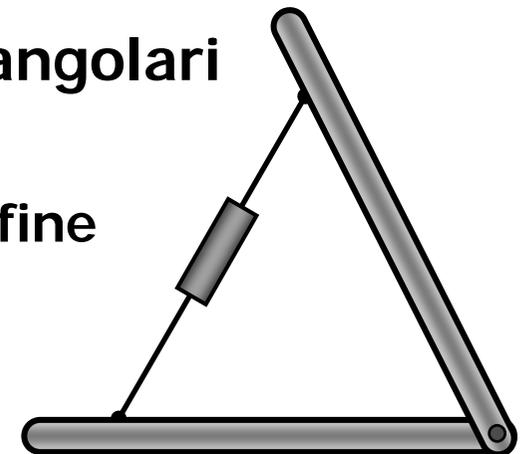


SISTEMA DI ATTUAZIONE DEI GIUNTI

- I giunti del **manipolatore** sono azionati da sistemi composti da
 - una **fonte di alimentazione**
 - un **controllore + convertitore di potenza + motore**
 - un **riduttore di velocità**
 - **organi di trasmissione della potenza**
- Il movimento è impresso mediante
 - **motori elettrici** → solitamente **angolari**
 - **motori pneumatici o oleodinamici** → quasi unicamente **lineari**
- I moti possono essere **trasformati: lineari ↔ angolari**
 - azionamento **lineare**
motore angolare + ruota elicoidale-vite senza fine
 - azionamento **angolare**
motore lineare + cerniera



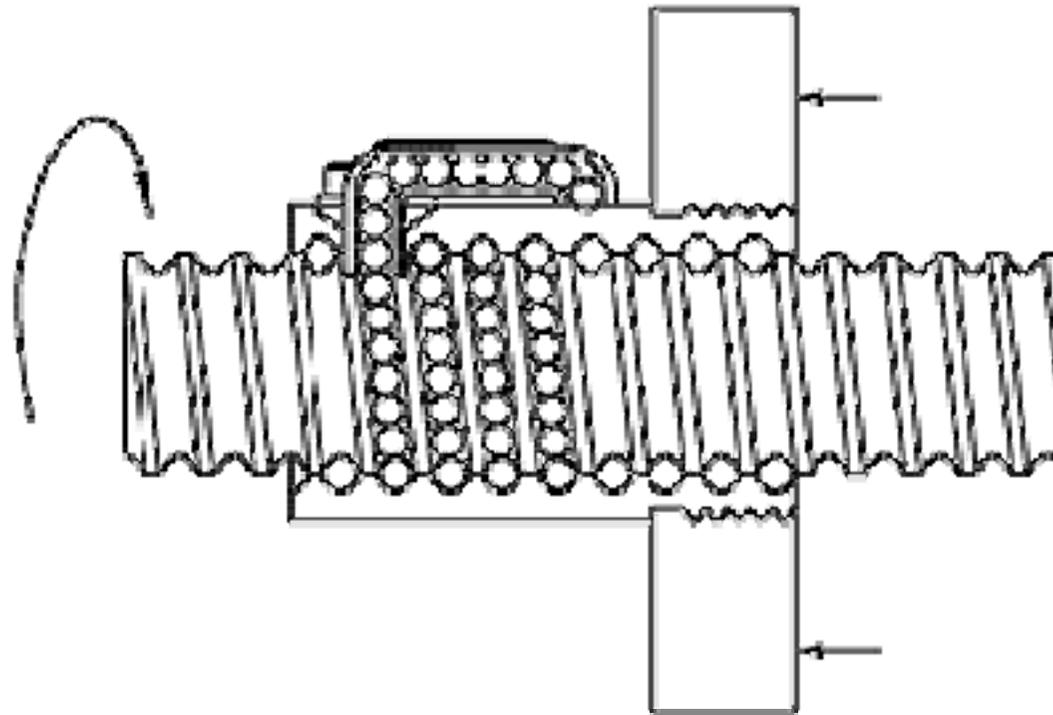
AZIONAMENTO LINEARE

Uno dei problemi più importanti relativi a giunti prismatici e guide è riuscire a ridurre l'attrito ed a mantenerlo costante anche alle basse velocità, per evitare lo "stick-slip" → movimento a scatti che si manifesta a basse velocità, ad esempio in un moto di alimentazione in fresatura o foratura

Per ridurre il problema si possono adottare i seguenti metodi:

- utilizzare attrito volvente anziché radente, impiegando viti a ricircolo di sfere
- rivestire le guide di strisciamento in acciaio con materiali plastici a elevata resistenza alla compressione e all'usura e con dilatazione termica simile all'acciaio caratterizzati da un coefficiente d'attrito di valore pressoché costante con la velocità → uno di questi materiali è il "turcite" a base di bronzo e politetrafluoroetilene
- lubrificare con olio in pressione il quale mantiene separati i due organi in moto relativo, riducendo di molto l'attrito

Le viti a ricircolo di sfere (ball screw) sono generalmente messe in rotazione da un motore DC e generano il moto rettilineo di un asse. Elementi rotolanti (sfere) sono interposti fra i filetti della vite e quelli della madrevite così da sostituire l'attrito di strisciamento con quello di rotolamento.

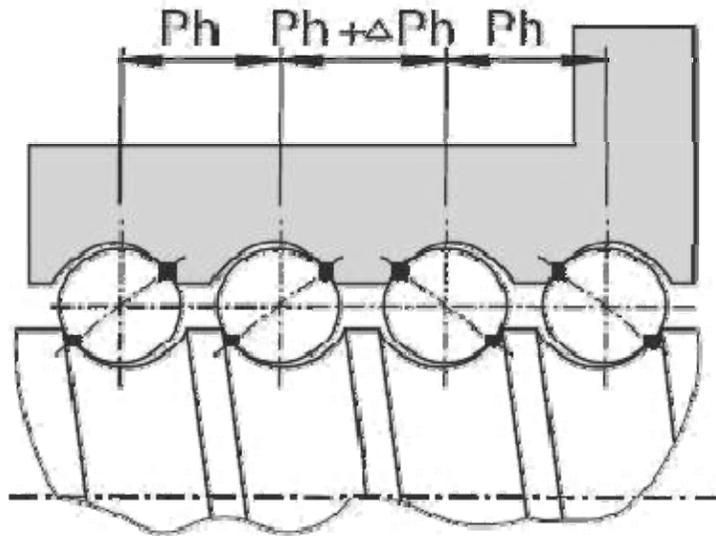


Le caratteristiche principali sono:

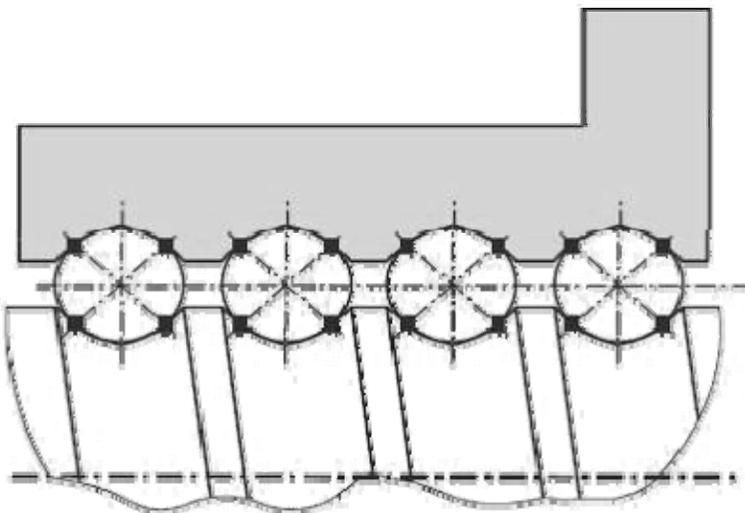
- elevato rendimento (maggiore del 90%) → moto retrogrado
- il gioco tra vite e madrevite è molto ridotto (dell'ordine di qualche micron) e può essere quasi annullato mediante precarico. Questa caratteristica è molto importante, in quanto permette l'uso di trasduttori di posizione indiretti → per ragioni economiche è più conveniente misurare la rotazione della vite (tipicamente con un encoder) che lo spostamento lineare del braccio. Se il gioco è ridotto gli errori che si commettono nel controllo dell'asse sono trascurabili
- l'eliminazione dell'attrito di strisciamento permette di evitare il fenomeno dello stick-slip e di ottenere movimenti continui e dolci a velocità bassissime
- il loro costo è piuttosto elevato, data la precisione con cui sono costruiti i profili dei filetti della vite e della madrevite

Metodi di Precarico

4
3



precarico su due punti standard:
10% del massimo carico dinamico

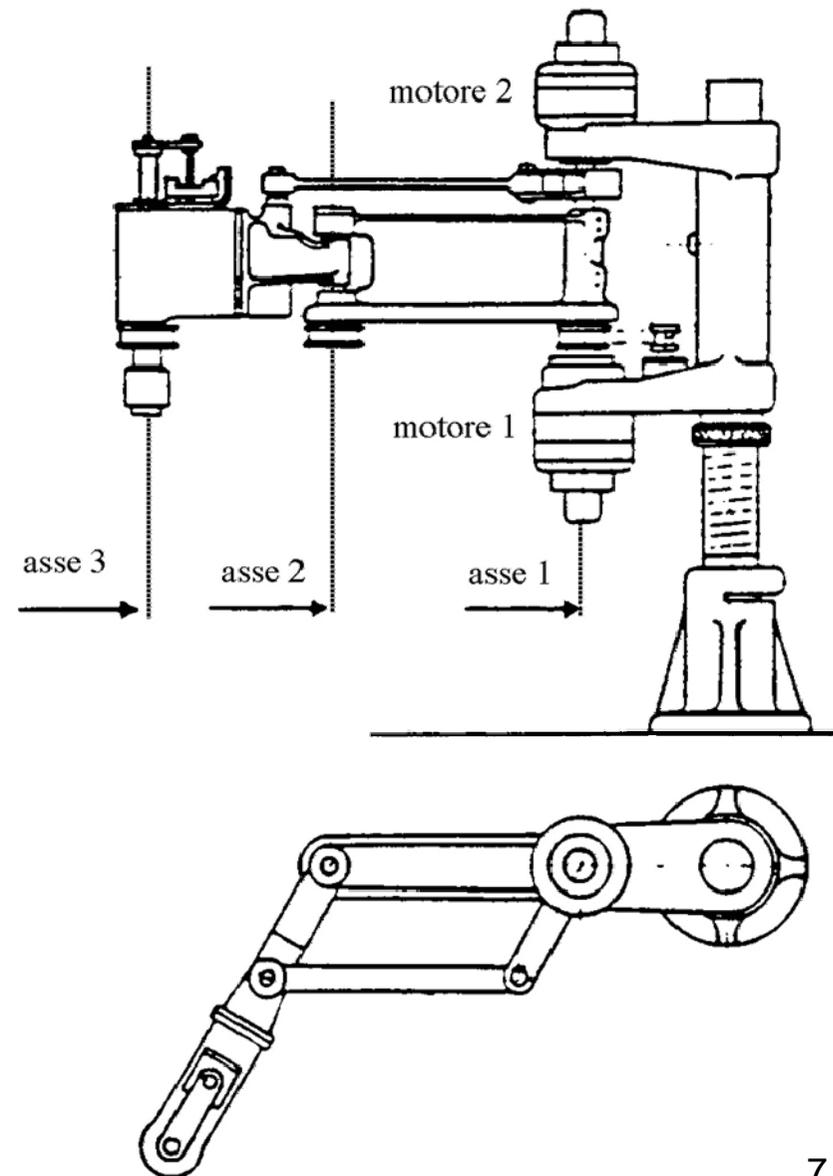


precarico su quattro punti standard:
4% del massimo carico dinamico

- minore ingombro assiale della madre vite
- è economica e largamente usata, ma è a volte inadatta a causa dello strisciamento interno

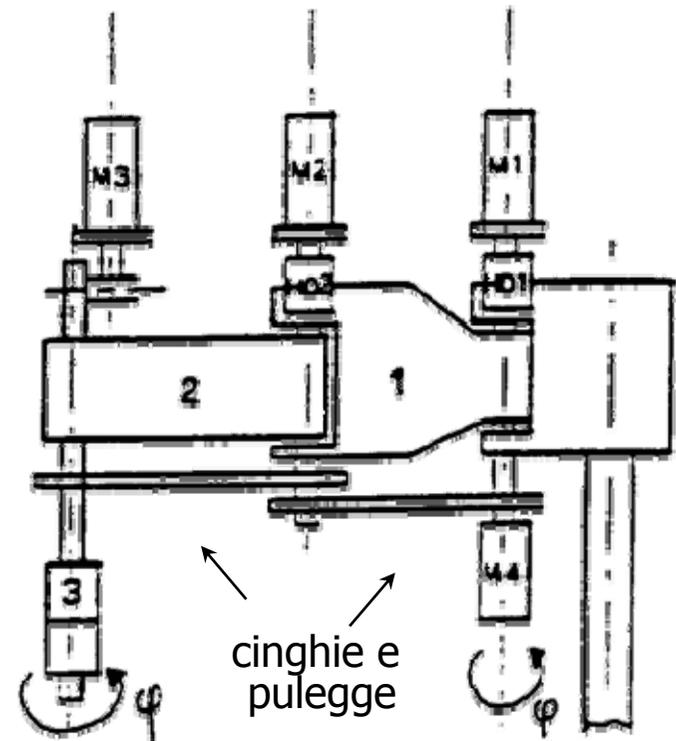
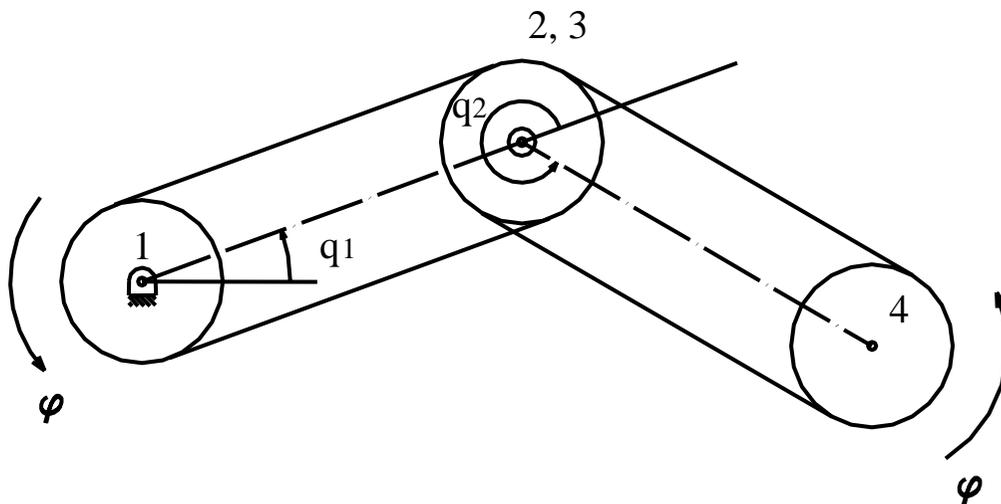
- Consideriamo un **servomotore elettrico** per la sua ampia diffusione
- **Motore posizionato in prossimità del giunto i da azionare**
 - **vantaggi**
 - ♦ **semplicità costruttiva** → assenza di trasmissione remota
 - ♦ **statore solidale a $i - 1$** e rotore collegato a i
 - **svantaggi**
 - ♦ la massa del motore e del riduttore provoca **notevoli momenti d'inerzia** per gli azionamenti dei giunti da **1** a $i - 1$ → grandi distanze
- **Motore posizionato in prossimità della base del robot**
 - **vantaggi**
 - ♦ **riduzione del carico inerziale**
 - **svantaggi**
 - ♦ **complicazioni costruttive** → trasmissione remota
 - 2 esempi pratici

- 1) Esempio di motore posizionato in prossimità della base del robot: Robot **SCARA** con 3 gradi di mobilità
- ♦ **posizionamento remoto del motore 2** → trasmissione remota composta da un parallelogramma articolato



2) Esempio di motore posizionato in prossimità della base del robot:
Robot **SCARA** con **4** gradi di mobilità

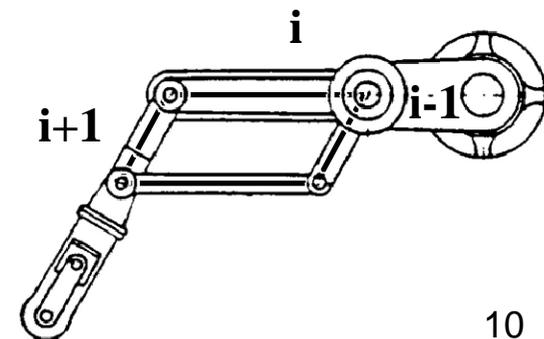
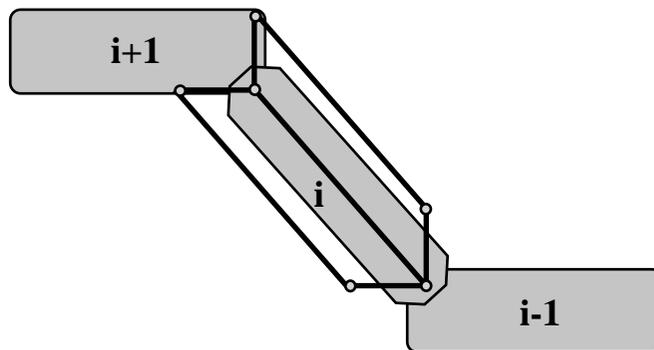
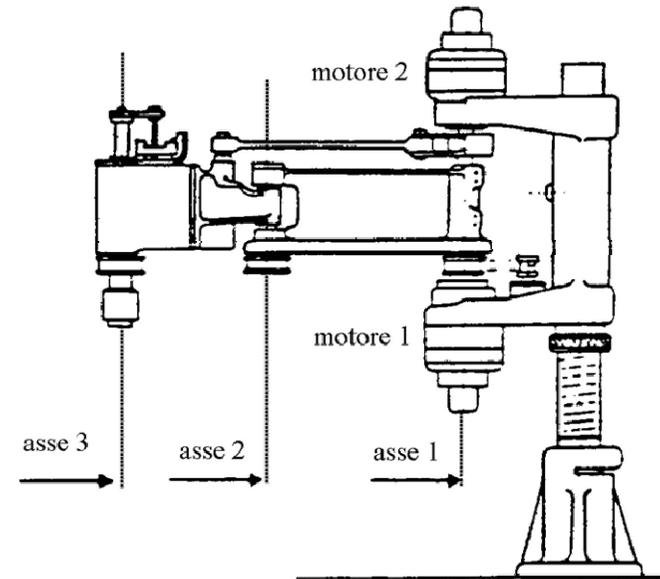
- ♦ **posizionamento remoto del motore 4** → trasmissione remota composta da 2 cinghie e 4 pulegge per l'orientamento dell'organo terminale



TRASMISSIONI REMOTE

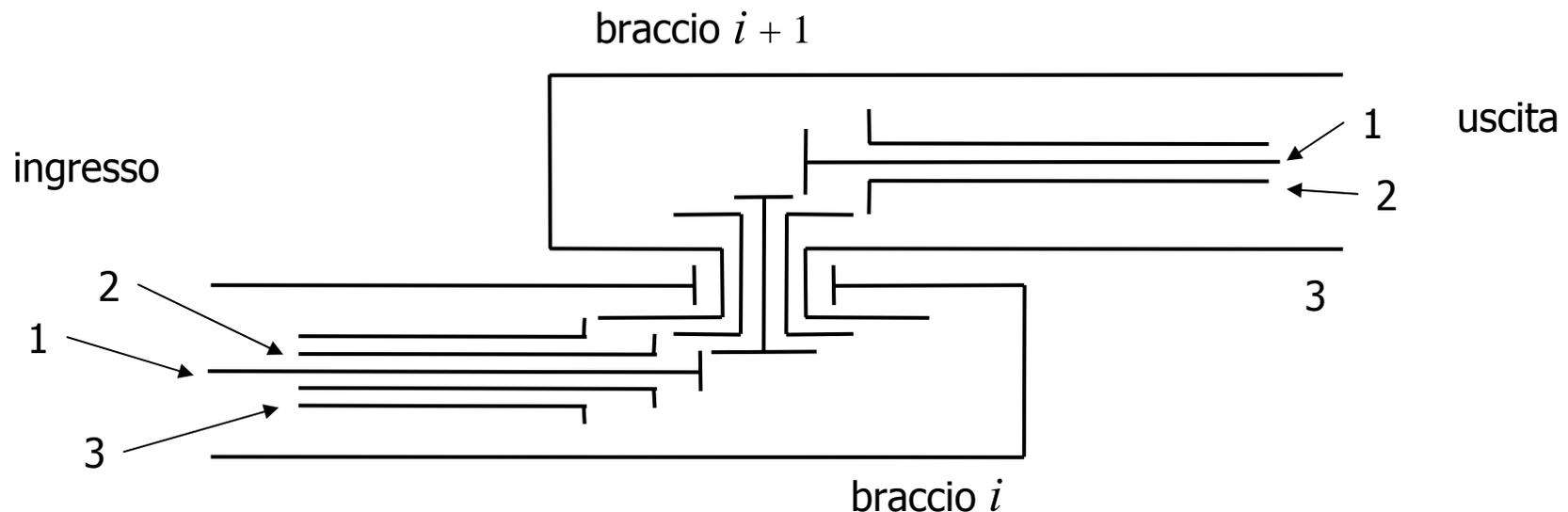
- Questi elementi vengono inseriti con lo scopo di **trasmettere il moto a distanza**, in genere
 - hanno **rapporto di trasmissione unitario $\tau=1$**
 - il **riduttore di velocità è posto a monte della trasmissione**
 - ♦ **motore → riduttore → trasmissione remota**
 - ♦ **la trasmissione opera a bassa velocità**
 - **vantaggi**
 - ♦ **spostamento del motore dall'asse da movimentare verso la base del robot → riduzione del carico inerziale**
 - **svantaggi** → introducono effetti indesiderati
 - ♦ **complicazioni costruttive**
 - ♦ **irregolarità del moto**
 - ♦ **vibrazioni**
 - ♦ **giochi e fenomeni legati alla deformabilità**

- Consideriamo come esempio un **parallelogramma articolato**
 - 2 motori sono montati sullo stesso braccio $\rightarrow i - 1$
 - ♦ un motore movimenta il braccio i : motore $i \rightarrow$ riduttore \rightarrow braccio i
 - ♦ un motore movimenta il braccio $i + 1$: motore $i + 1 \rightarrow$ riduttore \rightarrow \rightarrow trasmissione remota \rightarrow braccio $i + 1$
 - **singularità cinematica** quando il cedente è allineato con la biella
 - ♦ **il moto non può essere trasmesso**
 - ♦ **possibilità di incrocio dei lati**
 - ♦ **può essere ovviato con un secondo parallelogramma normale al primo**

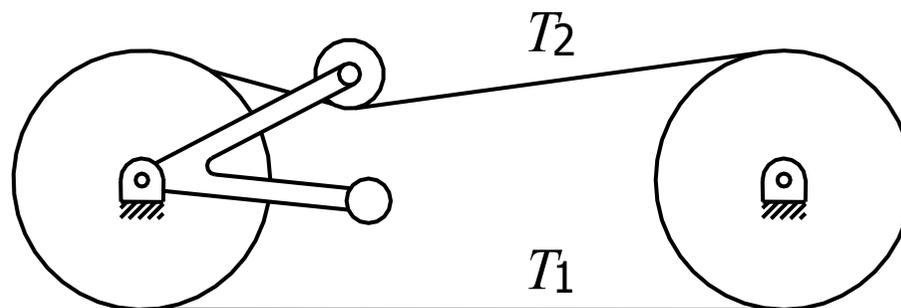


• **Alberi coassiali con ruote dentate coniche calettate**

- impiegate per **polsi e strutture compatte**
- **ogni albero movimentata un asse** → l'albero **3** movimentata **3** rispetto a **2**, gli alberi **1** e **2** movimentano **membri successivi** → **1** e **2**
- una rotazione dell'albero **3** fa ruotare gli alberi **1** e **2** in uscita anche con i rispettivi ingressi fissi → **complicazioni nel controllo**



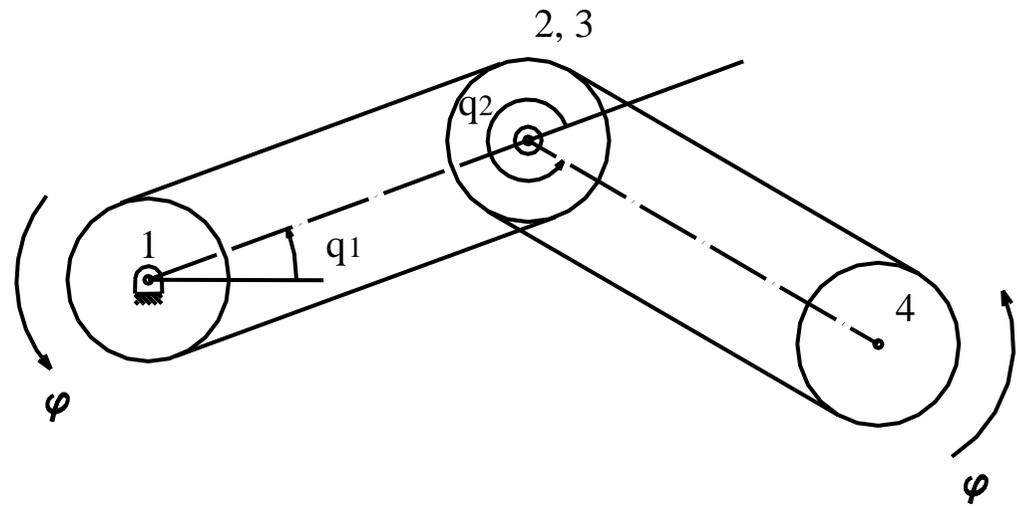
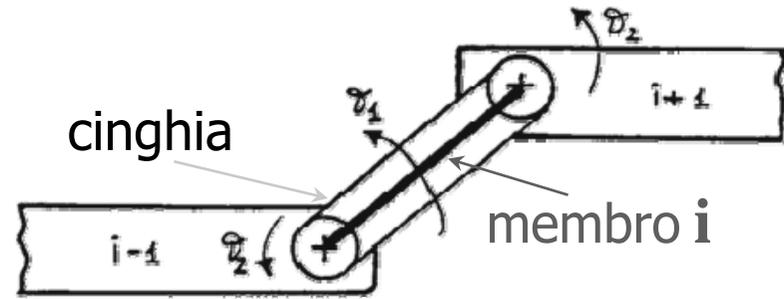
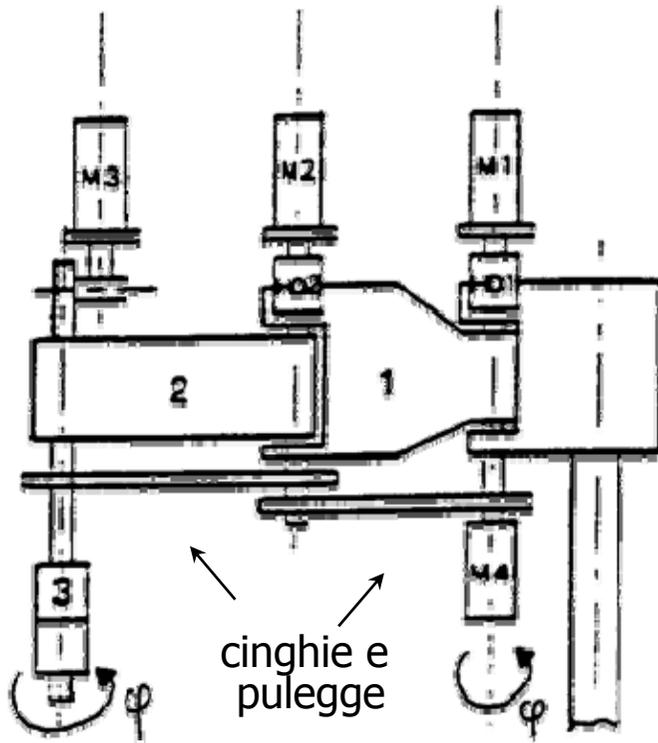
- Si usano **cinghie dentate, catene e cavi**
 - **cavi (tendini)** → applicazioni particolari → **dita di mani antropomorfe** trasmettono azioni per trazione → $n+1$ cavi per comandare n GdL
 - **cinghie dentate e catene** consentono **posizionamenti precisi**
 - ♦ **Pretensionatori** per tendere anche il ramo di ritorno → **per evitare il recupero del gioco nell'inversione del moto**
 - ❖ galoppini tenditori → pulegge folli attorno al proprio asse
 - ❖ pulegge con interasse variabile
 - ♦ **generano vibrazioni e irregolarità periodiche**



tensioni

$$T_2 < T_1$$

- la rotazione θ_2 è la posizione relativa tra i membri $i-1$ e $i+1$
- esempio del robot SCARA con 4 gradi di mobilità



RIDUTTORE DI VELOCITÀ

- Sono impiegati per **ridurre la velocità di rotazione del motore**
 - le **velocità dei bracci sono inferiori a 10 rad/s** → i motori hanno **comportamento ottimale per velocità superiori** (un valore tipico del regime di funzionamento è, per esempio, 1000 giri/min \cong 100 rad/s)
 - **rapporti di riduzione bassi** $1/1000 < \tau < 1/10$
 - **vantaggi**
 - ♦ **ottimizzazione del campo di funzionamento del motore** in relazione alla coppia motrice e velocità di rotazione
 - ♦ **riduzione della coppia motrice** richiesta
 - ♦ **abbassamento delle frequenze delle irregolarità periodiche** prodotte dal motore → allontanamento dalla frequenza fondamentale del manipolatore
 - **svantaggi**
 - ♦ **aumento del peso e del carico inerziale**
 - ♦ **aumento dell'elasticità e dei giochi** → **vibrazioni**

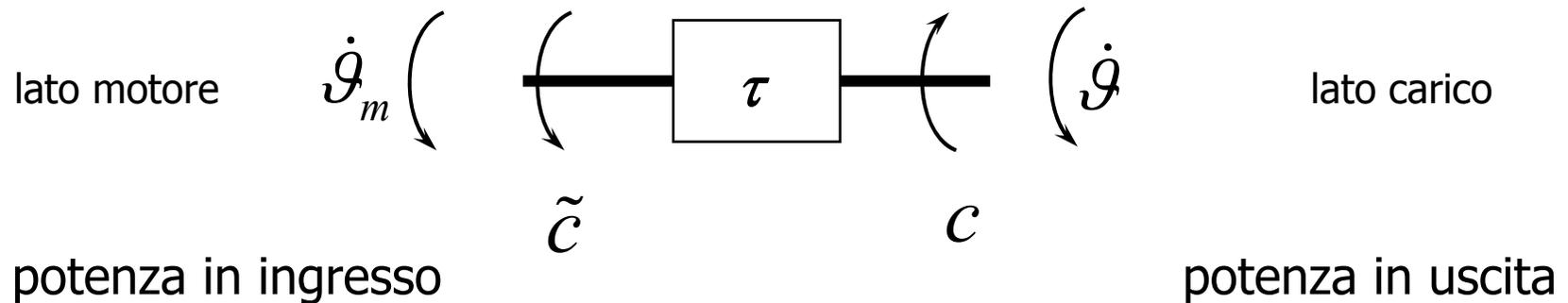
- Un riduttore di velocità deve possedere i seguenti **requisiti**
 - **massa e ingombro contenuti**
 - ♦ limitazione del **carico inerziale**
 - ♦ **compattezza** costruttiva
 - **rigidezza e giochi piccoli**
 - ♦ requisiti di **precisione**
 - ♦ contenimento delle **vibrazioni**
 - **rapporti di trasmissione molto bassi τ**
 - ♦ **riduce il rendimento η**
 - **rapporto di trasmissione τ costante**
 - ♦ **assenza di irregolarità di moto** che eccita le **vibrazioni**
 - **rendimento η elevato**
 - ♦ **vantaggio** → riduzione delle **perdite di potenza**
 - ♦ **svantaggio** → **moto retrogrado** consentito sotto l'azione del peso

adeguare la velocità di rotazione ottimale del motore alle varie condizioni di moto del braccio

- rapporto di riduzione costante:

$$\tau = \dot{\vartheta}(t) / \dot{\vartheta}_m(t) \quad \Rightarrow \quad \text{in robotica } \tau \ll 1$$

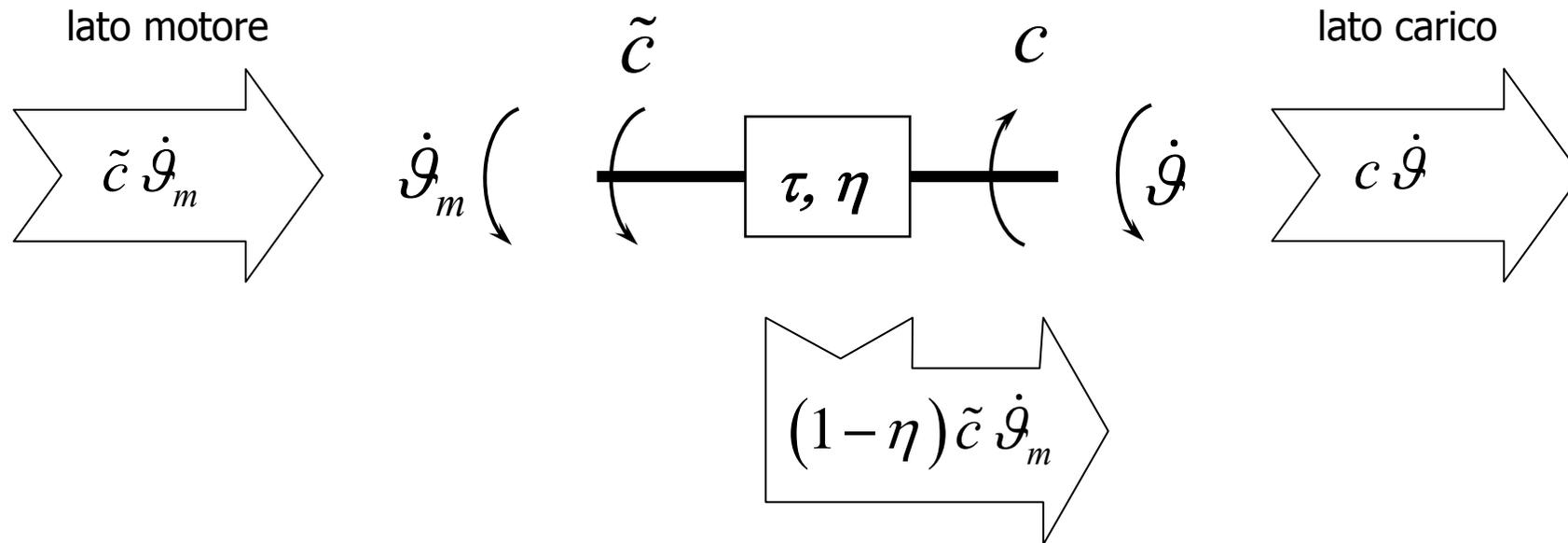
- bilancio di potenza sul riduttore:



$$\tilde{c} \dot{\vartheta}_m = c \dot{\vartheta}$$

$$c(t) = \frac{1}{\tau} \tilde{c}(t) \quad \Rightarrow \quad \text{notevole aumento della coppia}$$

- nel caso reale il bilancio di potenza si scrive considerando il rendimento η del riduttore



$$\tilde{c} \dot{\mathcal{J}}_m \eta = c \dot{\mathcal{J}}$$

$$c(t) = \eta \frac{1}{\tau} \tilde{c}(t) \quad \Leftrightarrow \quad 0 < \eta < 1 \quad \text{di solito} \quad \eta > 0.9$$

EFFETTI DINAMICI DEL RIDUTTORE DI VELOCITÀ

Calcolo della coppia motrice

- la **coppia motrice** richiesta per effetto del riduttore di velocità è ridotta secondo il seguente calcolo

C_m → coppia motrice

C_r → coppia resistente agente sui bracci

J_m → momento d'inerzia motore + parte del riduttore ad alta velocità

J_l → momento d'inerzia bracci + parte del riduttore a bassa velocità

ω_m → velocità di rotazione del motore

$\omega_l = \omega_m \tau$ → velocità a valle del riduttore di velocità

bilancio di potenza \Rightarrow
$$\begin{cases} \omega_m C_m = \omega_m J_m \dot{\omega}_m + \omega_l J_l \dot{\omega}_l + \omega_l C_r \\ = \omega_m J_m \dot{\omega}_m + (\omega_m \tau) J_l (\dot{\omega}_m \tau) + (\omega_m \tau) C_r \end{cases}$$

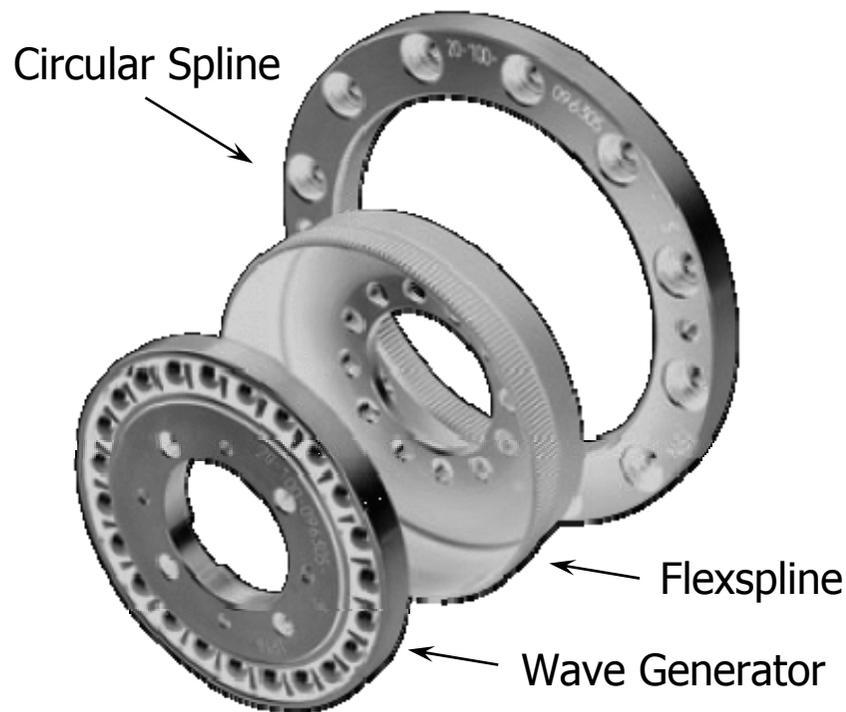
$$C_m = (J_m + \tau^2 J_l) \dot{\omega}_m + \tau C_r$$

- i motori sentono **carichi inerziali quasi costanti** per la presenza dei riduttori
- il momento d'inerzia sentito dal motore è la somma di 2 termini

$$J = J_m + J_{\text{var}}(q_{i+1}, \dots, q_n) \tau^2$$

- ❖ l'inerzia del motore $J_m \rightarrow$ **costante**
- ❖ l'inerzia della struttura a valle del giunto \rightarrow **varia notevolmente** (si consideri $J_{\text{var}}(q_{i+1}, \dots, q_n)$) ma è moltiplicata per $\tau^2 \ll 1$
- ❖ considerando che i **2 termini sono confrontabili** \rightarrow le **variazioni globali del momento d'inerzia sono contenute**

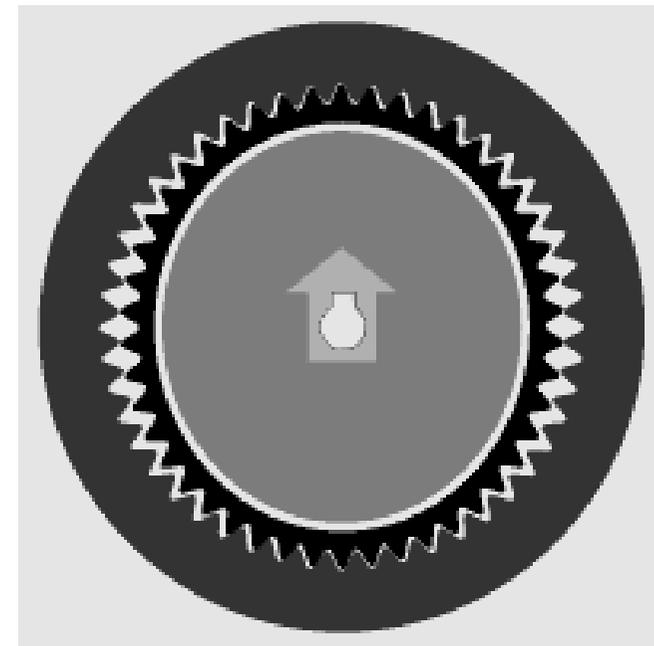
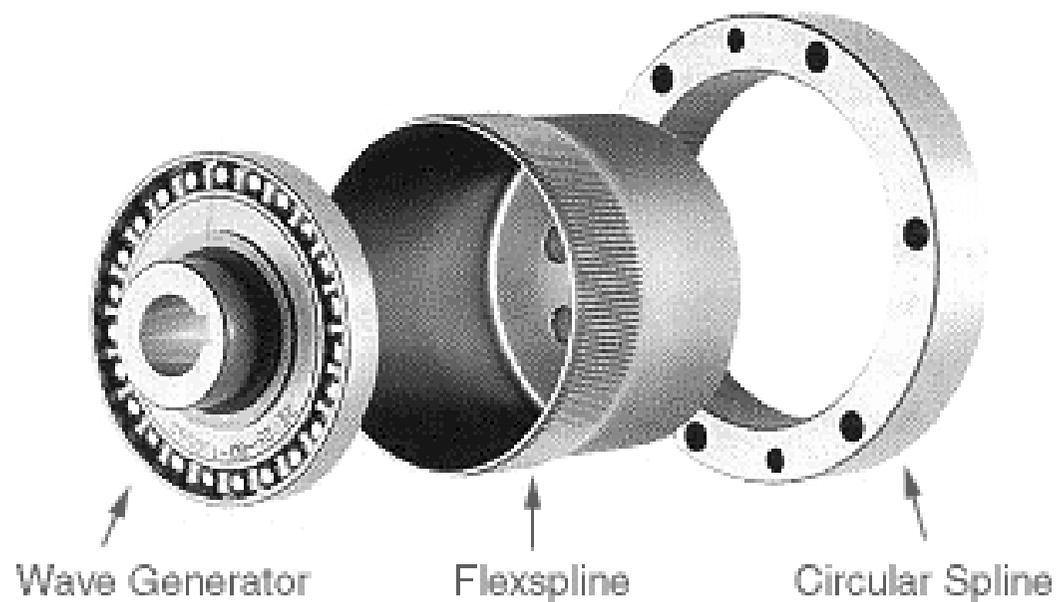
- 1955: inventato da **C. Walton Musser**
- Riduttore ampiamente utilizzato → **compatto, robusto e leggero**
- **Costituito da 4 elementi** → dall'interno verso l'esterno si ha
 - **Wave Generator (WG)** → disco rigido di forma ellittica, rotante intorno a un asse fisso e calettato sull'albero motore
 - **Cuscinetto elastico** → deformato dal WG e interposto tra WG e FS



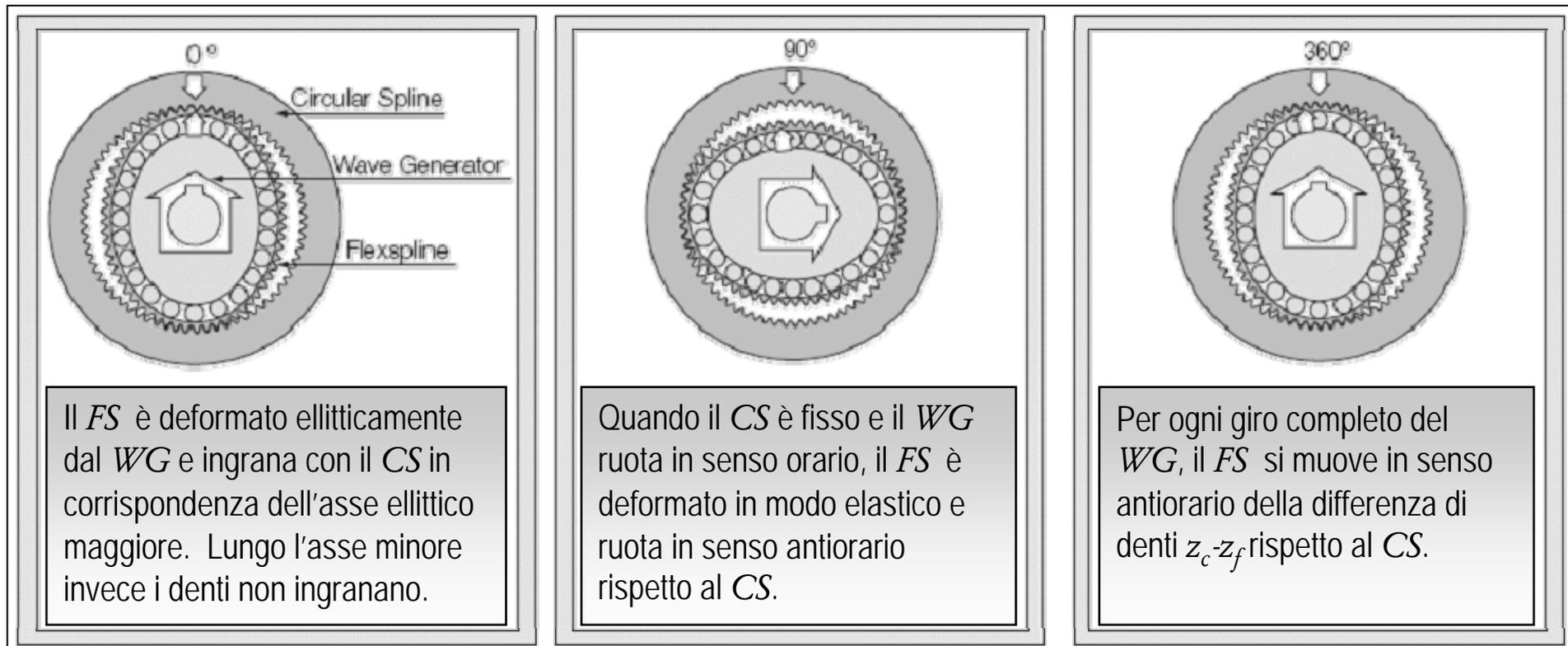
- **Flex Spline (FS)** → calettato sull'albero condotto, presenta una corona elastica, deformata da WG , con dentatura esterna di diametro poco inferiore al CS
- Circular Spline (CS)** → corona rigida con dentatura interna che ingrana con FS lungo l'asse maggiore del WG

Il funzionamento si può schematizzare come segue

- l'albero motore è il WG , il FS è l'albero condotto e il CS è fisso
- il WG attraverso il cuscinetto elastico deforma il FS secondo un'ellisse
- il FS ingrana con il CS in 2 zone sull'asse ellittico maggiore
- il FS ha un numero di denti z_f appena inferiore a quello z_c del CS
- FS e CS hanno lo stesso passo \rightarrow ingranano su un numero di denti uguale
- a ogni giro del WG , il FS ruota di $(z_c - z_f)$ denti in senso opposto



- il FS ha un numero di denti z_f appena inferiore a quello z_c del CS
- a ogni giro del WG il FS ruota di $z_c - z_f$ denti in senso opposto
- rapporto di trasmissione $\rightarrow \tau = -\dot{\alpha}/\dot{\phi} = (z_f - z_c)/z_f$
in cui il segno meno dipende dal fatto che le velocità di ingresso e uscita sono contrarie
- per esempio : $z_c = 202$, $z_f = 200 \rightarrow \tau = -1/100$



Vantaggi

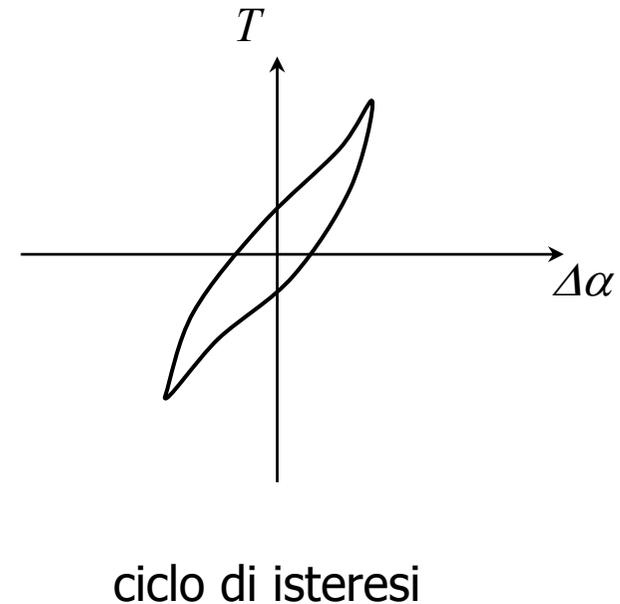
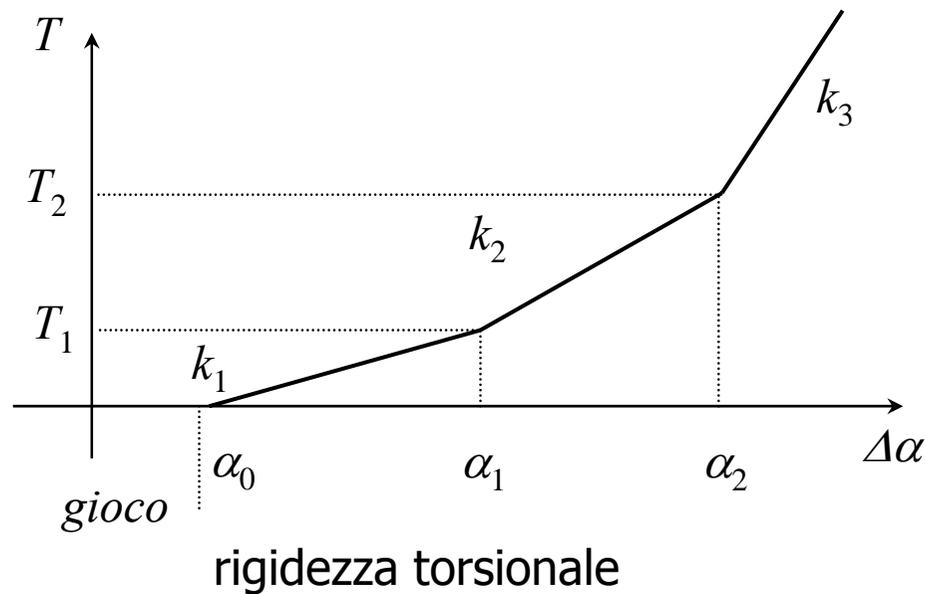
- **Precisione di posizionamento e ripetitività**
 - accuratezza inferiore a un minuto di arco e ripetitività entro pochi archi secondi
- **Elevata capacità di carico**
 - dal momento che la potenza è trasmessa per mezzo di un ingranamento multi-dente, offrono una capacità di coppia uguale a dispositivi che sono il doppio di taglia e che pesano tre volte tanto (fino a $6 \cdot 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$)
- **Giochi trascurabili**
 - Praticamente lavorano con gioco nullo tra i denti in presa grazie al naturale precarico della dentatura
- **Alta rigidità torsionale**
 - mostrano un'altissima rigidità torsionale lungo tutta la gamma di velocità di lavoro; la curva caratteristica di rigidità, praticamente lineare, garantisce un ottimo comportamento vibratorio

Vantaggi

- **Rapporto di trasmissione molto basso in un singolo-stadio**
 - da $1/320$ a $1/50$, in un singolo-stadio con un limitato numero di componenti
- **Alto rendimento, usura minima ed elevata durata**
 - i denti vengono in contatto con un movimento puramente radiale e hanno velocità di scorrimento nulla, anche ad alte velocità; le perdite dovute all'attrito tra i denti e l'usura sono praticamente trascurabili; si possono ottenere rendimenti fino da 80 a 90 per cento da albero ad albero
- **Compattezza**
 - la disposizione assiale riduce l'ingombro radiale ($\phi = 2 \cdot 10^{-2} \div 0.3$ m)
- **Massa ridotta e bassa inerzia**
 - grazie alla loro struttura costruttiva con tre soli componenti
- **Alta affidabilità**
 - per la semplicità costruttiva e il numero ridotto di componenti

Svantaggi

- **Necessita di un'elevata precisione di montaggio**
 - presi due *HD* identici \rightarrow i loro componenti non sono intercambiabili
- **Rigidezza torsionale k dipendente dal momento torcente applicato $T \rightarrow T = k \Delta\alpha$**
- **Mostra un ciclo di isteresi**



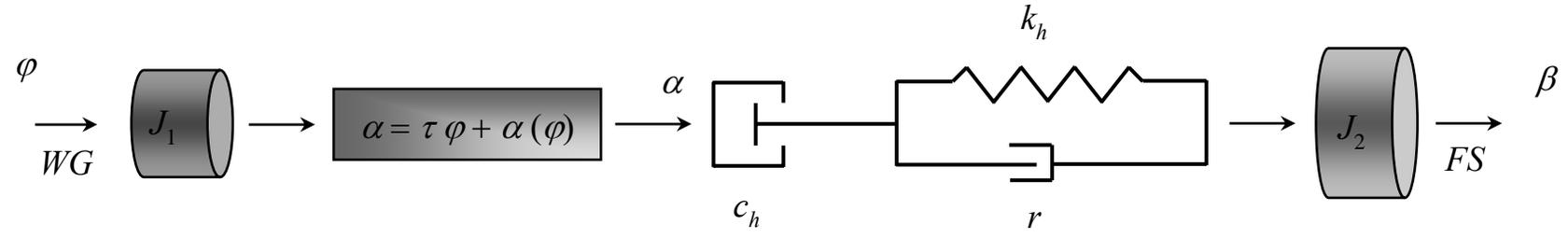
Svantaggi

- **Irregolarità di moto dovuta a imprecisioni costruttive e di montaggio**

- la posizione di uscita α non è proporzionale a quella d'ingresso φ , ma esiste un errore di posizione $\alpha_e \rightarrow \alpha_e = \varphi \cdot \tau - \alpha$
- il periodo dell'irregolarità è doppio della velocità d'ingresso $\dot{\varphi}$

- **Modello a parametri concentrati del comportamento reale dell'*HD***

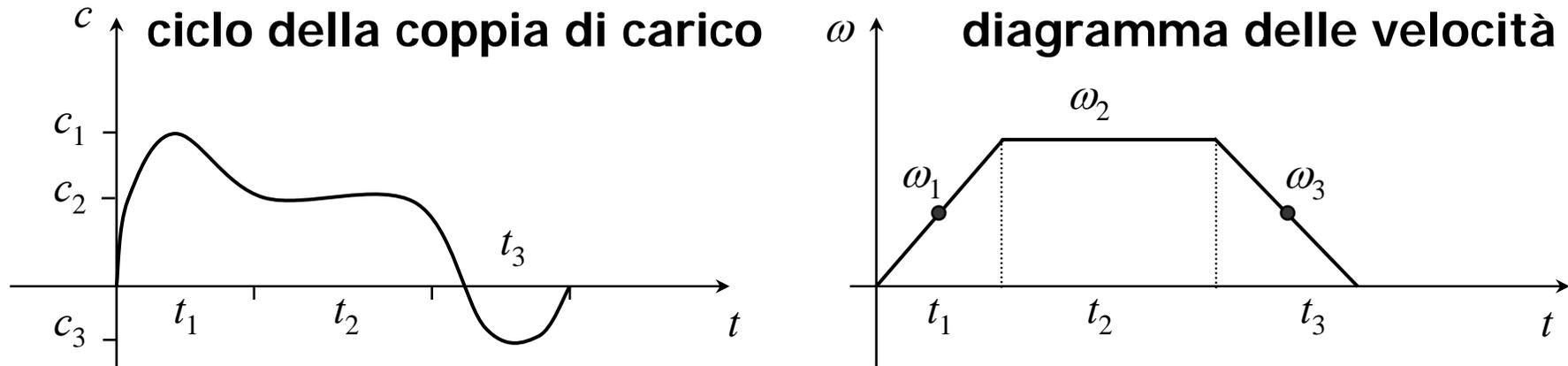
- φ → posizione angolare del *WG*
- α, β → posizione angolare teorica e reale del *FS*
- J_1, J_2 → momenti d'inerzia del *WG* e del *FS*
- c_h, r, k_h → gioco, smorzamento ed elasticità concentrata



- Gli *HD* in commercio si scelgono in base ai cataloghi dei costruttori che riportano specifiche tecniche e formule di verifica
- A titolo di **esempio** si riporta una tabella con alcune caratteristiche

Modelli	<i>HDUC 40</i>	<i>HDUC 32</i>	
τ	1/100	1/100	
vel. max lub. olio	5600	7000	<i>giri/min</i>
vel. max lub. grasso	3500	4000	<i>giri/min</i>
\bar{n}_m vel. media lub. olio	3600	4600	<i>giri/min</i>
vel. media lub. grasso	3000	3500	<i>giri/min</i>
\bar{c}_0 coppia media uscita	365	210	<i>N m</i>
\bar{c}_1 coppia media equivalente	260	135	<i>N m</i>
\bar{c}_2 coppia di picco	260	135	<i>N m</i>
\bar{c}_3 coppia di picco (casi eccezionali)	630	365	<i>N m</i>
J_{HD} momento d'inerzia (ingresso)	$5.45 \cdot 10^{-4}$	$2.0110 \cdot 10^{-4}$	<i>kg m²</i>

- Supponiamo di dover scegliere un *HD* per un determinato esercizio



- Si confrontano alcuni **valori di riferimento** con quelli della tabella

$$c_{\max} = \max(|c_1|, |c_3|) \quad \rightarrow \quad c_{\max} < \bar{c}_2 \quad \text{coppia di picco}$$

$$c_m = \sqrt[3]{\frac{\omega_1 t_1 c_1^3 + \omega_2 t_2 c_2^3 + \dots}{\omega_1 t_1 + \omega_2 t_2 + \dots}} \quad \rightarrow \quad c_m < \bar{c}_o \quad \text{coppia alla velocità di regime}$$

$$\omega_m = \frac{\omega_1 t_1 + \omega_2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} \quad \rightarrow \quad \omega_m < \bar{\omega}_m \quad \text{velocità media}$$

$$c_{eq} = c_m \sqrt[3]{\omega_m / \bar{\omega}_m} \quad \rightarrow \quad c_{eq} < \bar{c}_1 \quad \text{coppia equivalente}$$

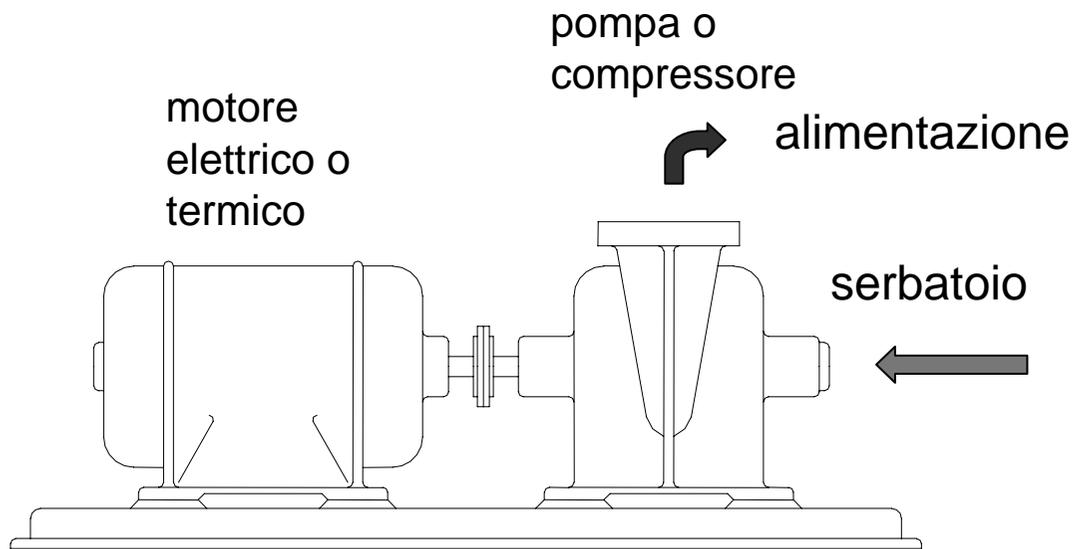
$$\text{stima di } c_{\max}^* \quad \rightarrow \quad c_{\max}^* < \bar{c}_3 \quad \text{coppia massima in casi eccezionali}$$

$$L_{50} = 3.5 \cdot 10^4 \bar{\omega}_m / \omega_m (\bar{c}_o / c_m)^3 \quad \rightarrow \quad \text{durata in ore del 50\% degli esemplari}$$

MOTORI PER LA ROBOTICA

- **I motori usati per la robotica sono**
 - **oleodinamici e pneumatici** → in applicazioni particolari che richiedono elevate sollecitazioni quasi esclusivamente per moti lineari
 - **Elettrici:**
 - ♦ **motori in corrente continua** → **i più diffusi** con potenze nominali fino a 1 MW per quelli a eccitazione indipendente
 - ♦ **motori sincroni a magneti permanenti :**
brushless → potenze nominali inferiori a 30 kW
 - ♦ **motori a induzione** per azionamenti controllati :
asincroni → potenze nominali comprese tra 30 kW e 1 MW
 - ♦ **motori a passo a magneti permanenti, a riluttanza variabile** ma soprattutto **ibridi** → potenze nominali inferiori al kW

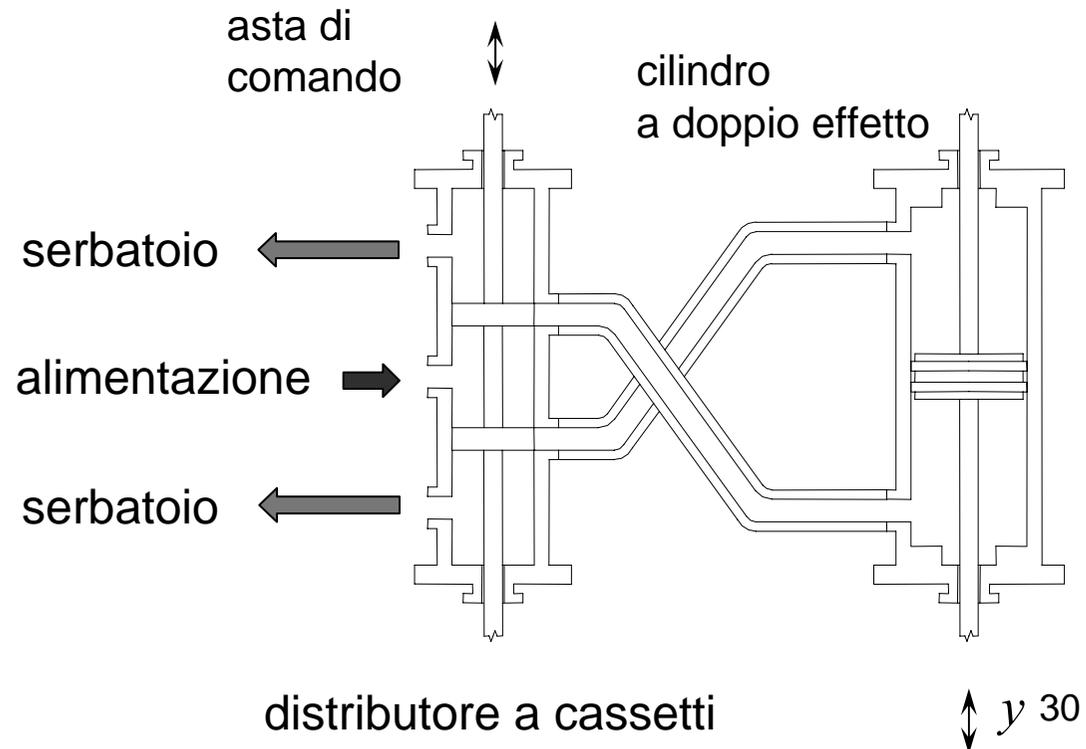
Azionamenti Oleodinamici e Pneumatici



Trasformazione energia elettrica o termica \Rightarrow energia di pressione
 Pompa accoppiata a dispositivi regolatori di

- portata
- cilindrata
- pressione di mandata
- potenza in ingresso

Trasformazione energia di pressione \Rightarrow lavoro meccanico

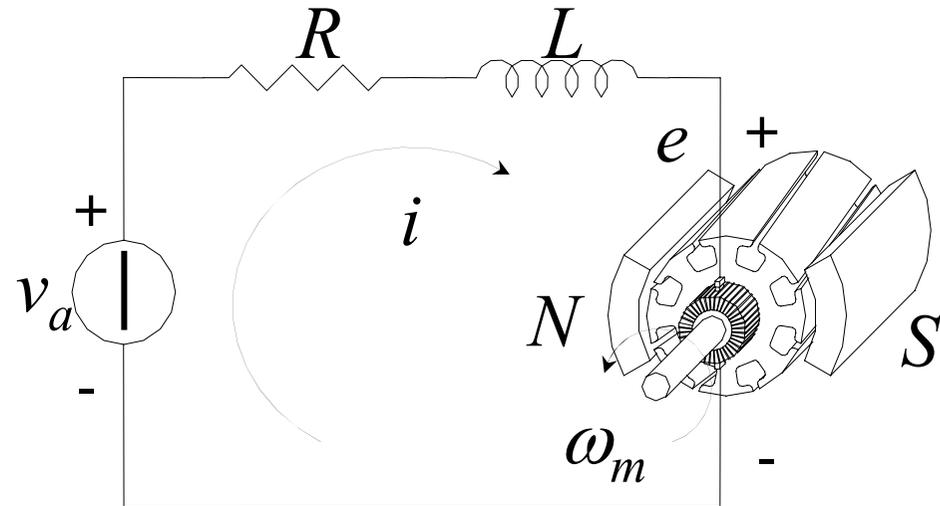


AZIONAMENTI ELETTRICI

Motore DC con collettore (Brush Motor)

Induzione sullo statore con:

- **magneti permanenti**
- **eccitazione indipendente**
con flusso di eccitazione φ
costante essendo $\varphi = f(i_e)$
ovvero funzione della corrente
di eccitazione



- vantaggi → diffuso, economico, elevata coppia di spunto
- svantaggi → consumo spazzole, coppia d'attrito radente legata alla pressione necessaria a diminuire le resistenze di contatto tra spazzole e collettore, scintillio e disturbi elettromagnetici attenuati con poli di commutazione e avvolgimenti compensatori, coppia residua di attrazione magnetica a basse velocità → fenomeno del "cogging"

Parte elettrica

- II legge di Kirchhoff → circuito di indotto o di armatura

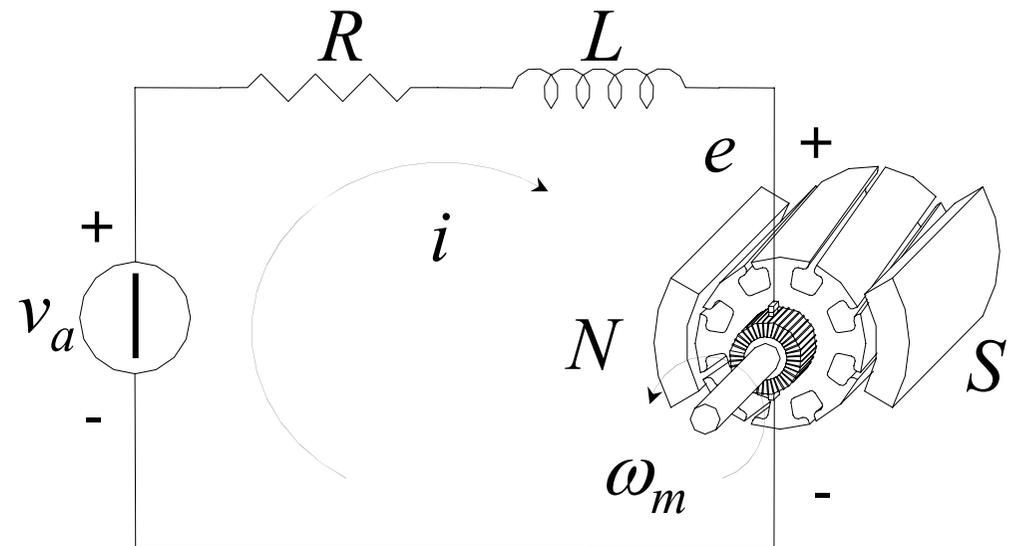
$$v_a(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

- forza controelettromotrice

$$e(t) = k_e \omega_m(t)$$

- trasformando nel dominio di Laplace

$$V_a(s) = k_e \Omega_m(s) + (R + sL)I(s)$$



- coppia motrice

$$c_m(t) = k_c \varphi i = k_i i(t)$$

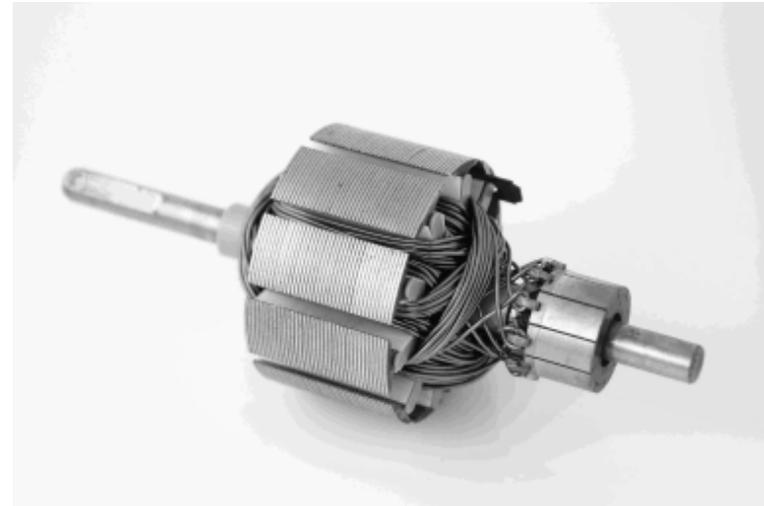
$$C_m(s) = k_i I(s)$$

- eliminando la corrente

$$C_m(s) = \frac{k^2}{R + sL} \left(\frac{V_a(s)}{k} - \Omega_m(s) \right)$$

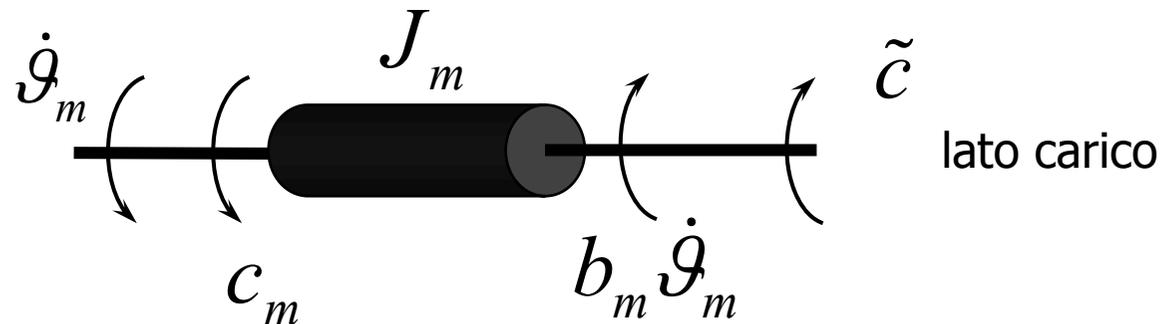
- ricordando il bilancio di potenza del motore

$$ei = k_e \omega_m i = k_i i \omega_m = c_m \omega_m \quad \Rightarrow \quad k_e = k_i = k$$



Parte Meccanica lato Motore

- La parte meccanica del motore può essere modellata:



$\dot{\vartheta}_m = \omega_m \rightarrow$ velocità angolare motore

$J_m \rightarrow$ momento d'inerzia componenti
rotanti ad alta velocità (ω_m)

$b_m \rightarrow$ coefficiente d'attrito viscoso

$\tilde{c}(t) \rightarrow$ coppia utile ridotta all'albero motore

$$c_m(t) = J_m \ddot{\vartheta}_m(t) + b_m \dot{\vartheta}_m(t) + \tilde{c}(t)$$

- Eliminando C_m

$$\begin{cases} C_m(s) = \frac{k^2}{(R + sL)} \left(\frac{V_a(s)}{k} - \Omega_m(s) \right) \\ C_m(s) = (J_m s + b_m) \Omega_m(s) + \tilde{C}(s) \end{cases}$$

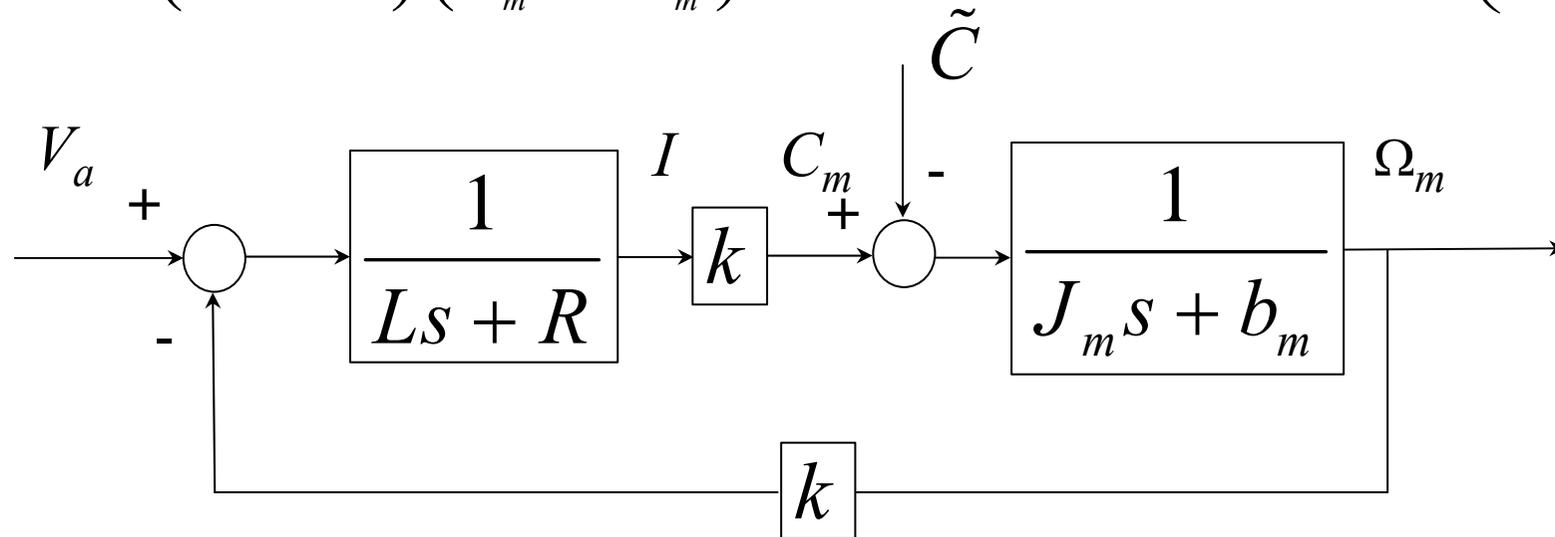
- Funzione di trasferimento $V_a \Rightarrow \Omega_m$

$$\Omega_m(s) = \frac{k}{(R + sL)(J_m s + b_m) + k^2} V_a(s)$$

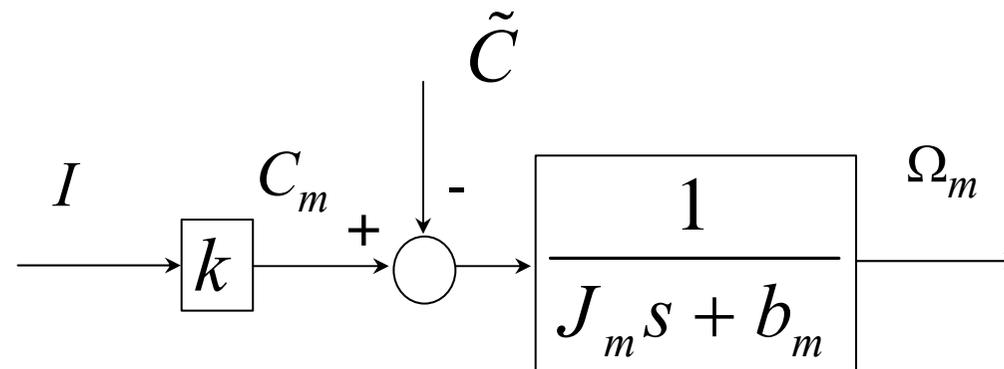
- Funzione di trasferimento $\tilde{C} \Rightarrow \Omega_m$

$$\Omega_m(s) = -\frac{(R + sL)}{(R + sL)(J_m s + b_m) + k^2} \tilde{C}(s)$$

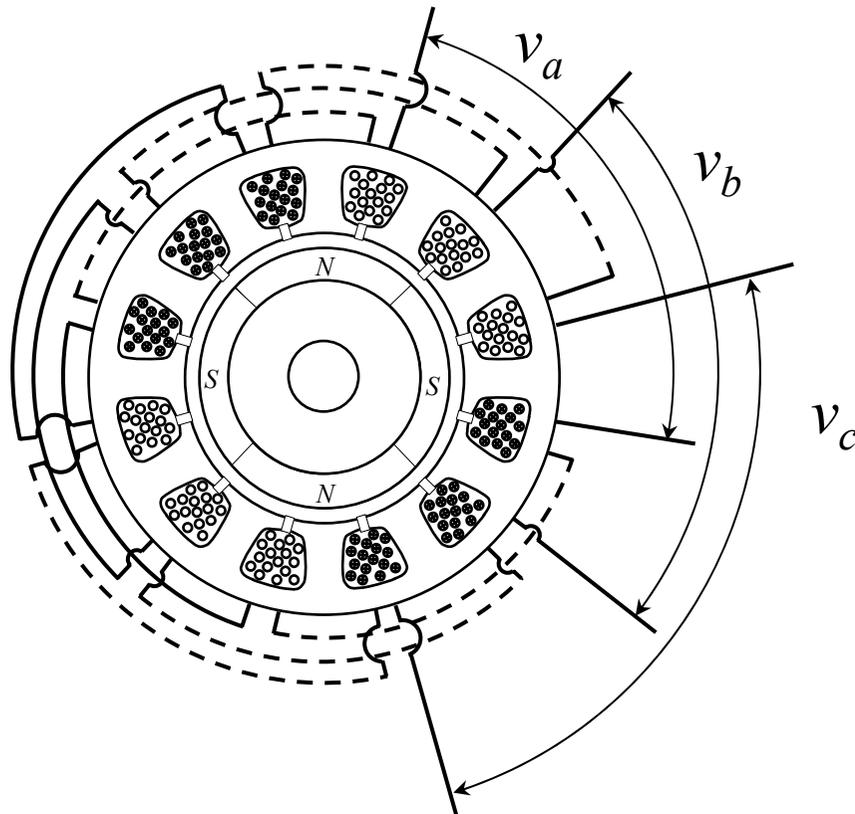
$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(R + sL)(J_m s + b_m) + k^2} \begin{pmatrix} k & -(R + sL) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a(s) \\ \tilde{C}(s) \end{pmatrix}$$



$$C_m(s) - \tilde{C}(s) = (J_m s + b_m) \Omega_m(s)$$

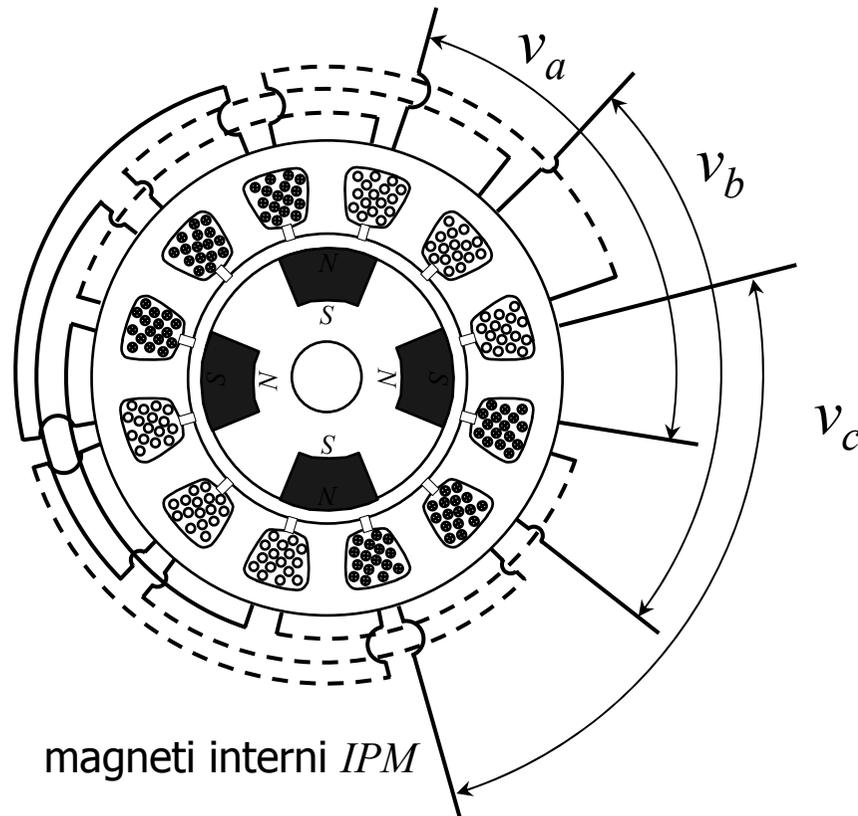


- il **rotore** di alluminio con **magneti permanenti** in materiale ceramico e terre rare genera un **campo magnetico** costante e solidale a esso
- sullo **statore** il **circuito di indotto** di tipo polifasico (trifase) genera un **campo magnetico rotante sincrono** alla velocità di rotazione del rotore



magneti superficiali *SPM*

I motori a magneti superficiali (Surface Permanent Magnet) possono essere considerati, da un punto di vista magnetico, dei motori isotropi con un elevato spessore di traferro, in quanto i magneti hanno una permeabilità relativa prossima a quella dell'aria



8
 I motori a **magneti annegati** o **interni** (Interior Permanent Magnet) hanno una struttura meccanica più robusta, quindi particolarmente adatti ad applicazioni ad alta velocità, poiché i magneti sono fisicamente contenuti all'interno del rotore e protetti. Benché tali motori abbiano un rotore con una struttura geometrica isotropa, non possono essere considerati isotropi da un punto di vista del circuito magnetico.

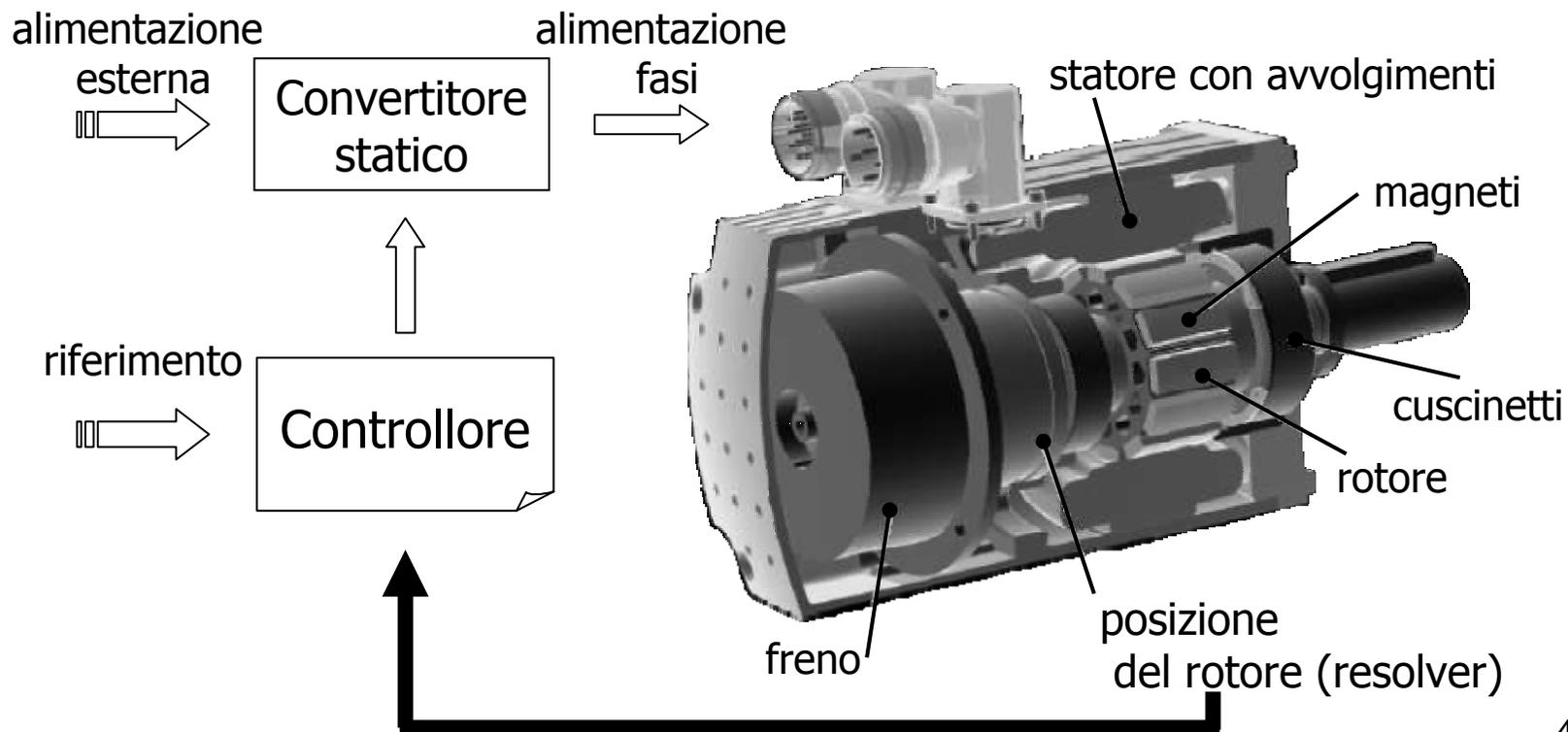
Motore brushless

- statore e rotore hanno funzioni scambiate rispetto a un motore DC
- il valore della coppia motrice è strettamente collegato al valore della corrente che attraversa gli avvolgimenti di statore $\rightarrow c_m = k_t \cdot i$
- per poter essere utilizzato a velocità variabile deve essere inserito, insieme al convertitore, in una controreazione di velocità

Esistono due tipi di motore brushless entrambi funzionano con una controreazione che pilota l'inverter con misure della velocità o della posizione angolare del rotore

- ❖ Brushless D. C. → gli avvolgimenti statorici sono concentrati e le f.e.m. ivi indotte hanno forma pressoché trapezoidale
 - alimentati da inverter a corrente impressa
 - più semplice il controllo dell'inverter
 - usano come sensori encoder ottici o sonde a effetto Hall (sensibili al passaggio dei magneti permanenti, solitamente sono 3)
- ❖ Brushless A. C. → gli avvolgimenti statorici sono distribuiti e le f.e.m. ivi indotte hanno forma pressoché sinusoidale
 - alimentati da inverter a tensione impressa
 - più difficile il controllo dell'inverter
 - prestazioni più elevate
 - usano come sensori resolver → piccolo generatore sincrono bifase a magnete permanente solidale all'albero

- ❖ un **convertitore statico** provvede all'alimentazione degli avvolgimenti delle fasi con tecniche *PWM*
- ❖ il vettore del flusso dell'**indotto statorico** dovrà mantenersi perpendicolare al flusso dell'**induttore rotorico** (correnti di indotto in fase o in opposizione con la f.e.m. indotta dal rotore) → coppia massima
- ❖ Un **trasduttore di posizione angolare** (resolver) dà informazioni sulla posizione del rotore per avere un controllo di coppia con una caratteristica coppia-corrente **lineare**



i **motori brushless** hanno i seguenti **vantaggi** rispetto ai motori DC

- assenza del sistema di **commutazione meccanica** → collettore e spazzole
 - ◆ consente di sovraccaricare elettricamente il motore
 - ◆ elevate velocità di rotazione → bassa inerzia del rotore
 - ◆ elevato rapporto coppia/momento d'inerzia
 - ◆ maggiore rendimento
 - ◆ bassa rumorosità e problemi di usura ridotti
 - ◆ bassa manutenzione
 - ◆ alta affidabilità
 - ◆ assenza di scintillio → pericoloso in alcuni ambienti operativi
- **avvolgimenti sullo statore**
 - ◆ dissipazione del calore facilitata → possibilità di sovraccaricare
 - ◆ dimensioni contenute per motori di prestazioni contenute
 - ◆ potenze elevate tramite sovraccarico

i **motori brushless** hanno i seguenti **svantaggi** rispetto ai motori DC

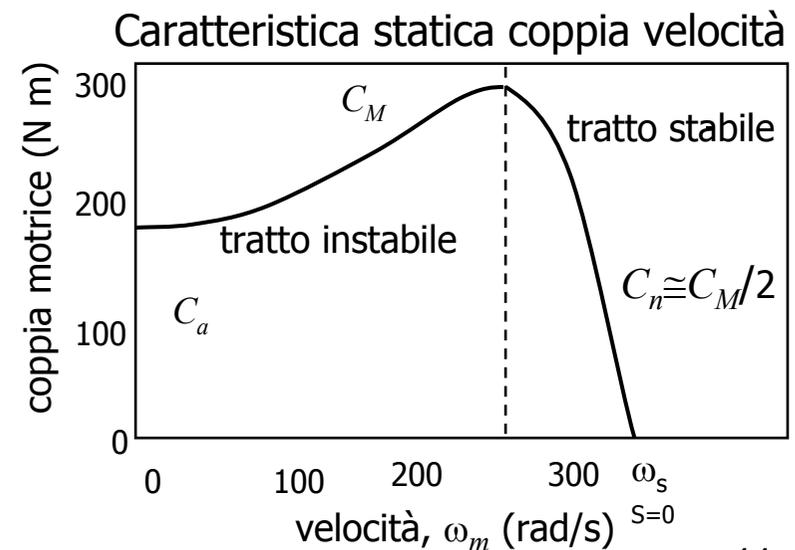
- **costi elevati** → controllore elettronico e trasduttore di posizione
- **coppia erogata non costante**
 - per motivi di costi in genere nell'avvolgimento statorico ci sono **3 fasi collegate a stella** per impedire la circolazione delle armoniche superiori di corrente, la tensione di alimentazione è però, a parità di potenza, maggiore del collegamento a triangolo che non fa circolare le armoniche superiori solo se le impedenze sono perfettamente uguali
 - **variazioni della coppia del 20%** tra valore medio e valore di picco
 - l'impiego di azionamenti *PWM* con **codifica sinusoidale** per **alimentare lo statore** consente di ottenere **coppie praticamente costanti** e con caratteristica lineare rispetto alla corrente → $c_m = k_t \cdot i$
- **smagnetizzazione ad alte temperature**
- non adatti in ambienti con **polveri ferromagnetiche**
- a basse velocità fenomeno del "cogging "

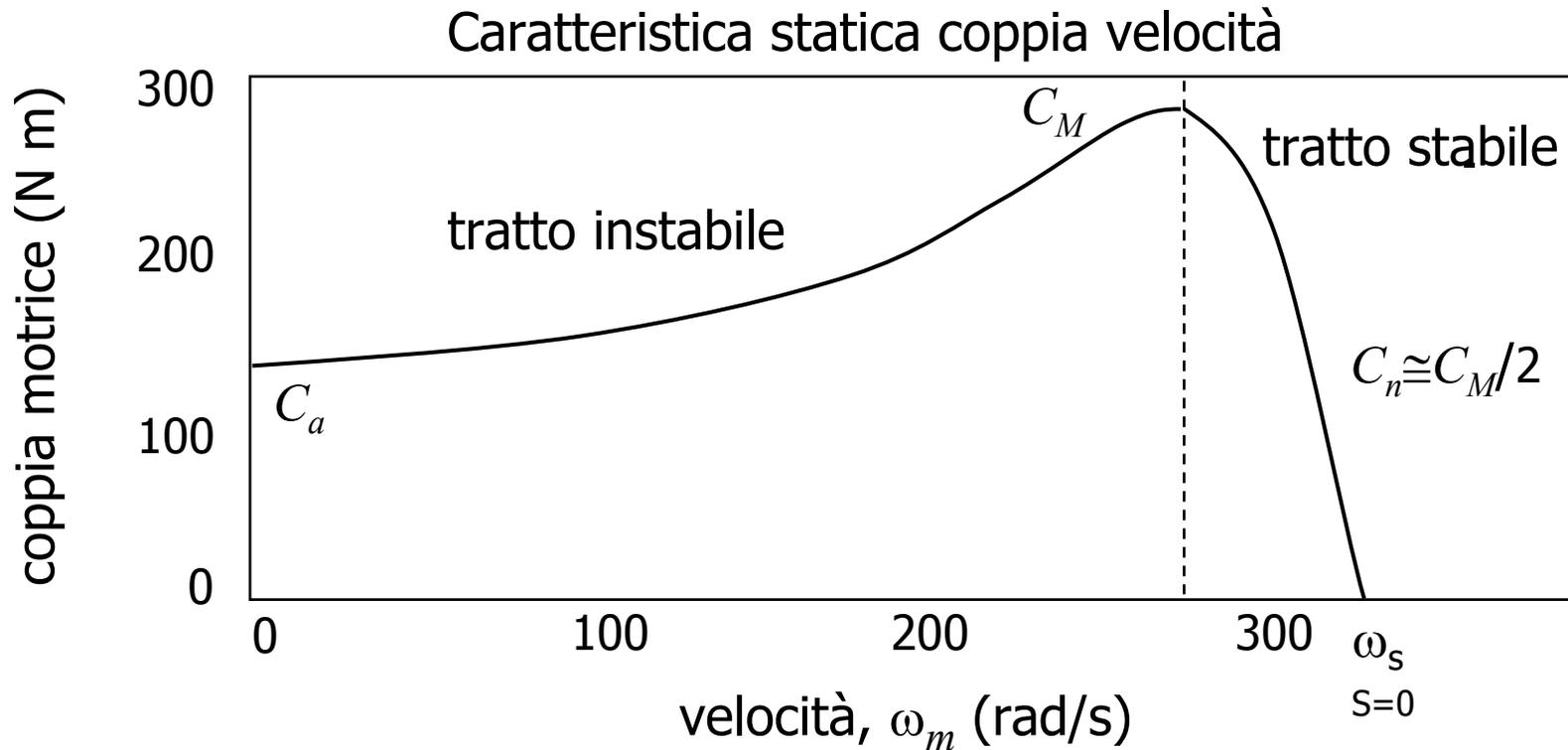
- I motori asincroni sono motori ad induzione, caratterizzati da un campo magnetico rotante generato dagli avvolgimenti di statore trifasici sistemati in cave a $120^\circ/p$
- Parametri di interesse
 - **frequenza di alimentazione, f**
 - **numero di coppie polari, p**
 - **velocità di sincronismo, ω_s** $\rightarrow \omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}$
 - **scorrimento, s** $\rightarrow s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$
- vantaggi \rightarrow robusto, possibilità di raggiungere velocità molto elevate, affidabile, notevole silenziosità, economico
- svantaggi \rightarrow per prestazioni elevate richiedono tecniche di controllo molto complesse (controllo a orientamento di campo), calore sul rotore, rendimento più basso, "cogging"

- possono essere utilizzati negli azionamenti a velocità variabile grazie allo sviluppo degli inverter → alimentatori elettronici che trasformano una tensione continua in una tensione a frequenza variabile potendo variarne anche il valore medio. La tensione continua è ottenuta mediante circuito raddrizzatore dalla rete che fornisce grandezze alternate a 50 Hz.
- la caratteristica statica coppia-velocità nel tratto vicino alla velocità di sincronismo, cioè di utilizzazione, può essere approssimata con una retta di coefficiente angolare k

$$c_m \cong k (\omega_s - \omega_m)$$

vicino alla velocità di sincronismo





- nel dominio di Laplace:

$$C_m(s) = k(\Omega_s(s) - \Omega_m(s))$$

$$C_m(s) = (sJ_m + b_m)\Omega_m(s) + \tilde{C}(s)$$

- eliminando la coppia:

$$\left[s J_m + (b_m + k) \right] \Omega_m(s) + \tilde{C}(s) = k \Omega_s(s)$$

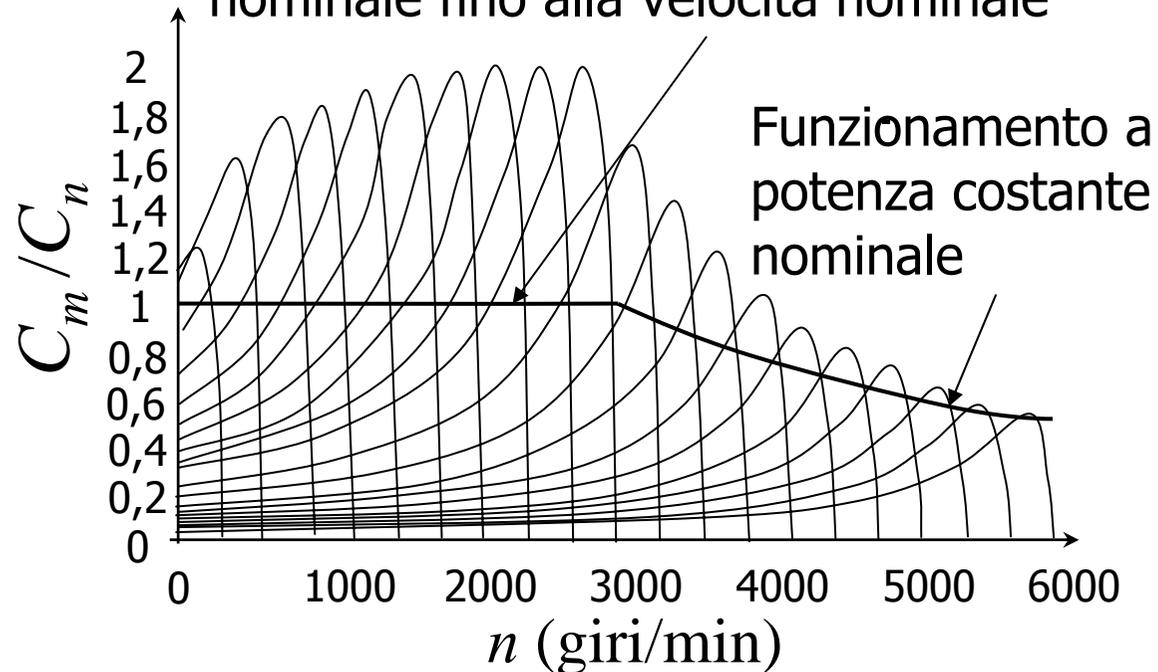
- Pensando a \tilde{C} come a un disturbo:

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{s J_m + (b_m + k)} \begin{pmatrix} k & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega_s(s) \\ \tilde{C}(s) \end{pmatrix}$$

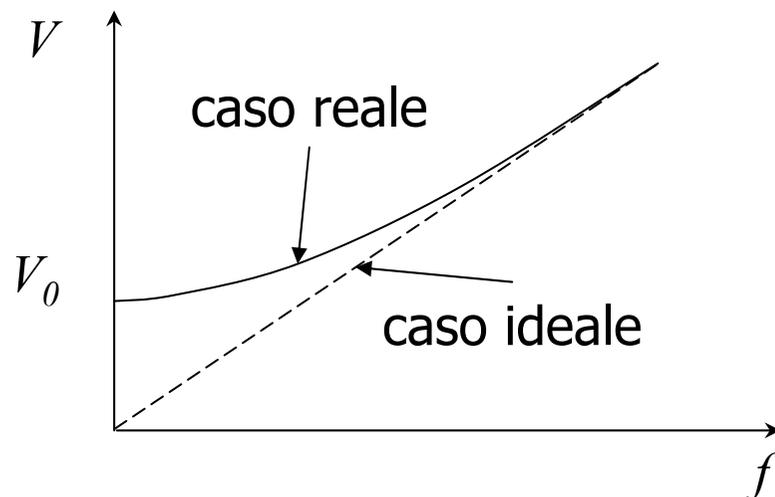
- la regolazione di velocità avviene tramite un *inverter* che modifica la frequenza di alimentazione, $f \rightarrow$ **velocità di sincronismo**. Per mantenere il flusso di statore costante \rightarrow **coppia massima costante**, è necessario modificare il modulo della tensione così che $V_a = k_v f$.

Caratteristiche statiche coppia velocità caso non ideale

Funzionamento a coppia costante
nominale fino alla velocità nominale



Aumentando la frequenza oltre quella corrispondente alla velocità nominale e non potendo, per il dimensionamento dell'isolamento superare la tensione nominale, il flusso magnetico deve diminuire, **deflussaggio** → la coppia diminuisce ma la potenza rimane costante.

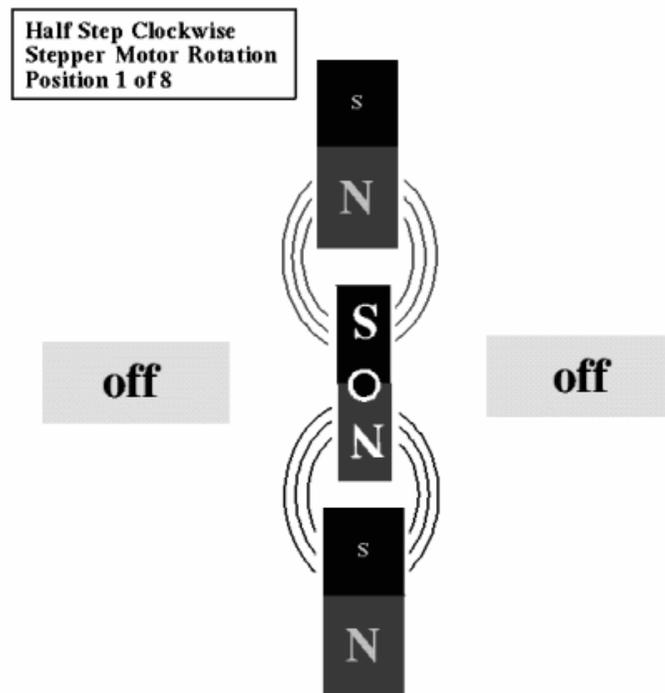


- La curva non lineare serve a compensare le cadute ohmiche induttive nello statore a basse velocità → questo inverter detto anche scalare ha dunque notevoli limitazioni alle basse velocità

Ci sono **tre tipi** di motore a seconda di come è fatto il rotore:

- **a magneti permanenti**, con rotore isotropo, liscio
- **a riluttanza variabile**, con rotore anisotropo senza magneti, a poli salienti
- **ibridi**, con rotore anisotropo (a poli salienti) e magneti

Lo statore ha poli sporgenti con un numero di coppie polari n_s diverso da quello rotorico n_r , per l'avviamento e la bidirezionalità del motore, solitamente $n_s = n_r + 1$

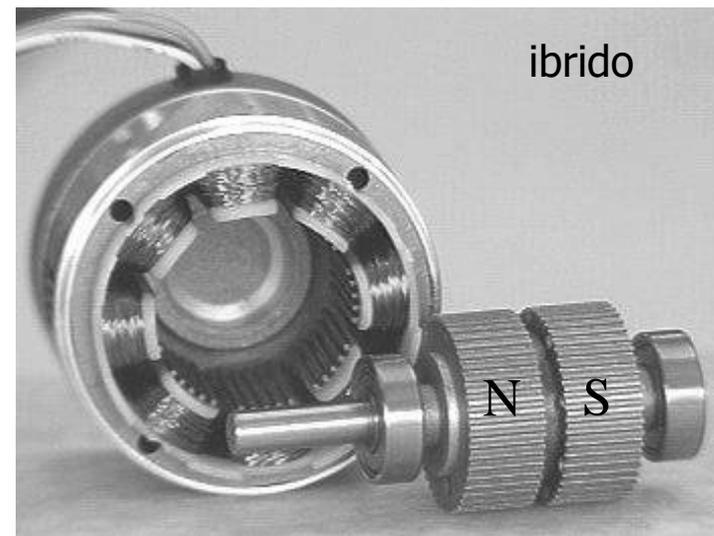


(c) 1998 Copyright Greg Ercolano

Principio di funzionamento

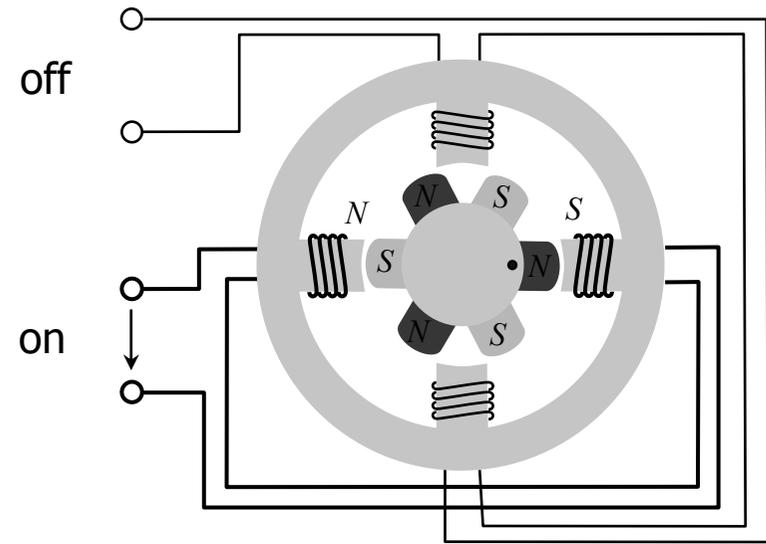
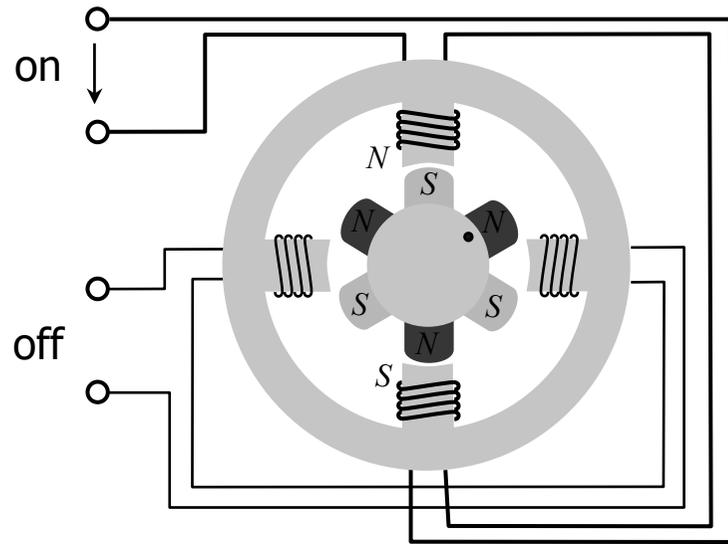
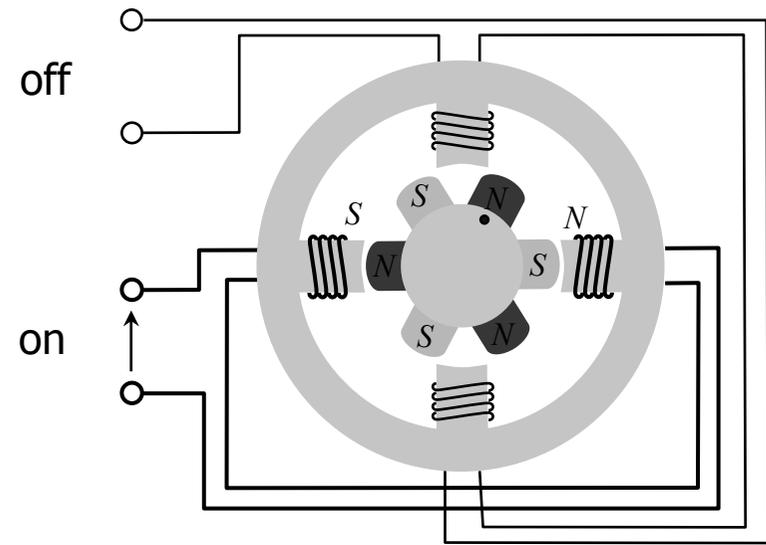
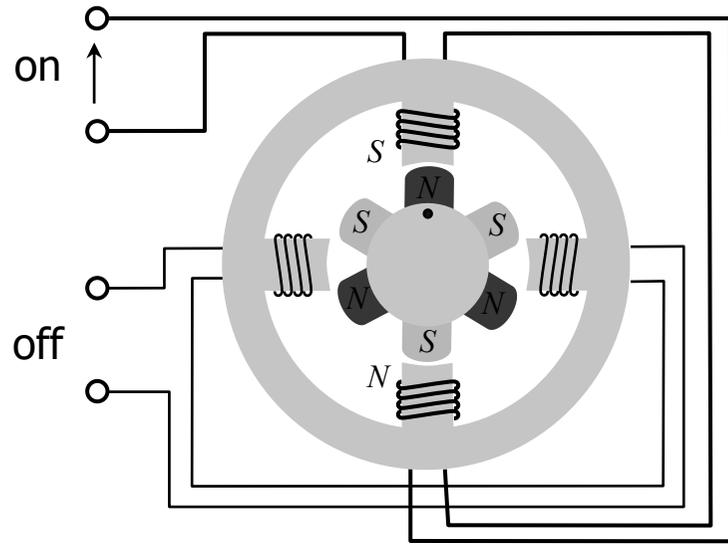
- un **modulo elettronico** (dispositivo di commutazione + PLC) comanda le correnti di **statore** per **ruotare i poli N e S** nel verso prefissato di un certo numero di **passi**
- il **rotore tende ad allinearsi con il campo magnetico** generato dallo statore per effetto dei magneti o dell'anisotropia della riluttanza
- a posizionamento avvenuto **il rotore può assumere solo determinate posizioni angolari discrete** multiple del passo

- I motori **ibridi** e a **magneti permanenti** sono **bipolari** → la corrente nelle bobine statoriche deve poter scorrere nei due sensi perché c'è la necessità di invertire le loro polarità magnetiche. Particolari driver e configurazioni degli avvolgimenti consentono questo (Es. un ponte H)
- I motori a **riluttanza variabile** sono **unipolari** → perché l'allineamento del rotore è indipendente dalle polarità magnetiche delle bobine di statore con notevole semplificazione dei circuiti di alimentazione



Funzionamento a passo intero (Wave Mode)

20
2



– vantaggi

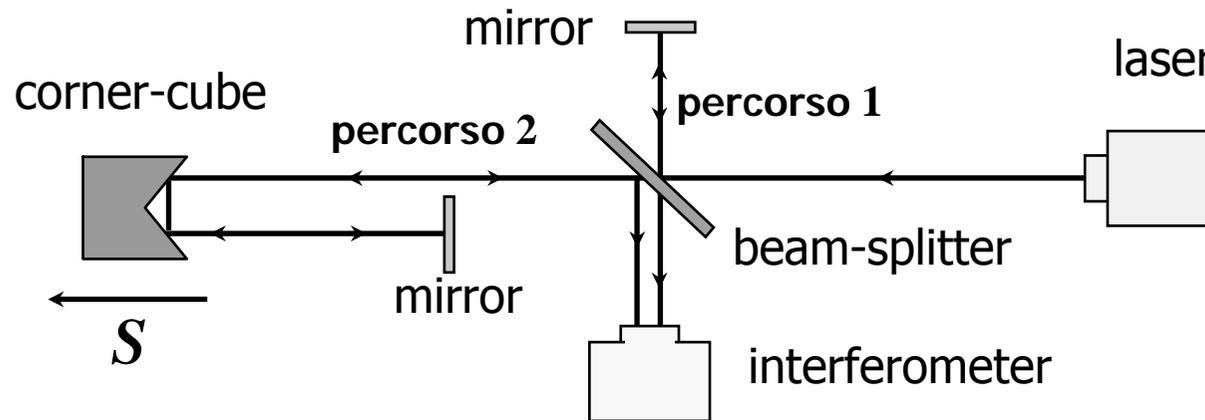
- ♦ se le coppie resistenti applicate sono inferiori a quelle erogabili il rotore segue sempre il campo magnetico generato dai circuiti di statore e si **muove per passi noti e discreti** → **precisione** nel posizionamento
- ♦ sono controllati a **catena aperta** tramite una sequenza di impulsi
- ♦ non ha difficoltà di **avviamento**
- ♦ possibilità di bloccare il rotore in una posizione ben definita
- ♦ la **velocità è facilmente variata** imponendo la frequenza con cui si succedono gli impulsi di alimentazione delle bobine e rovesciandone la sequenza si inverte il senso di rotazione

– svantaggi

- ♦ **movimento irregolare** a “scatti” e **basse coppie** disponibili
- ♦ **dispositivi** di comando **elettronici** possono **attenuare l’irregolarità** del **movimento** e aumentare la risoluzione → **aumento dei costi**
- ♦ **non** consentono di effettuare la **frenatura elettrica**
- ♦ La funzione di trasferimento **velocità-coppia** ha un’**antirisonanza**

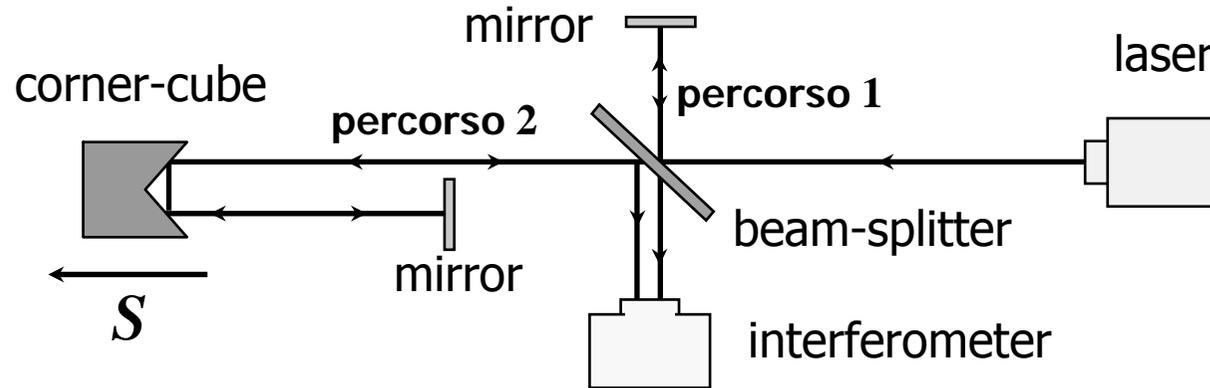
SISTEMI DI MISURA A DISTANZA

- Sono dispositivi che permettono, **senza contatto** con la superficie, di misurare:
 - la **posizione**
 - l'**orientamento**
- Esistono vari **dispositivi** per effettuare questo tipo di misure
 - sistemi basati su **raggi laser** (**Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation**) cioè un **raggio**
 - ♦ **di luce monocromatica** → cioè con un'unica lunghezza d'onda
 - ♦ **coerente** → la fase delle onde componenti è costante nel tempo e nello spazio
 - ♦ per queste caratteristiche → **concentrato e tendente a non diffondersi**
 - sistemi a **ultrasuoni**



Principio di Funzionamento

- Il dispositivo si avvale principalmente di 3 elementi
 - l'**interferometro** misura le caratteristiche dei **raggi laser entranti**
 - il **beam-splitter** è un elemento **semitrasparente** che **riflette** parte della luce lasciando passare la rimanente
 - il **corner-cube** è uno **specchio** che mantiene **paralleli** il **raggio incidente** e il **raggio riflesso**
 - ♦ **indipendentemente dall'angolazione** del raggio incidente
 - ♦ il **corner-cube** è **solidale al corpo** di cui si vuole misurare lo spostamento



- Il **raggio** laser emesso dal generatore è **diviso in 2** dal **beam-splitter**
 - un **raggio** è generato dalla **riflessione sul beam-splitter** → si riflette sullo specchio fisso → passa il beam-splitter → entra nell'interferometro
 - ♦ il **percorso** di questo raggio è **fisso e noto**
 - un **raggio** è generato dall'**attraversamento del beam-splitter** → è riflesso dal corner-cube → è riflesso da uno specchio fisso → torna al beam-splitter → è riflesso dal beam-splitter → entra nell'interferometro
 - ♦ la lunghezza del **percorso** **dipende dallo spostamento del corpo**
- Nell'**interferometro** entrano **2 raggi** laser
 - un **raggio** ha **ampiezza e fase costante**
 - un **raggio** di **ampiezza e fase** dipendente **dallo spostamento del corpo**

– si può scrivere, indicando con

c → velocità della luce

$f, \lambda = c/f$ → frequenza e lunghezza d'onda della luce laser

l_1, l_2 → lunghezza dei percorsi dei 2 raggi laser

$$R_1 = A_1 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{l_1}{c}\right)\right] = A_1 \sin(2\pi f t - \phi_1) \Rightarrow \phi_1 = \frac{2\pi f l_1}{c} = 2\pi \frac{l_1}{\lambda}$$

$$R_2 = A_2 \sin\left[2\pi f\left(t - \frac{l_2}{c}\right)\right] = A_2 \sin(2\pi f t - \phi_2) \Rightarrow \phi_2 = \frac{2\pi f l_2}{c} = 2\pi \frac{l_2}{\lambda}$$

– indicando con → $k_i = \text{int}\left(\frac{l_i}{\lambda}\right) \Rightarrow l_i = k_i \lambda + a_i$ con $|a_i| < \lambda$ si ha

$$\phi_1 = 2\pi k_1 + 2\pi \frac{a_1}{\lambda}, \quad \phi_2 = 2\pi k_2 + 2\pi \frac{a_2}{\lambda}$$

– k_1 e k_2 sono il **numero intero di lunghezze d'onda λ** nei percorsi l_1 e l_2 , lo **sfasamento** tra R_1 e R_2 dipende dalla differenza → $(a_1 - a_2)/\lambda$

– k_1 e k_2 sono il **numero intero di lunghezze d'onda** λ nei percorsi l_1 e l_2 , lo **sfasamento** tra R_1 e R_2 dipende dalla differenza $\rightarrow (a_1 - a_2)/\lambda$ 5
4

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 = A_1 \sin(2\pi ft - \phi_1) + A_2 \sin(2\pi ft - \phi_2) \\ &= (A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2) \sin(2\pi ft) - (A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2) \cos(2\pi ft) = \\ &= A \sin(2\pi ft - \phi) = A \cos \phi \sin(2\pi ft) - A \sin \phi \cos(2\pi ft) \end{aligned}$$

$$\text{con } \begin{cases} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \\ \phi = \text{arctg} \left(\frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2} \right) \end{cases}$$

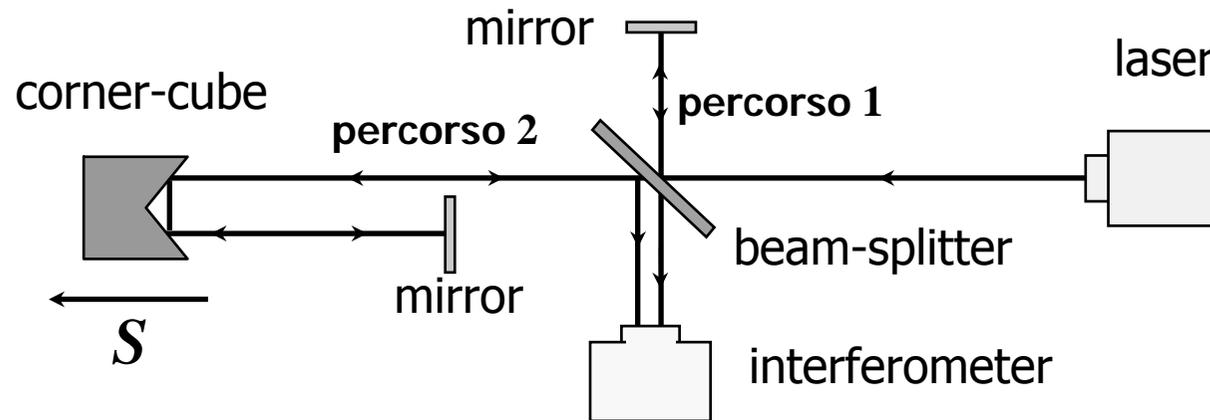
se R_1 è in fase con $R_2 \rightarrow \phi_1 = \phi_2$ si ha

$$A_{\max} = A_1 + A_2$$

se R_1 e R_2 sono in opposizione di fase $\rightarrow |\phi_1 - \phi_2| = 180^\circ$ si ha

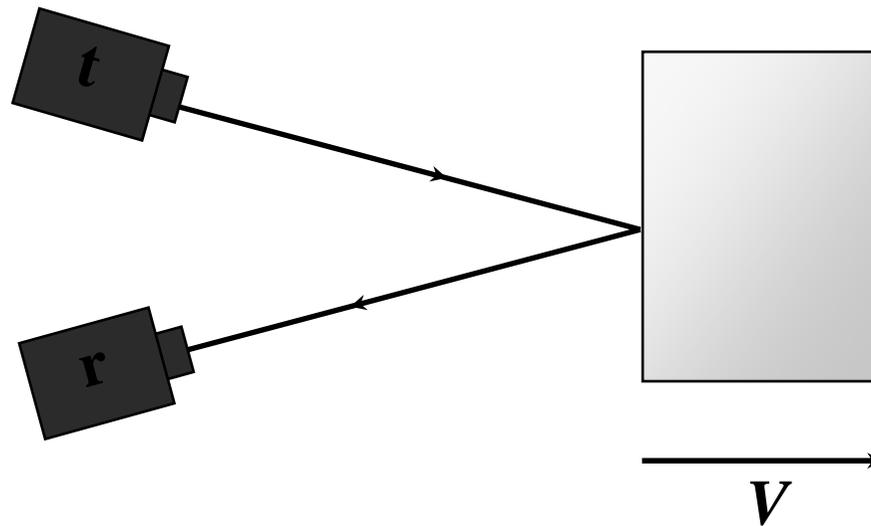
$$A_{\min} = |A_1 - A_2|$$

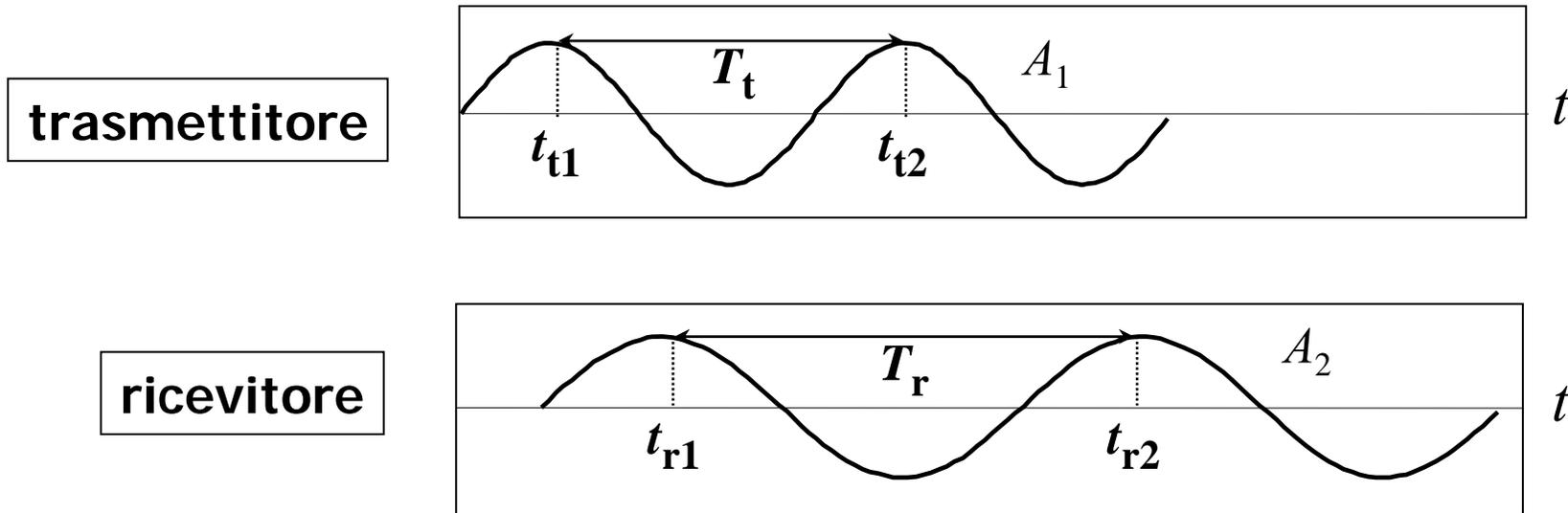
– per ogni **variazione della lunghezza** del percorso l_2 pari a una lunghezza d'onda λ si ha un **massimo e un minimo**



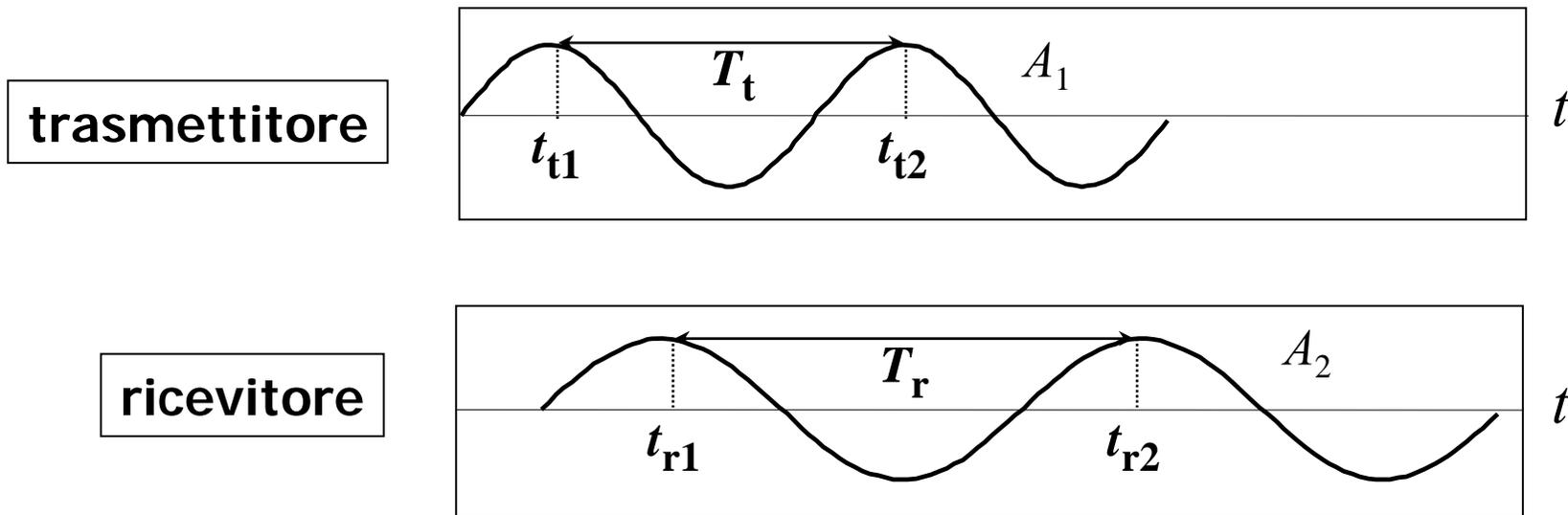
- Lo strumento è di tipo **incrementale** → può valutare le **variazioni della posizione** a partire da una posizione di riferimento
 - **contando il numero di massimi e minimi** delle variazioni di luminosità
 - **interruzioni** nel conteggio causano la perdita totale della misura
 - la misura è molto **precisa** → accuratezza dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda λ (400 ÷ 750 nm) → **calibrazione**
 - l'interferometro è uno strumento **complesso e costoso**

- La misura della **velocità** può essere fatta tramite l'**effetto Doppler**
 - si basa sull'effetto che la **frequenza** dell'onda emessa dal **trasmettitore** è **diversa** da quella che raggiunge il **ricevitore** → la **differenza** dipende dalla **velocità del corpo**





- il massimo emesso all'istante t_{t1} viene ricevuto all'istante t_{r1}
- $t_{r1} - t_{t1}$ è il tempo necessario al massimo per compiere il percorso **trasmettitore → corpo → ricevitore**
- un secondo massimo emesso all'istante t_{t2} è ricevuto all'istante t_{r2}
- $t_{r2} - t_{t2}$ è il tempo necessario al secondo massimo per compiere il percorso **trasmettitore → corpo → ricevitore** che è **variato** in conseguenza dello **spostamento del corpo**



– se il corpo si allontana dal sistema trasmettitore-ricevitore la lunghezza del percorso aumenta con il tempo e si ha

$$t_{r2} - t_{r1} > t_{t2} - t_{t1} \quad \Rightarrow \quad T_r = t_{r2} - t_{r1} > t_{t2} - t_{t1} = T_t \quad \text{essendo} \quad f = 1/T \quad \text{si ha}$$

$$\boxed{T_r > T_t \quad \Leftrightarrow \quad f_r < f_t}$$

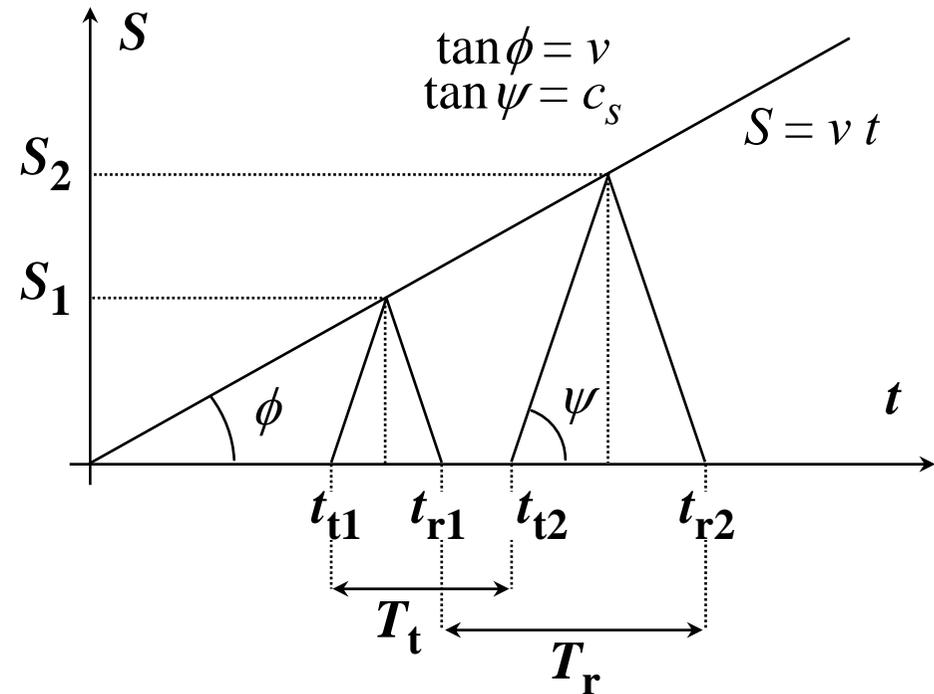
– la variazione della frequenza è

$$T_r = (t_{t2} - t_{t1}) + (t_{r2} - t_{r1}) - (t_{r1} - t_{t1}) =$$

$$= T_t + 2(S_2 - S_1) \cot \psi =$$

$$T_r = T_t + 2(S_2 - S_1)/c_s$$

$$\begin{cases} S_1 = \frac{t_{t1} + t_{r1}}{2} & \operatorname{tg} \phi = \frac{t_{t1} + t_{r1}}{2} v \\ S_2 = \frac{t_{t2} + t_{r2}}{2} & \operatorname{tg} \psi = \frac{t_{t2} + t_{r2}}{2} v \end{cases}$$



$$S_2 - S_1 = [(t_{t2} + t_{r2}) - (t_{t1} + t_{r1})] v/2 = [(t_{r2} - t_{r1}) + (t_{t2} - t_{t1})] v/2 = (T_r + T_t) v/2$$

sostituendo

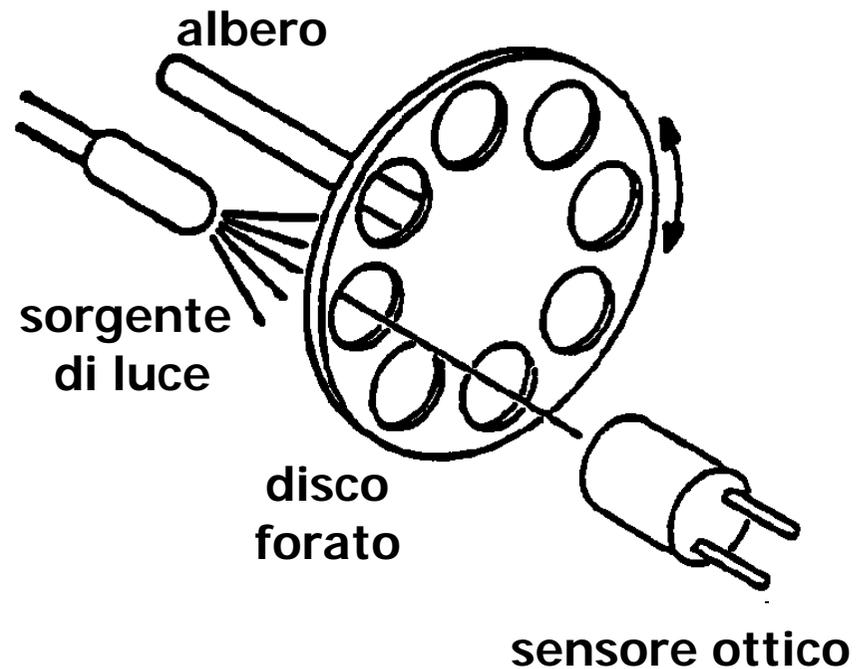
$$T_r = T_t + \frac{2}{c_s} (T_r + T_t) \frac{v}{2} \Rightarrow T_r (1 - v/c_s) = T_t (1 + v/c_s) \Leftrightarrow f_r (1 + v/c_s) = f_t (1 - v/c_s)$$

$$f_r = f_t \frac{1 - v/c_s}{1 + v/c_s} = f_t \frac{c_s - v}{c_s + v} \Rightarrow \Delta f = f_t - f_r = f_t \left(1 - \frac{c_s - v}{c_s + v} \right) = f_t \frac{2v}{c_s + v} \cong f_t \frac{2v}{c_s}$$

TRASDUTTORI DI POSIZIONE

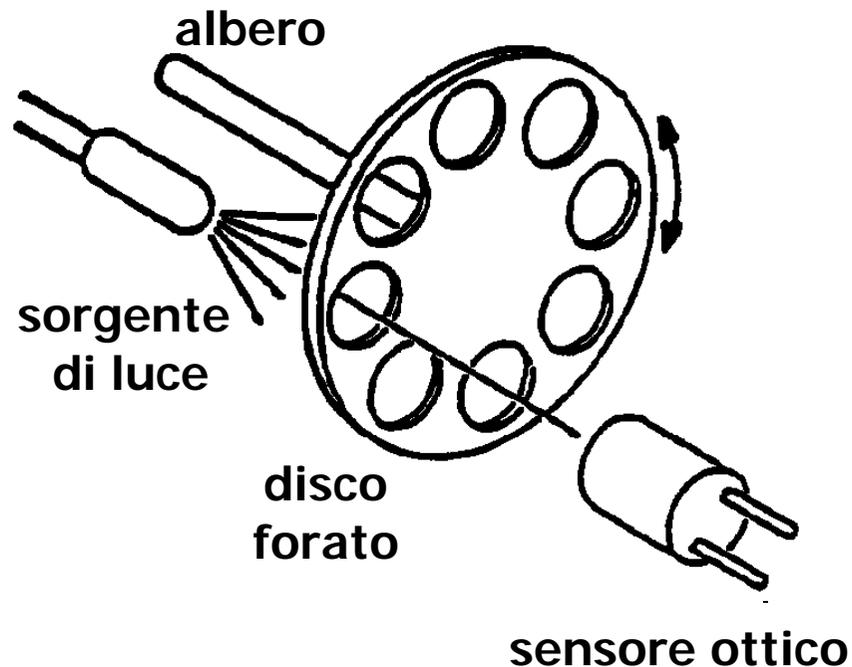
Encoder

- È un trasduttore di posizione angolare
 - di tipo **ottico**
 - **digitale**
 - molto usato nella **retroazione della posizione** → controllo digitale
- È costituito da
 - una **sorgente di luce (led)**
 - alcuni **sensori ottici (fotodiodi o fototransistor)**
 - un **disco di vetro ottico con corone circolari concentriche (tracce) avente settori alternativamente opachi (per deposizione di film metallico) e trasparenti**



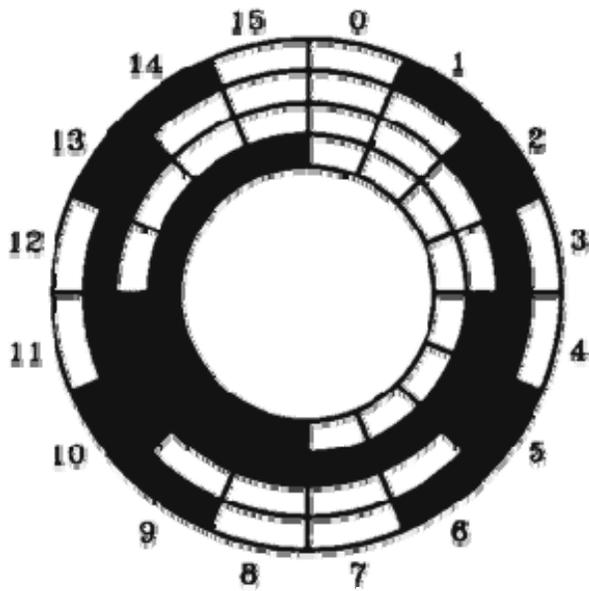
- **Principio di funzionamento**

- il **passaggio della luce** attraverso i settori trasparenti permette di caratterizzare un numero finito di posizioni angolari del disco e del corpo a esso solidale con una stringa di bit (quello mostrato è uno dei canali effettivamente presenti)
- Il **numero di tracce** e di **settori** dà la lunghezza della parola → la **risoluzione**



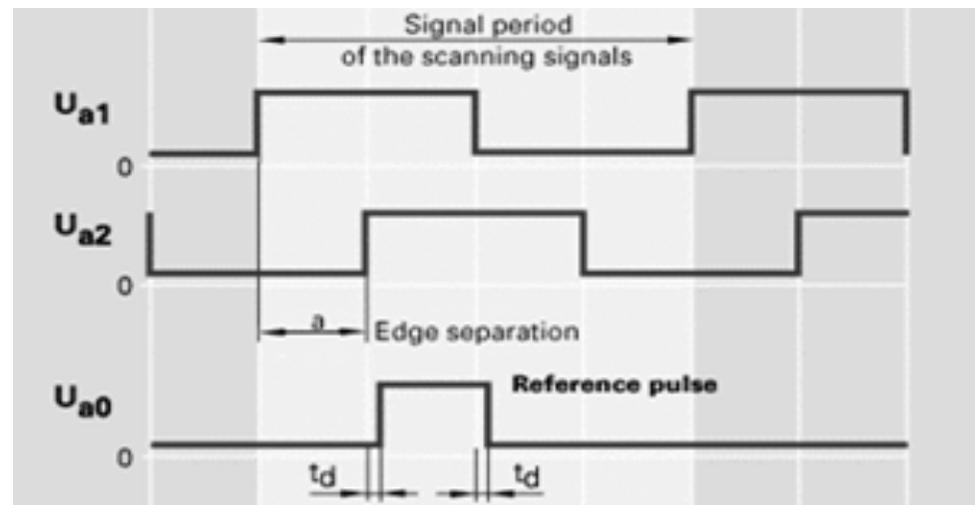
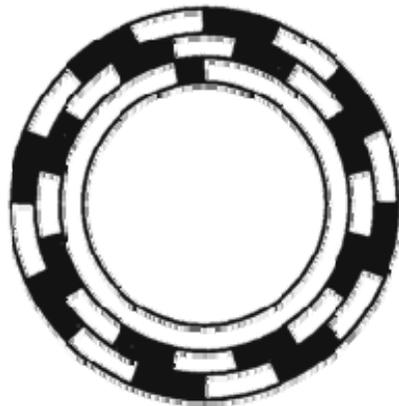
- Esistono **2 tipi** di encoder

- **encoder assoluto** → fornisce direttamente il **valore assoluto della posizione angolare** tramite una codifica binaria: in figura è rappresentato un encoder con **codifica Gray** che ha il vantaggio, rispetto a una codifica binaria tradizionale, di cambiare lo stato di un canale alla volta, facilitandone l'impiego



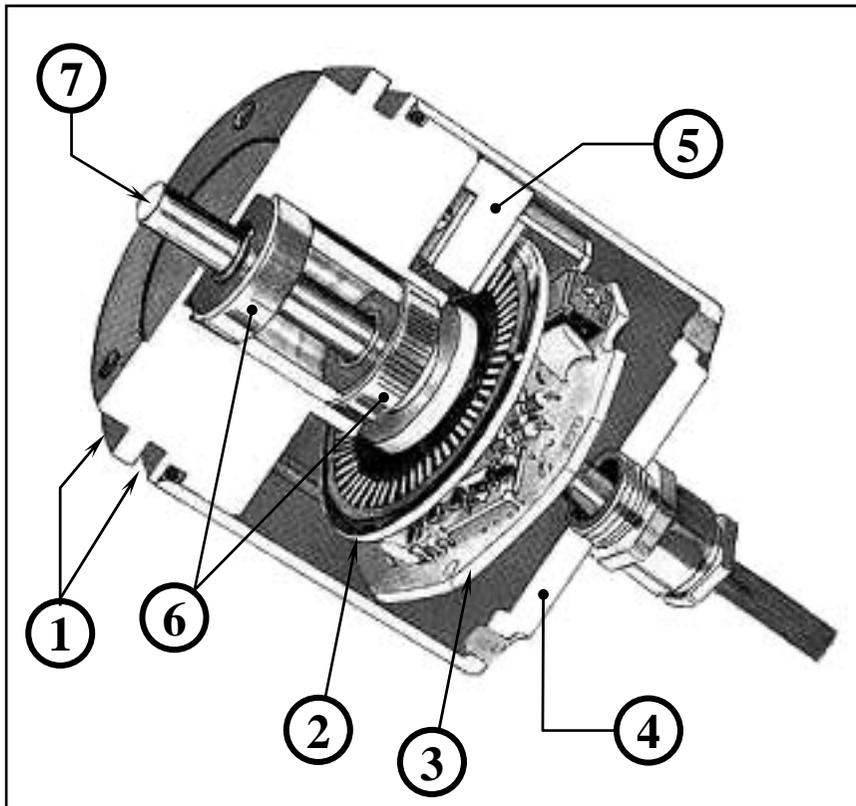
#	Codice	#	Codice
0	0000	8	1100
1	0001	9	1101
2	0011	10	1111
3	0010	11	1110
4	0110	12	1010
5	0111	13	1011
6	0101	14	1001
7	0100	15	1000

- **encoder incrementale** → segnala l'incremento della rotazione tramite il cambiamento dello stato di uno dei suoi canali
 - ♦ il numero dei **passi sul giro** può essere superiore a diecimila
 - ♦ ha risoluzione $4n$ se n è il numero di passi p di ciascun canale in quanto i canali sono sfasati di $p/4$ → tramite elettronica
 - ♦ il **senso di rotazione** si determina considerando il susseguirsi dei fronti di salita
 - ♦ esiste una **segnale di zero** come riferimento del passaggio di un determinato punto del giro
 - ♦ è più **economico** del precedente, ma richiede un maggior controllo software



– schema costruttivo

- 1) O-ring
- 2) Disco
- 3) Elettronica
- 4) Custodia
- 5) Testina di lettura
- 6) Cuscinetti
- 7) Albero



- È un **trasduttore di posizione lineare** → è lo strumento analogo all'encoder angolare incrementale per le misure lineari
- Funziona con lo stesso principio
 - ha **risoluzioni** sino a **20 μm**
 - la **lunghezza** può raggiungere **1 m**

