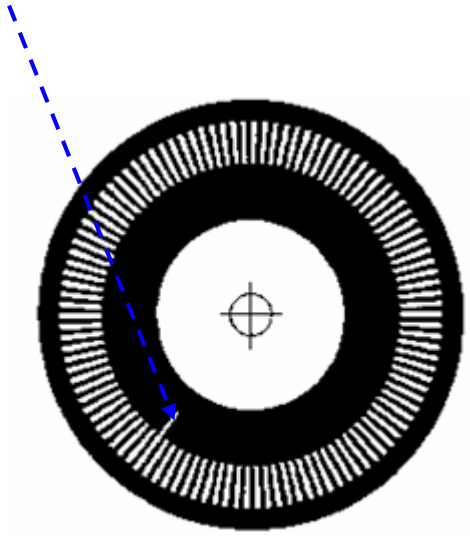
- L'encoder è uno strumento per la misura di una posizione angolare basato sul **principio fotoelettrico**
- Il principio base di funzionamento è il seguente: davanti a una sorgente luminosa è posto un disco che presenta alternativamente aree opache e trasparenti. Un fotorilevatore rileva l'intensità luminosa che attraversa il disco e fornisce quindi un'informazione indiretta sulla posizione angolare
- L'encoder può essere **incrementale** o **assoluto**



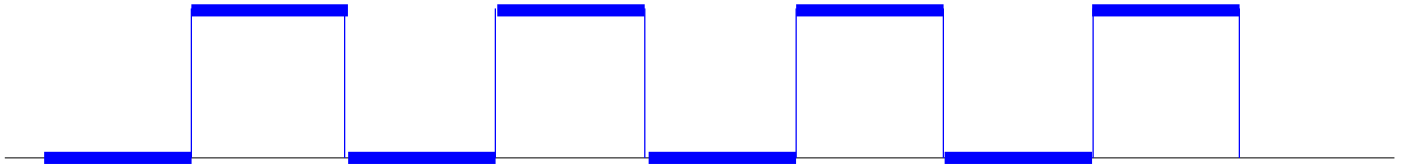
Encoder incrementale

Nella sua versione più semplice l'encoder incrementale è costituito da una sola traccia con zone alternativamente trasparenti o opache

Tacca per la definizione di uno zero meccanico assoluto.



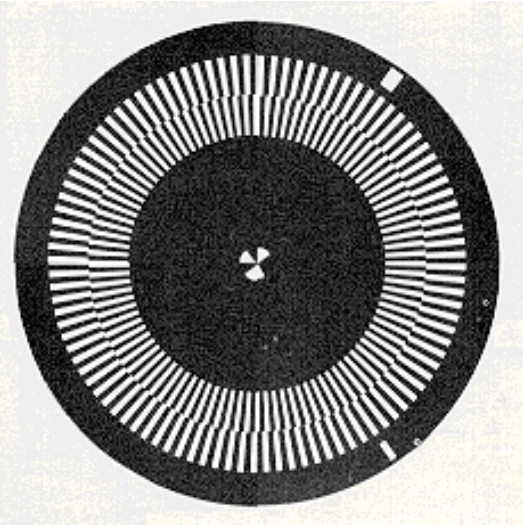
L'uscita del fotorivelatore viene squadrata da un circuito elettronico e dà luogo a un treno di impulsi.

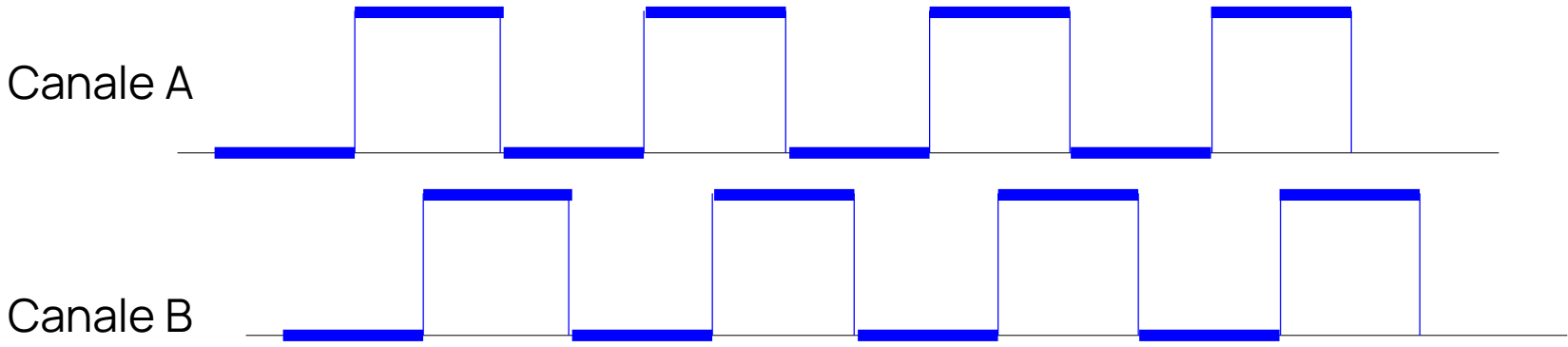


- Non si ha la posizione angolare assoluta ma si possono solo contare gli impulsi dal momento dell'accensione
- Non si può rilevare il verso di rotazione

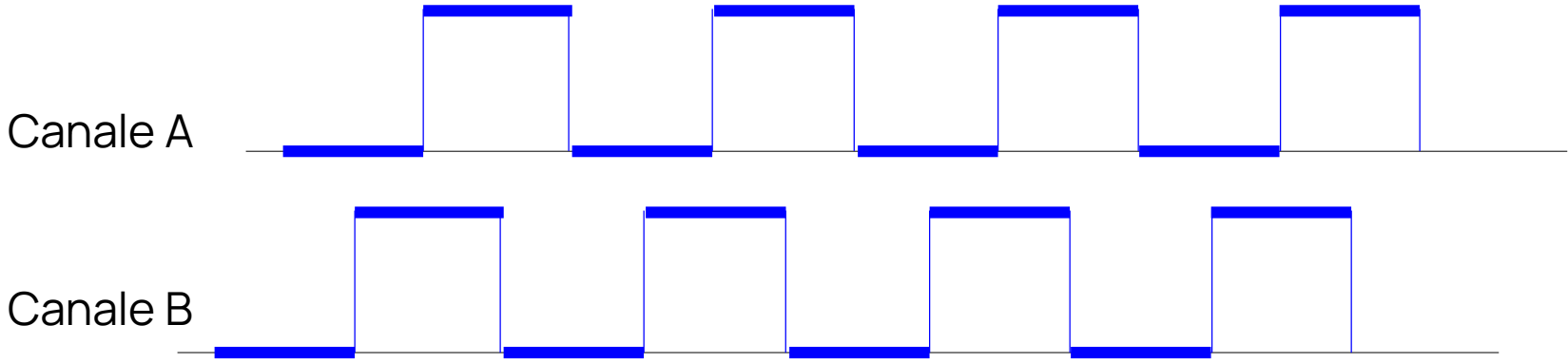
Encoder incrementale

Per stimare anche il **verso di rotazione**, si aggiunge una **seconda traccia**, sfasata di 1/4 di passo.



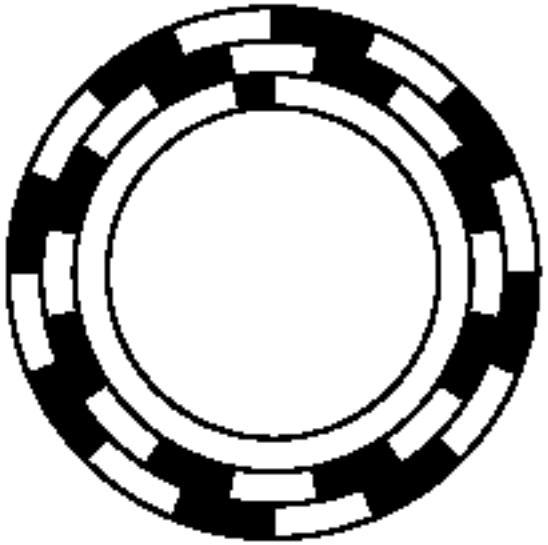


(A in anticipo su B: rotazione **oraria**)



(B in anticipo su A: rotazione **antioraria**)

Encoder incrementale: risoluzione

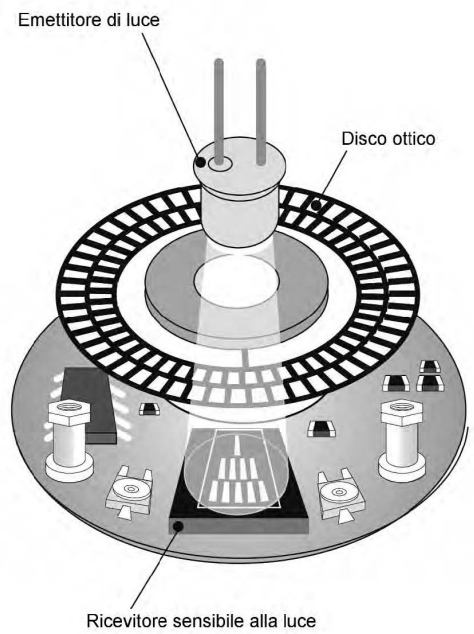


N: numero passi (numero di zone chiare/scure per giro).

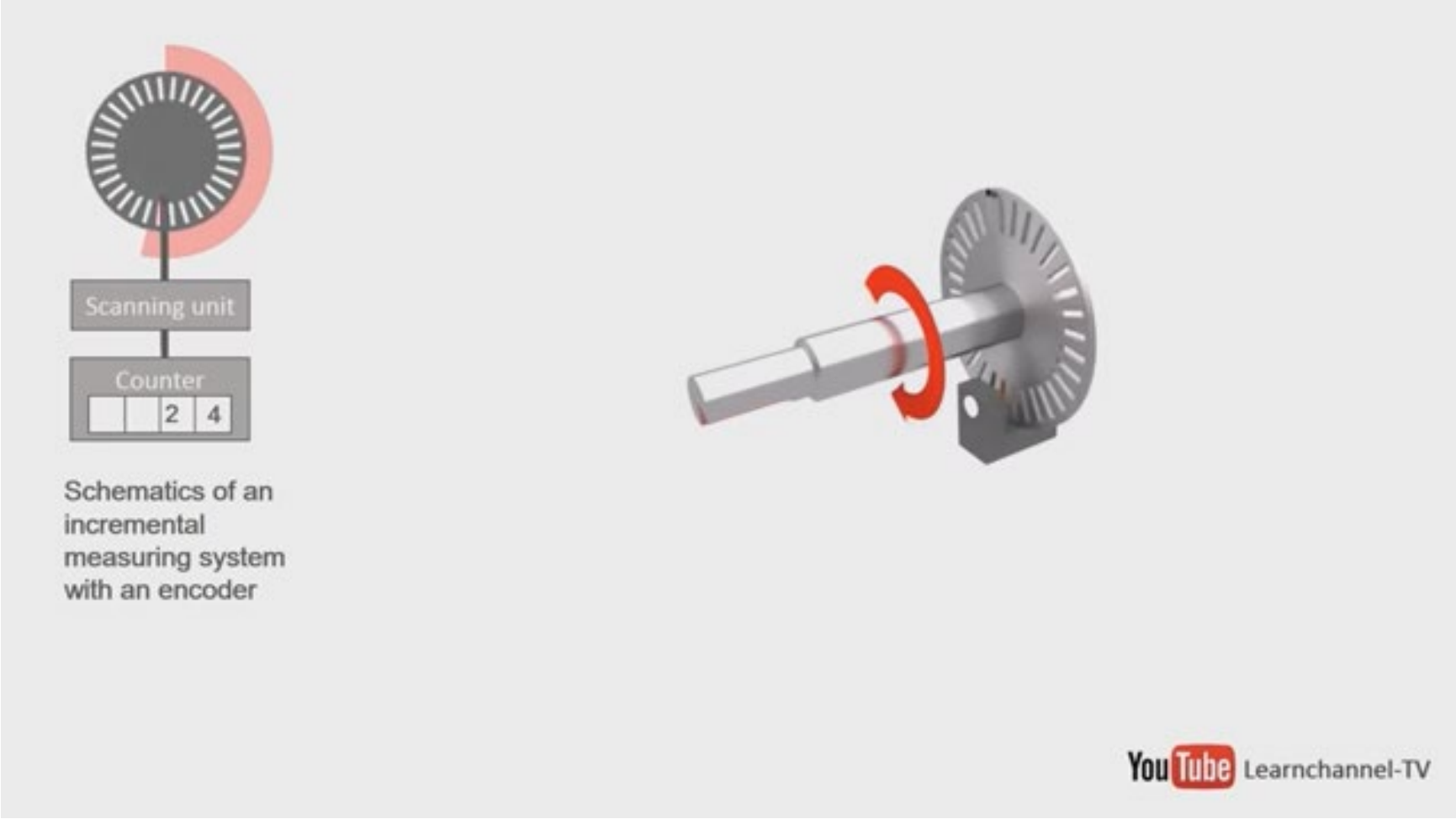
Poiché i due segnali sono sfasati di 1/4 di passo:

Risoluzione: $360^{\circ}/(4N)$

Con $N = 1000$ la risoluzione è di 0.090°



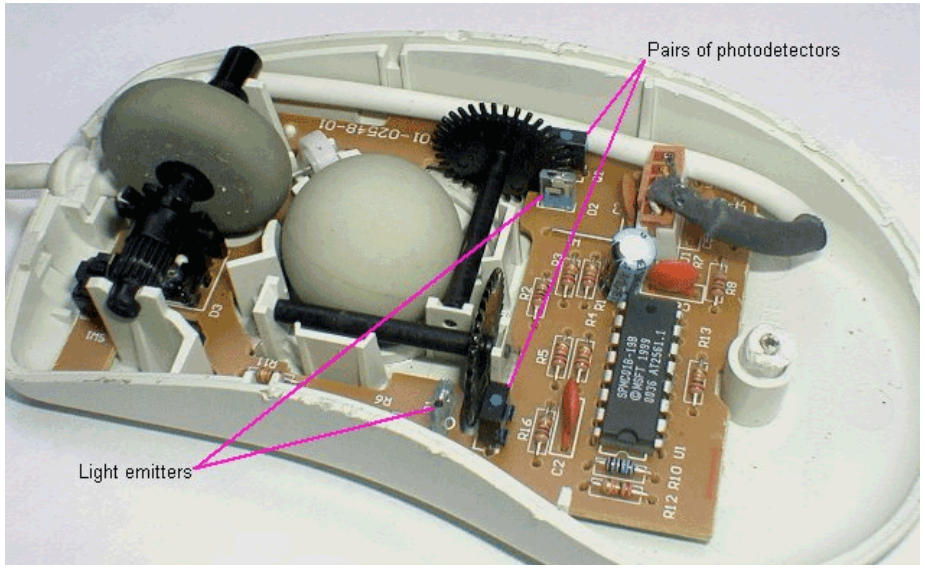
Encoder incrementale: principio di funzionamento

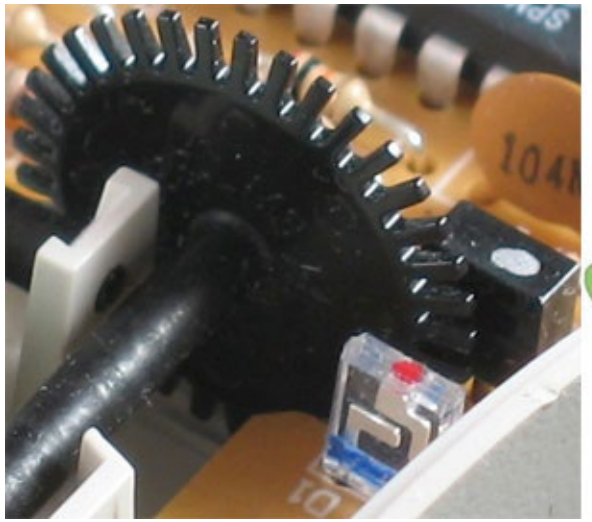


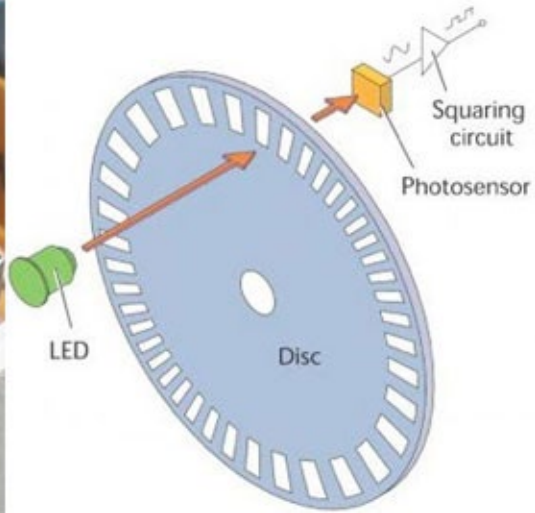
https://www.youtube.com/watch?v=zzHcsJDV3_o

Encoder incrementale: esempio d'uso

Encoder incrementali su un mouse (a pallina)





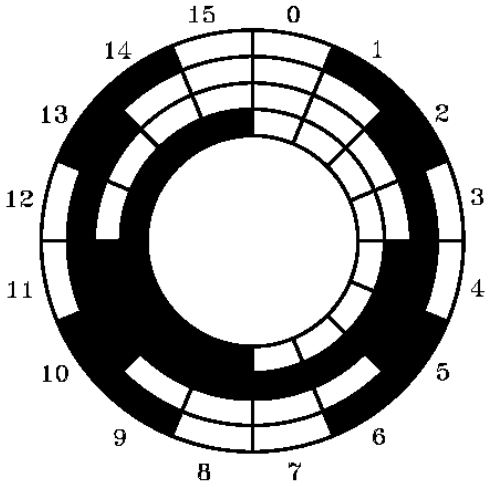


Encoder assoluti

03

Encoder assoluto

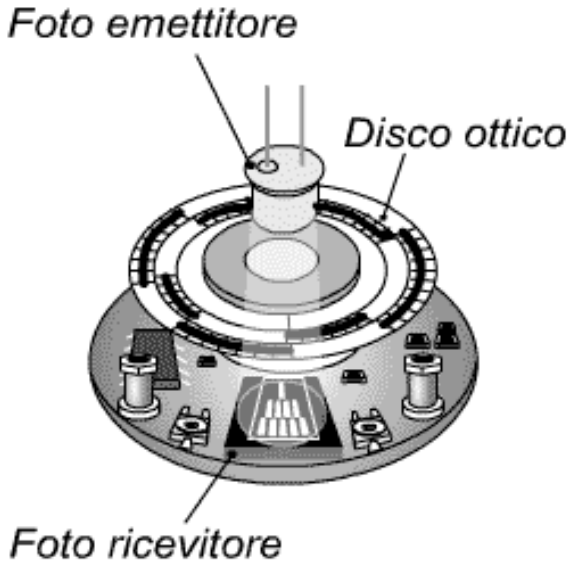
- L'**encoder assoluto** è un disco con aree trasparenti e opache, disposte su corone circolari concentriche
- La traccia più interna suddivide l'angolo giro in due, la seconda traccia suddivide ciascun angolo piatto in due angoli di 90° e così via



Con N corone circolari si ha quindi:

Risoluzione: $360^{\circ}/2^{N}$

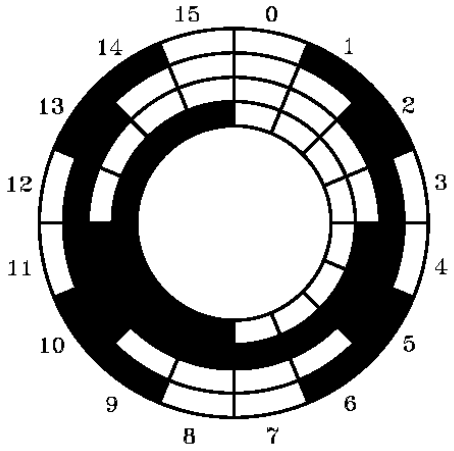
Per le applicazioni robotiche sono richieste almeno 12 tracce (risoluzione di 360°/4096 = 0.088°).



Viene codificata la **posizione angolare assoluta**: all'accensione, lo strumento fornisce l'angolo assoluto

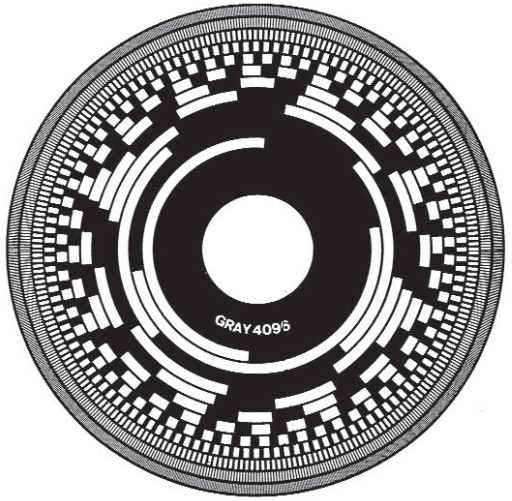
Encoder assoluto

Per evitare ambiguità di lettura si utilizzano codici binari a variazione singola (**codice Gray**):
da un settore a quello successivo cambia una sola cifra.



#	Codice	#	Codice
0	0000	8	1100
1	0001	9	1101
2	0011	10	1111
3	0010	11	1110
4	0110	12	1010
5	0111	13	1011
6	0101	14	1001
7	0100	15	1000

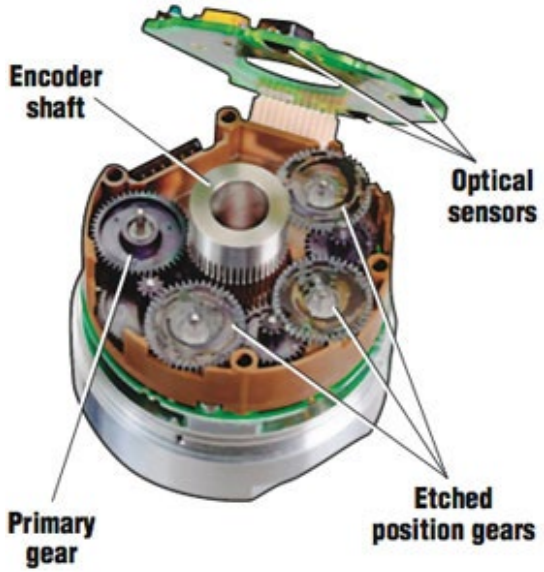
Encoder a 12 bit con codifica Gray

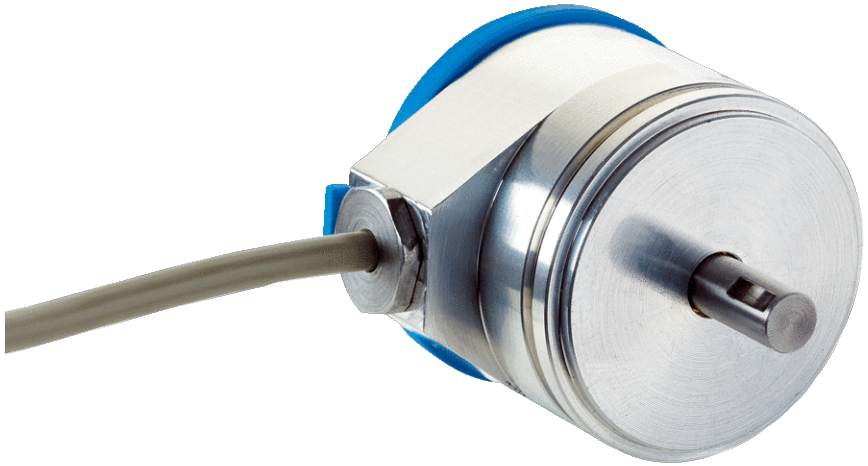


Encoder assoluto: single-turn o multi-turn

- Gli encoder **single-turn** misurano solo la posizione sull'angolo giro: un encoder single-turn a 13 bit ha una risoluzione sul giro di $360°/2^{13} = 0.044°$

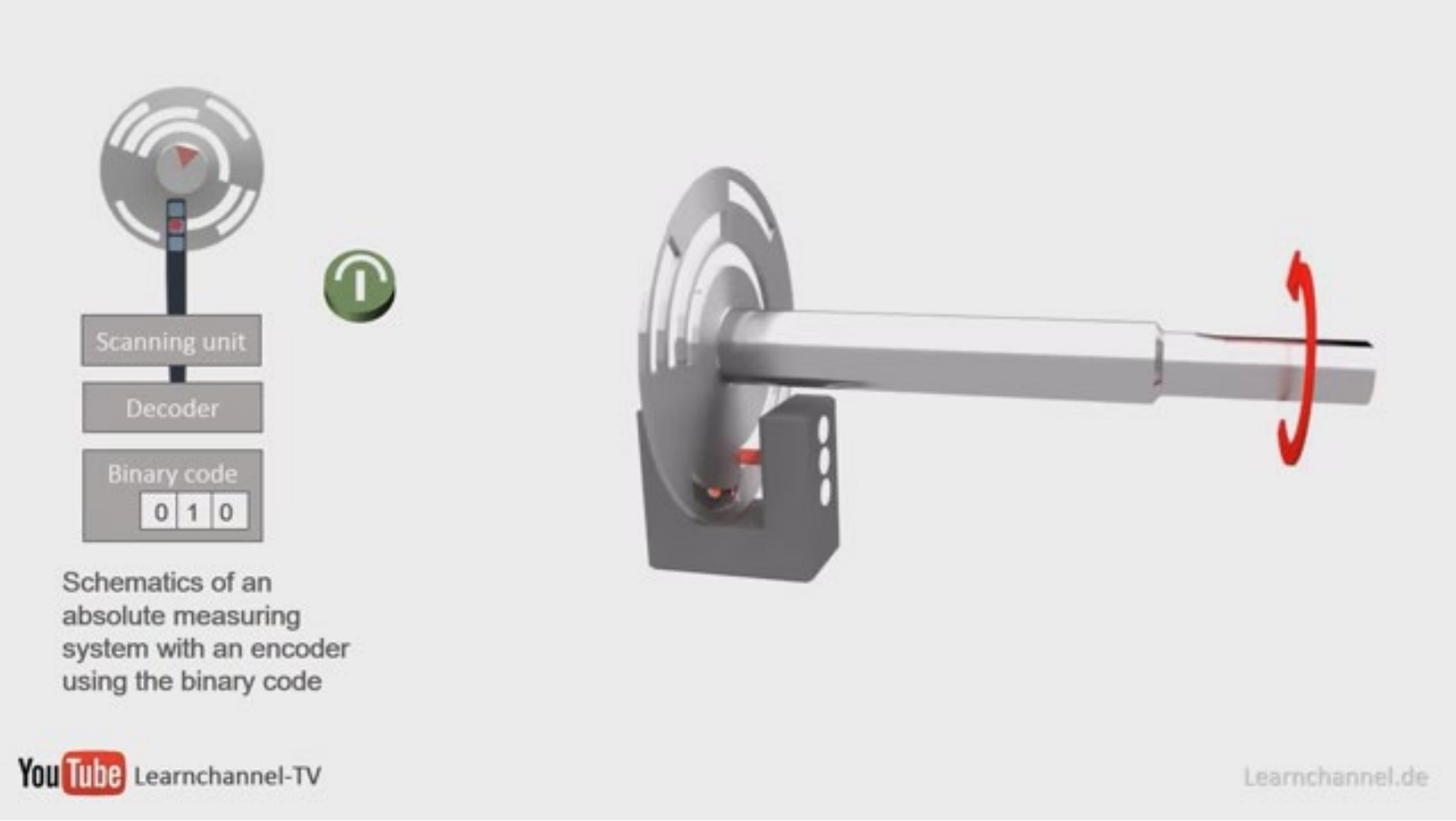
- Gli encoder **multi-turn** misurano anche il numero delle rotazioni, mediante opportuni ingranaggi: un encoder multi-turn a 29 bit può avere 13 bit dedicati alla misura sul giro e gli altri 16 a misurare fino a $2^{16} = 65.536$ giri





Encoder assoluto Sick

Encoder assoluto: principio di funzionamento



https://www.youtube.com/watch?v=yOmYCh_i_JI

Misure di velocità

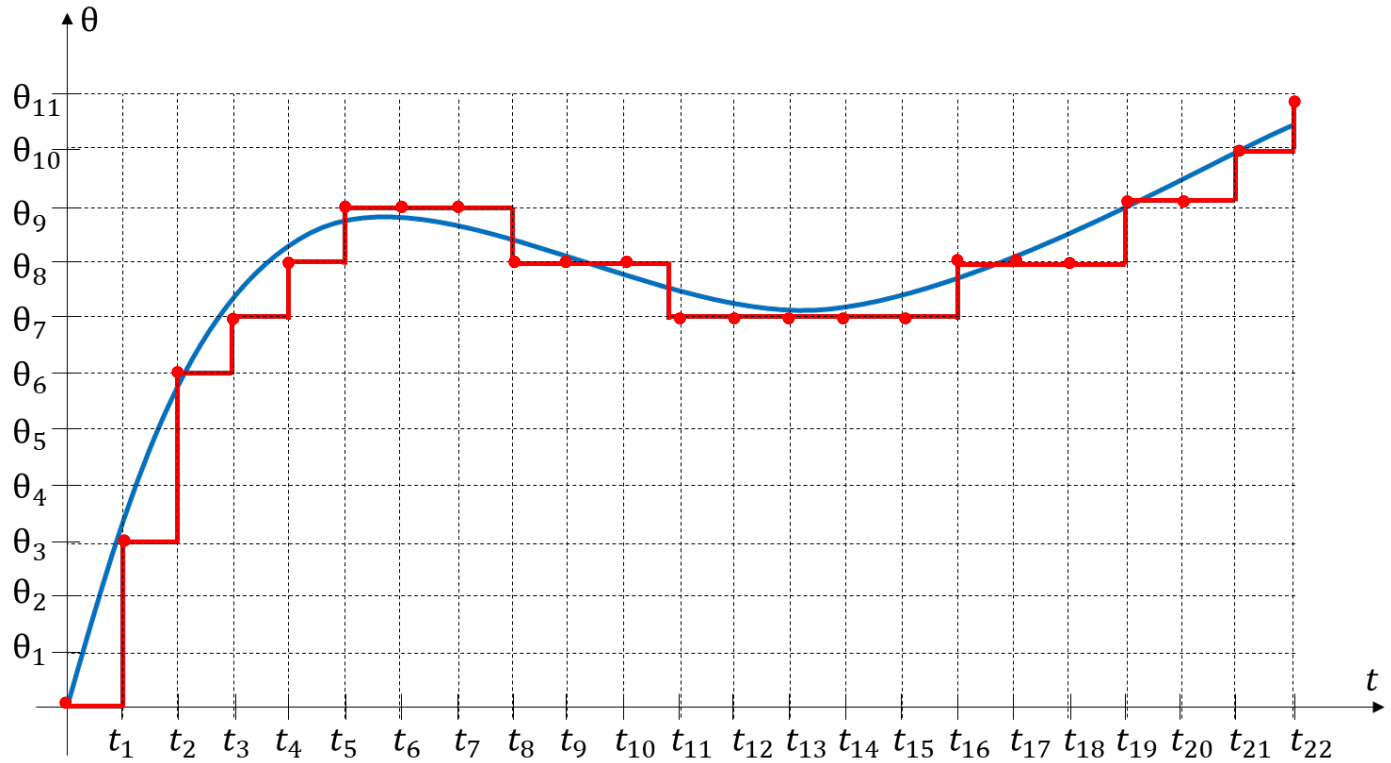
04

Misura di velocità dal segnale encoder

Dagli impulsi prodotti da un encoder (incrementale o assoluto) si può ricavare una **misura di velocità**. Esistono due metodi:

A tempo fisso: si campiona l'uscita dell'encoder a passo temporale fissato T_s

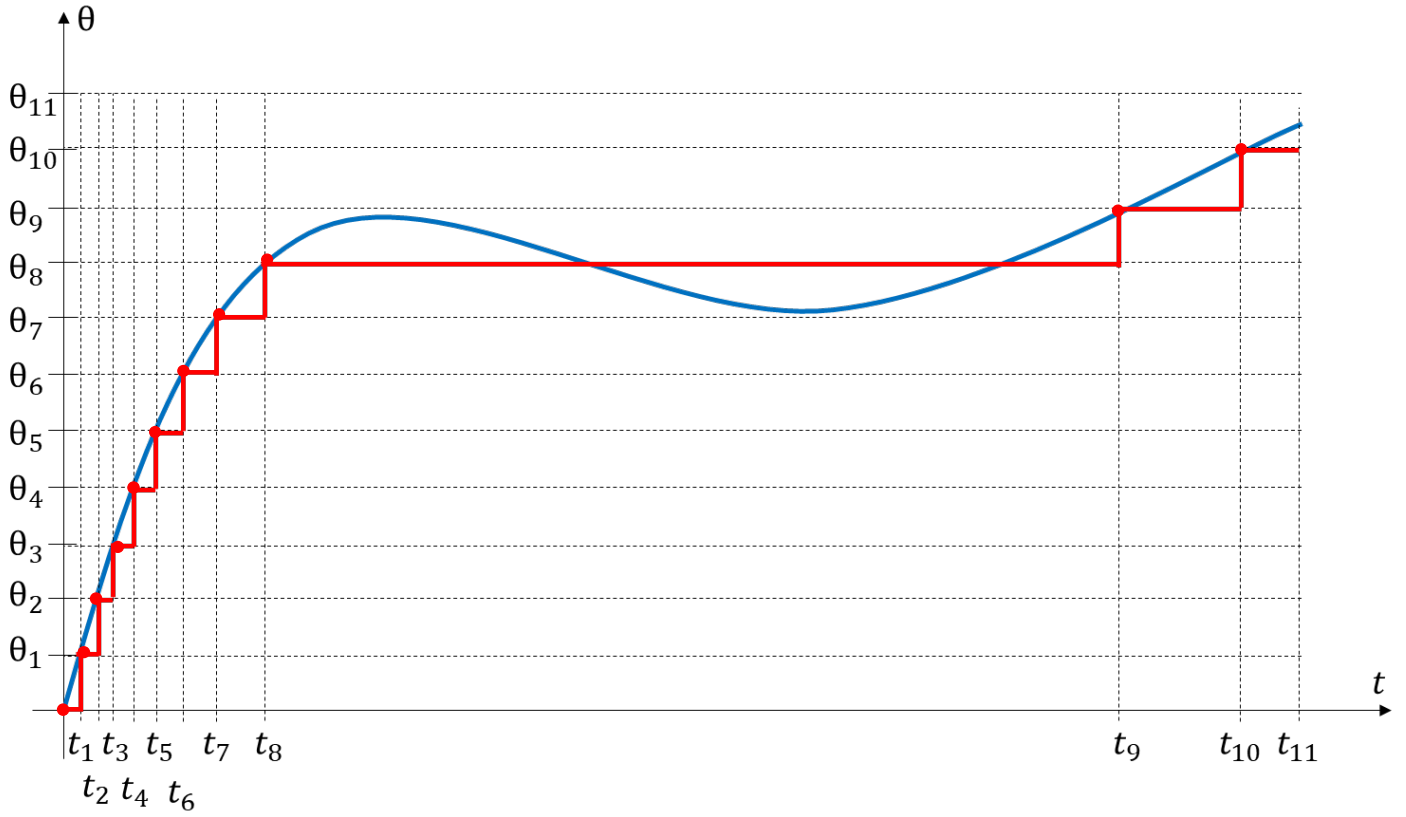
$$\omega(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T_s}$$



Misura di velocità dal segnale encoder

A spazio fisso: si misura il tempo necessario per cambiare l'uscita dell'encoder di un bit (variazione $\Delta\theta$)

$$\omega(k) = \frac{\Delta\theta}{t_k - t_{k-1}}$$

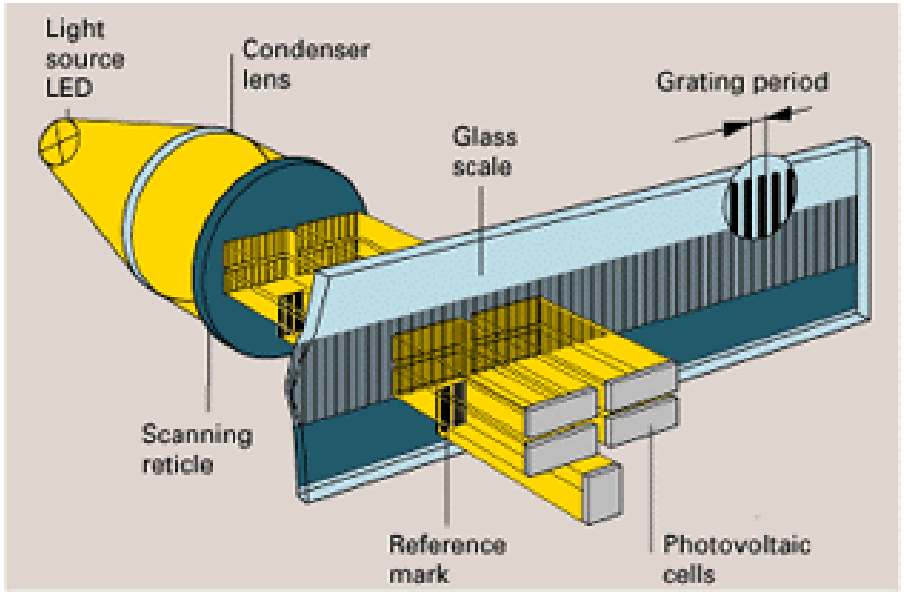


In genere si ottengono risultati migliori con i metodi a spazio fisso, in particolare associando metodi di filtraggio

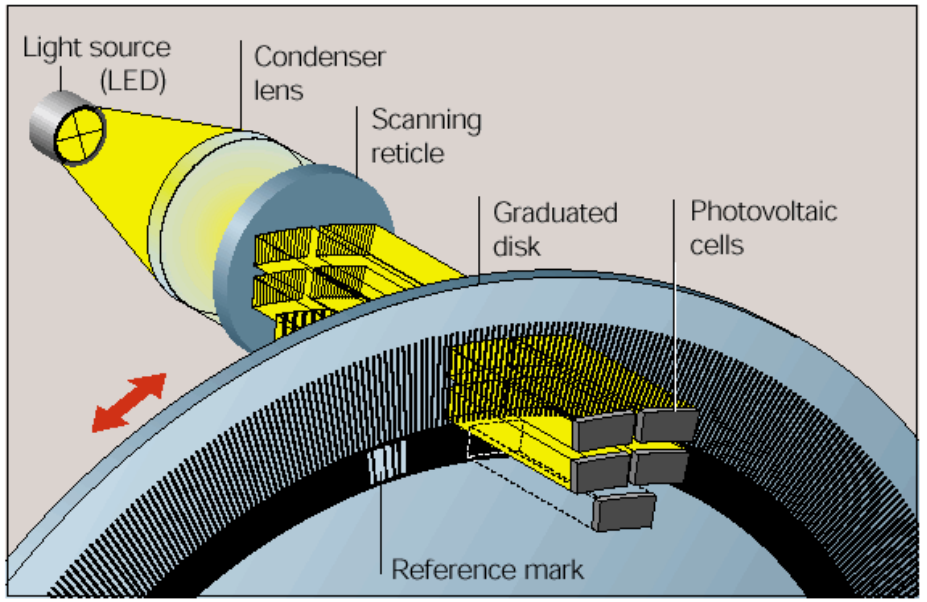
Encoder avanzati

Per grandi precisioni, si usano sistemi basati sull'**effetto di Moiré**: se si fanno scorrere parallelamente e uno sull'altro due reticoli di divisione, si rilevano oscillazioni periodiche di luminosità , che si possono convertire in segnali elettrici.

Riga ottica



Encoder rotativo



Fonte: Heidenhein

POLITECNICO MILANO 1863 | DIPARTIMENTO DI ELETTRONICA INFORMAZIONE E BIOINGEGNERIA

Contatti

Paolo Rocco
paolo.rocco@polimi.it