



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

tesi di laurea

Dal resolver all'encoder: analisi tra i moderni sensori angolari della meccatronica

Relatore: Prof. Alessandro Sona

Laureando: Marco Corbetti

A.A 2021/2022

Indice

Introduzione	1
1 La moderna industria	3
Capitolo 1	3
1.1 Robot industriali	4
1.1.1 Storia	4
1.2 Robot manipolatori	5
1.2.1 Catena cinematica	5
1.2.2 Gradi di mobilità	6
1.2.3 Gradi di libertà	6
1.2.4 Spazio di lavoro	6
1.3 Manipolatore cartesiano	7
1.4 Manipolatore cilindrico	8
1.5 Manipolatore sferico	8
1.6 Manipolatore scara	9
1.7 Manipolatore antropomorfo	10
1.8 Sensori angolari nei robot industriali	11
1.9 Trend	11
1.9.1 Cobot	11
1.9.2 Intelligenza artificiale	12
2 Tecnologie di sensori angolari	13
Capitolo 2	13
2.1 Resolver	15
2.1.1 Tecnologia	15
2.2 Potenzimetro	17
2.2.1 Tecnologia	17
2.3 Encoder ottico incrementale	20
2.3.1 Tecnologia	20
2.4 Encoder ottico assoluto	22
2.4.1 Tecnologia	22

2.5	Encoder magnetico	23
2.5.1	Tecnologia	23
2.6	Encoder capacitivo	24
2.6.1	Tecnologia	24
2.7	Encoder sin/cos	26
2.7.1	Tecnologia	26
3	Applicazioni pratiche di encoder	27
Capitolo 3		27
3.1	Motori sincroni a magneti permanenti	27
3.1.1	Tecnologia	27
3.2	Orientamento di campo (FOC)	27
3.3	Motori brushless CC serie BL INTECNO	29
3.3.1	Caratteristiche tecniche	29
3.4	Encoder consigliati	30
3.4.1	Encoder ottico ME22	30
3.4.2	Encoder ottico MEC22	31
3.4.3	Encoder magnetico MEM22	33
3.5	Encoder secondario nei robot Fanuc	35
3.5.1	Compensazione della deviazione	35
3.5.2	Miglioramento dell'accuratezza	35
4	Particolari sensori angolari sul mercato	37
Capitolo 4		37
4.1	Encoder a filo lika	37
4.1.1	Tecnologia	37
4.1.2	Vantaggi	37
4.1.3	Encoder a filo SFE lika	38
4.2	Encoder incrementale programmabile ITALSENSOR	39
4.3	Encoder con tachogenerator ITALSENSOR	41
4.3.1	Tachogenerator	41
Conclusioni		43
Bibliografia		44

Introduzione

Il settore industriale è sempre più in espansione e costante evoluzione. Velocità ed efficienza in termini realizzativi sono le principali richieste da parte del mercato. Questo spinge le aziende a scegliere le migliori strategie, macchinari, tecnologie e componentistiche per sviluppare le proprie idee e prodotti.

La seguente tesi si propone di offrire una panoramica di sviluppo, implementazione e trend di una di queste tecnologie, ovvero i sensori angolari. Prima dell'avvento del digitale, il resolver e il potenziometro erano i sensori di posizione angolare analogici di riferimento. L'analogo digitale prende invece il nome di encoder. Esistono diverse tipologie di encoder. Esse si differenziano in base alla tecnologia e al principio fisico mediante il quale la posizione angolare viene convertita in un segnale elettrico. Di seguito le principali:

- Capacitivi/induttivi
- Magnetici
- Ottici

Gli encoder, oltre che a misurare gli spostamenti o la posizione angolare quando il rotore è collegato ad un asse, possono rilevare anche velocità e accelerazioni di rotazione. Questi sensori, per la vasta gamma di modelli, trovano largo impiego nei moderni processi industriali sempre più robotizzati e automatizzati; robot industriali, mondo automotive, motori elettrici, gru, carri ponte, macchine da stampa ne sono esempio di applicazione.

L'obiettivo che il presente lavoro si pone è di illustrare l'evoluzione tecnologica nel campo dei sensori angolari definendone il contesto di applicazione, analizzandone le principali caratteristiche tra cui pregi e difetti e fornendo alcuni esempi particolarmente rilevanti all'interno dell'offerta di mercato. Attraverso questa ricerca si vuole offrire al lettore uno strumento utile al confronto e alla successiva scelta del migliore trasduttore angolare in base a esigenze, budget e tipo di applicazione.

Capitolo 1

La moderna industria

Un sistema meccatronico può essere rappresentato con lo schema a blocchi in figura 1.1. X_R è il setpoint, ovvero la grandezza da settare, imprimere al sistema. Il blocco di controllo prepara invece l'input in modo ottimale per l'attuatore mentre quest'ultimo va ad agire direttamente sul mondo fisico. I sensori o i sistemi di sensing, in tutto ciò, hanno il ruolo di leggere le informazioni dal mondo fisico e generare un segnale di feedback in modo tale da ridurre sempre più l'errore (e). L'avvento e l'uso di queste tecnologie ha dato il via ad un processo ancora in

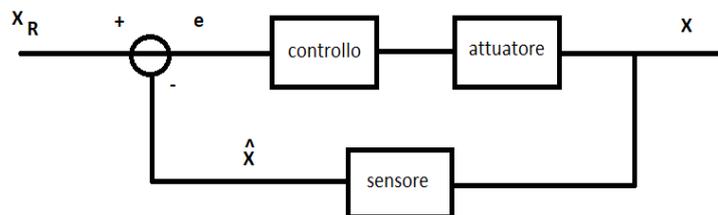


Figura 1.1: Schema a blocchi di un sistema meccatronico

essere. Il mondo industriale è stato stravolto e rivoluzionato. Come accaduto con la scoperta della macchina a vapore prima e dell'elettricità e del petrolio poi, la combinazione tra elettronica, meccanica e informazione ha segnato l'epoca dell'industria 4.0. I sensori angolari trovano un impiego massiccio proprio nei moderni sistemi di automazione robotica industriale. L'esigenza di una produt-

tività ed una efficienza sempre maggiore porta i robot meccanici ad occupare un ruolo essenziale ed indispensabile nella moderna industria. L'automazione industriale riguarda il controllo dei processi fisici ed implica quindi l'utilizzo di macchine fisiche per automatizzare un processo industriale. La robotica industriale riguarda invece tutto ciò che aiuta la produzione nei processi di lavorazione dei prodotti. Il robot infine è una macchina multifunzione riprogrammabile in grado di sostituire l'uomo all'interno della linea di produzione. E' capace di eseguire sia mansioni esclusivamente meccaniche e ripetitive, sia gestire oggetti se adeguatamente programmato a farlo. L'uso e la diffusione di questa nuova strategia, concentrata sulla gestione e controllo del processo, ha portato in dote la standardizzazione delle lavorazioni ottenendo incrementi di produzione, costi inferiori, maggiore precisione ed affidabilità comportando enormi vantaggi alle aziende ed a chi fa impresa. Di seguiti alcuni di essi:

- Il personale può compiere mansioni meno alienanti, con un impatto maggiore sull'azienda.
- I robot possono essere usati per lo spostamento di materiale tossico o particolarmente pesante.
- I robot possono sostituire l'uomo in lavori/ambienti pericolosi e nocivi.
- Si riduce il rischio di errori e il processo produttivo viene standardizzato.
- Aumento della produttività aziendale grazie all'utilizzo costante e instancabile della robotizzazione.

1.1 Robot industriali

La norma ISO TR/8373-2.3 definisce il robot industriale come: *Un manipolatore con più gradi di libertà, governato automaticamente, riprogrammabile, multiscopo, che può essere fisso sul posto o mobile per utilizzo in applicazioni di automazioni industriali*¹

1.1.1 Storia

Il primo esempio di robot industriale fu progettato da Griffith P. Taylor nel 1937. Esso fu realizzato con il sistema meccanico, azionato da un motore elettrico e possedeva cinque gradi di libertà. Solo nel 1954, grazie a George Devol, viene brevettato il primo esemplare di robot industriale moderno costruito poi dalla Unimation, azienda creata dallo stesso Devol. Il robot Unimate, anche chiamato *programmable transfer machine*, aveva come scopo principale il trasferimento di un oggetto da un punto ad un altro. Per costruirlo vennero utilizzati attuatori

¹ISO (International organization for standardization) è la più importante organizzazione a livello mondiale per la definizione di norme tecniche

idraulici e programmati in *joint coordinates*, ovvero venivano registrate le posizioni dei giunti nelle varie fasi e poi replicate in serie. Fu Victor Scheinman della Stanford University, invece, che nel 1969 ideò proprio il *Braccio Stanford* e rivoluzionò il concetto di robot; infatti grazie ai motori elettrici e soprattutto ai sei gradi di libertà, esso fu il primo braccio mecatronico in grado di compiere azioni complesse come assemblare e saldare. In seguito, Scheinman, vendette il brevetto alla Unimation che, con il supporto della General Motors, lo trasformò nel *Programmable Universal Machine for Assembly*, anche detto robot Puma. In Europa i robot industriali vennero immessi sul mercato nel 1973 grazie alle aziende ABB Robotics e KUKA Robotics. In Italia, il primo impiego massiccio dei robot venne registrato in Fiat, dove vennero utilizzati per la saldatura sulle vetture. In genere i robot eseguono il lavoro di imbastitura della scocca per poi essere saldata da altri robot.

1.2 Robot manipolatori

Il robot manipolatore è un insieme di corpi rigidi (bracci) interconnessi tra loro per mezzo di articolazioni (giunti). La sua struttura è così formata:

- **Struttura portante** che assicura la mobilità e regola la posizione dell'organo terminale al livello del pezzo.
- **Polso** che conferisce destrezza e regola l'orientamento dell'utensile per consentire la presa del pezzo.
- **Organo terminale** che esegue il compito per cui il robot è utilizzato.

Esistono poi altri parametri che aiutano a classificare e a scegliere i diversi tipi di manipolatori:

1. Struttura meccanica a catena cinematica aperta o chiusa
2. Gradi di mobilità
3. Gradi di libertà
4. Spazio di lavoro

1.2.1 Catena cinematica

La catena cinematica è l'unione di più membri ottenuta con coppie cinematiche, in modo che, fissata la velocità relativa di un membro ad un altro qualsiasi, risultino univocamente determinate le velocità relative di tutti gli altri membri. Una catena cinematica si definisce aperta se una sola sequenza di bracci connette i due estremi della catena; mentre si definisce chiusa se una sequenza di bracci forma un anello.

1.2.2 Gradi di mobilità

Il numero di gradi di libertà di un manipolatore è definito dal numero di giunti presenti lungo tutta la catena cinematica. In figura 1.2 si possono osservare i due tipi di giunti utilizzati nei manipolatori:

- **Giunto prismatico:** moto relativo di traslazione tra due bracci.
- **Giunto rotoidale:** moto relativo di rotazione tra due bracci.

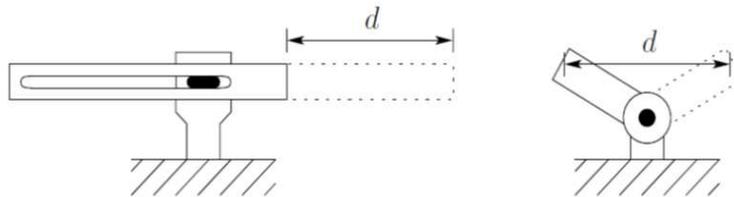


Figura 1.2: Giunto prismatico e giunto rotoidale [1]

1.2.3 Gradi di libertà

In fisica, il numero di gradi di libertà di un punto materiale corrisponde al numero di variabili indipendenti necessarie per determinare univocamente la sua posizione nello spazio. In meccanica, inoltre, il grado di libertà definisce univocamente la configurazione del meccanismo.

1.2.4 Spazio di lavoro

Lo spazio di lavoro corrisponde alla porzione dell'ambiente circostante a cui può accedere l'organo terminale di un manipolatore. In base alla struttura del manipolatore, lo spazio di lavoro può assumere diversa forma e volume. Si possono infine distinguere due tipi di spazio di lavoro:

- **Spazio di lavoro raggiungibile:** regione dello spazio che l'origine della terna utensile può raggiungere con almeno un orientamento.

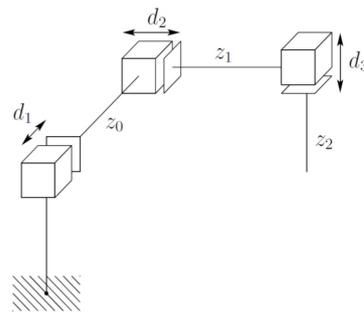
- **Spazio di lavoro destro:** regione dello spazio che l'origine della terna utensile può raggiungere con più di un orientamento.

1.3 Manipolatore cartesiano

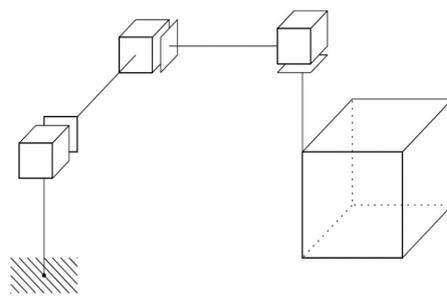
In riferimento alla figura 1.3 e ricordando i quattro parametri precedentemente elencati, si può descrivere il manipolatore cartesiano nel seguente modo:

1. Catena cinetica aperta
2. 3 giunti prismatici (usualmente ortogonali)
3. Corrispondenza tra gradi di libertà e variabili dello spazio cartesiano
4. Spazio di lavoro racchiuso da un parallelepipedo

Questo tipo di manipolatore ha un'ottima rigidezza, buona precisione ma scarsa destrezza e risulta ottimale per operazioni di trasporto ed assemblaggio.



(a) Schema cinematico



(b) Spazio di lavoro

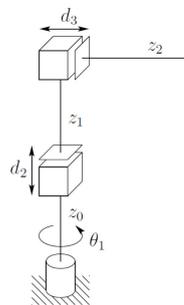
Figura 1.3: Manipolatore cartesiano [1]

1.4 Manipolatore cilindrico

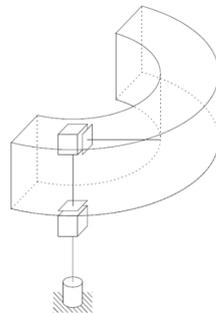
Considerando la figura 1.4 possiamo descrivere così un manipolatore cilindrico:

1. catena cinetica aperta
2. 2 giunti prismatici e 1 giunto rotoidale di base
3. Corrispondenza tra gradi di libertà e variabili dello spazio cartesiano se il compito è descritto in coordinate cilindriche
4. Spazio di lavoro racchiuso da un cilindro cavo

Questo tipo di manipolatore risulta adatto ad accedere col polso in cavità orizzontali e viene impiegato spesso in operazioni di trasporto.



(a) Schema cinematico



(b) Spazio di lavoro

Figura 1.4: Manipolatore cilindrico [1]

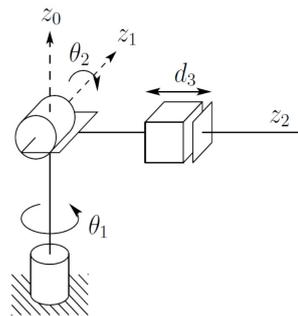
1.5 Manipolatore sferico

Da figura 1.5 si può caratterizzare un manipolatore sferico nel seguente modo:

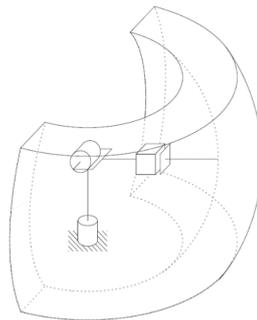
1. catena cinetica aperta

2. 1 giunto prismatico e 2 giunti rotoidali
3. Corrispondenza tra gradi di libertà e variabili dello spazio cartesiano se il compito è descritto in coordinate sferiche
4. Spazio di lavoro racchiuso da una sfera cava; può includere al suo interno il piano di supporto della base del manipolatore

Questo tipo di manipolatore presenta una rigidezza molto ridotta, di fatto viene impiegato per operazioni di lavorazione.



(a) Schema cinematico



(b) Spazio di lavoro

Figura 1.5: Manipolatore sferico [1]

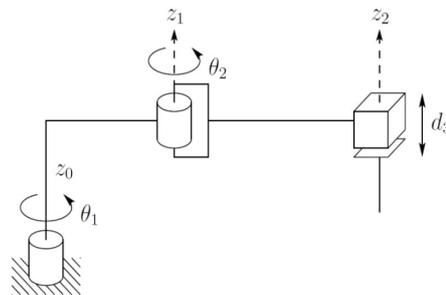
1.6 Manipolatore scara

Con l'ausilio della figura 1.6 si può affermare a riguardo di un manipolatore scara che:

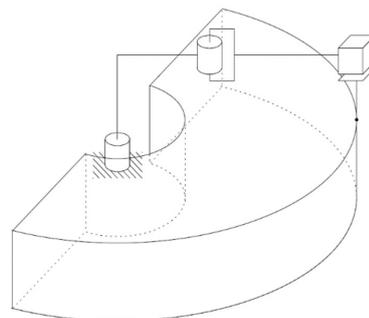
1. Catena cinetica aperta
2. 1 giunto prismatico e 2 giunti rotoidali
3. 4 gradi di libertà

4. Spazio di lavoro racchiuso in un mezza luna

Questo tipo di manipolatore presenta gli assi di moto paralleli fra loro e coincidenti con i due giunti rotoidali. A causa dell'elevata rigidità a carichi verticali e cedevolezza a carichi orizzontali è ideale per la manipolazione di piccoli oggetti e l'assemblaggio per inserimenti verticali.



(a) Schema cinematico



(b) Spazio di lavoro

Figura 1.6: Manipolatore scara [1]

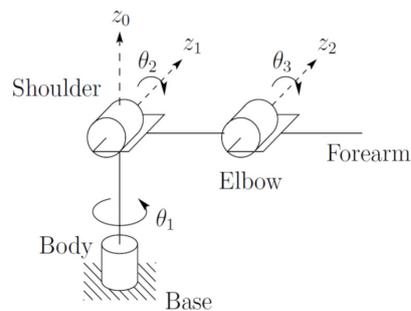
1.7 Manipolatore antropomorfo

In riferimento alla figura 1.7 un manipolatore antropomorfo è così descritto:

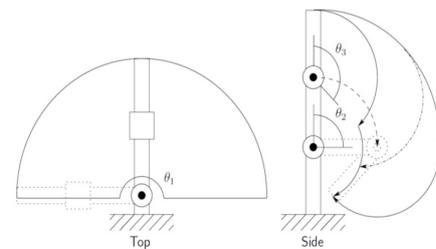
1. Catena cinematica aperta
2. 3 giunti rotoidali
3. Non vi è corrispondenza tra gradi di libertà e variabili dello spazio cartesiano
4. Spazio di lavoro racchiuso approssimativamente da una porzione di sfera

1.8 Sensori angolari nei robot industriali

Per azionare un robot industriale si installano dei servomotori su ciascun giunto presente lungo la catena cinematica. I sensori angolari, calettati sul retro dei servomotori, ricoprono un ruolo fondamentale per controllare e mantenere la posizione dei vari bracci.



(a) Schema cinematico



(b) Spazio di lavoro

Figura 1.7: Manipolatore antropomorfo [1]

1.9 Trend

1.9.1 Cobot

Il cobot (collaborative robot) è un robot ideato e concepito per lavorare ed interagire con l'uomo. Questo crea sicuramente un contrasto con l'idea di robot industriali, costruiti per lavorare in maniera autonoma e in sostituzione dell'uomo. Pare invece essere proprio questo il trend dal 2008, quando i cobot iniziarono a diffondersi nelle aziende. Una differenza sostanziale tra i cobot ed i robot industriali è data dal fatto che i robot vengono impiegati in maniera massiccia e collocati solitamente in una posizione fissa; i cobot invece sono progettati per essere compatti e spostati dove necessario. Infatti, non avendo una programmazione

fissa, data dai propri produttori come nel caso dei robot, i cobot possono essere impiegati e programmati in base all'esigenza dell'operatore in quel momento. Il loro compito infatti è di ripetere azioni più e più volte con la massima precisione ed eseguire azioni non ergonomiche liberando così gli operatori dai rischi per la salute associati a posture forzate, movimenti ripetitivi, movimentazione manuale dei carichi e applicazione di forze ad un determinato compito. In conclusione, il cobot esegue il lavoro più scomodo e difficile, lasciando le funzioni più specifiche ai lavoratori.

1.9.2 Intelligenza artificiale

L'intelligenza artificiale è una disciplina appartenente all'informatica che studia i fondamenti teorici, le metodologie e le tecniche che consentono la progettazione di sistemi hardware e sistemi di programmi software capaci di fornire all'elaboratore elettronico prestazioni che, a un osservatore comune, sembrerebbero essere di pertinenza esclusiva dell'intelligenza umana.² In campo industriale, l'uso di questa nuova tecnologia sta prendendo sempre più piede, andando a sostituire robot e macchine programmabili con quelli di nuova generazione che sfruttano appunto l'IA. Con l'IA è riduttivo parlare di robot o macchinario in senso lato ma bisogna iniziare anche a considerare altri due elementi fondamentali: il software e la connettività. Infatti, per far compiere ai robot ragionamenti complessi sempre più simili a quelli dell'uomo c'è bisogno di una grande capacità di calcolo e analisi dei dati. La finalità è che con l'uso dell'IA le macchine acquisiscano una conoscenza non sterile, una coscienza che permetta di prendere decisioni non solo secondo la logica e l'abilità di risolvere problemi in maniera differente a seconda dei contesti nei quali ci si trova. La vera innovazione introdotta dall'IA ed il suo punto di forza è l'utilizzo del machine learning. Il machine learning, ovvero apprendimento automatico, è una particolare branca dell'informatica che indica tutti quei meccanismi che permettono a una macchina intelligente di migliorare le proprie capacità e prestazioni nel tempo.³ Con l'acquisizione ed elaborazione di grandissime quantità di dati, rende la macchina una volta avviata autonoma nella gestione dei compiti e soprattutto dinamica rispetto all'ambiente ed all'evoluzione degli eventi. All'interno di un'azienda, questo permette un notevole risparmio di tempo, costi e risorse. Un aspetto molto sviluppato dall'AI e che prenderà largo impiego nel settore industriale, è il riconoscimento delle immagini. Software e algoritmi, grazie anche ai metodi machine learning, riescono ad estrarre colori, forme e informazioni spaziali da un'immagine e di darne una classificazione. L'industria 4.0 trarrà beneficio da questo tipo di tecnologie, non solo per quanto riguarda il processo produttivo ma anche per l'ottimizzazione del processo di manutenzione preventiva, grazie al controllo e monitoraggio continuo di tutti i parametri delle macchine.

²Marco Somalvico, ingegnere e accademico italiano, specialista nel campo dell'intelligenza artificiale

³Focus Industria 4.0 | Mar 27,2020 | Tecnologie, Italia |

Capitolo 2

Tecnologie di sensori angolari

I trasduttori sono dispositivi che effettuano una trasformazione da una forma di energia ad un'altra. Particolari tipi di trasduttori sono i sensori, che forniscono in uscita un segnale elettrico legato alla grandezza in ingresso ma non necessariamente alla sua energia. Un qualsiasi sensore, indipendentemente dalle sue caratteristiche e funzionalità, può essere rappresentato come in figura 2.1, vale a dire come una scatola nera, o black box, della quale non si conosce nulla fuorché il legame tra l'ingresso x e l'uscita y . I parametri di un sensore sono

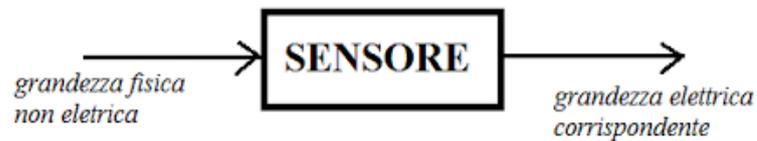


Figura 2.1: schema a blocchi di un sensore [2]

fondamentali per conoscerne le caratteristiche e per sceglierne il migliore in base al tipo di applicazione. I principali sono:

- **Input range**

Intervallo di valori della grandezza d'ingresso x .

- **Output range**

Intervallo di valori della grandezza d'uscita y .

- **accuratezza**

Misura dell'esattezza dell'output e strettamente legato alla sua transcaratteristica.

- **Risoluzione**

Misura del più piccolo incremento dello stimolo di ingresso rilevabile dal sensore mediante variazione apprezzabile della grandezza di uscita.

- **Linearità**

Esprime lo scostamento tra la transcaratteristica reale del sensore e quella lineare attesa.

- **Offset**

Valore non nullo di y che si ottiene all'uscita del sensore in presenza di misurando nullo ($x = 0$).

- **Livelli di soglia**

Valori del segnale d'ingresso al di fuori dei quali il comportamento del sensore non è conosciuto.

- **Isteresi**

Fenomeno legato alla presenza di due diverse transcaratteristiche, una per valori crescenti del misurando e una per valori decrescenti.

- **Precisione**

Capacità del sensore di fornire indicazioni ripetibili del misurando.

- **Sensibilità**

Rapporto tra la variazione della risposta Δy del sensore e la corrispondente variazione Δx del segnale d'ingresso.

- **Selettività**

Capacità del sensore di fornire un'uscita sensibile al solo misurando di interesse e non ad altre grandezze di influenza.

- **Stabilità**

Indice di comportamento a lungo termine del sensore.

- **Tempo di risposta**

Tempo che l'uscita del sensore y impiega per passare da uno stato ad un altro.

Un sensore o un sistema di sensing può essere ben rappresentato come in figura 2.2. La grandezza fisica x viene captata dal sensore S e trasformata in

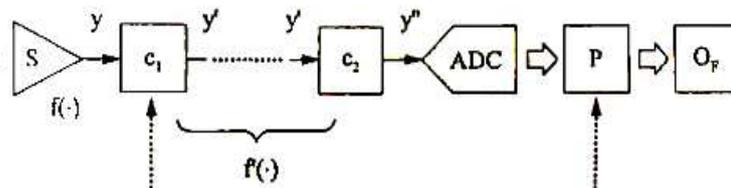


Figura 2.2: Schema a blocchi di un sistema di sensing [3]

grandezza elettrica. I blocchi C_1 e C_2 condizionano il segnale in uscita al sensore: il primo lo inrobustisce per affrontare il tratto di conduttore mentre il secondo lo adatta al range d'ingresso dell'ADC. Quest'ultimo quindi lo converte da analogico a digitale, il blocco P lo processa ed infine il blocco O_p lo formatta a seconda dell'output (display, led, ecc..)

2.1 Resolver

2.1.1 Tecnologia

I resolver sono sensori analogici di tipo induttivo. Essi assomigliano ad un motore elettrico, e come si nota in figura 2.3, sono composti da un avvolgimento elettrico primario sul rotore e due avvolgimenti elettrici secondari sullo statore. Il principio di funzionamento si basa sulla variazione dell'accoppiamento induttivo tra i due sistemi di avvolgimenti, rotanti l'uno rispetto all'altro e quindi in funzione dell'angolo.

Sul sistema generatore (primario) viene impressa una tensione sinusoidale alternata che genera un flusso magnetico che si accoppia con il circuito del

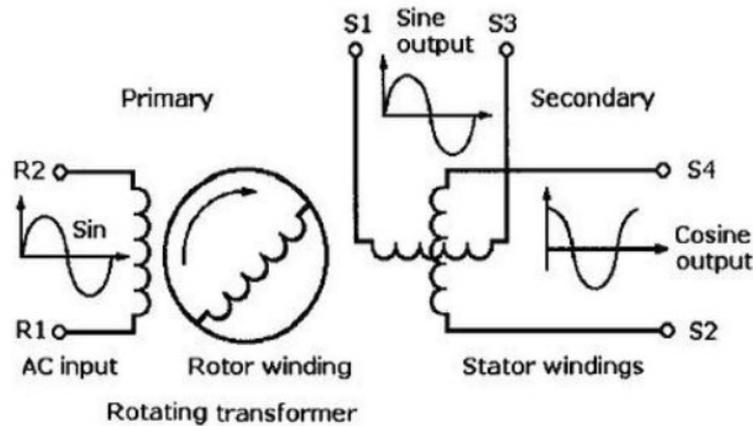


Figura 2.3: Schema di un resolver [4]

sistema rilevatore (secondario). Al secondario quindi si misura una differenza di potenziale dipendente dalla tensione impressa sul primario e dalla posizione relativa θ dovuta al differente allineamento dei due sistemi. Il sistema rilevatore presenta due avvolgimenti. Le tensioni di uscita indotte nei circuiti rilevatori risultano modulate sinusoidalmente con la posizione ed in quadratura tra loro. Quindi in formule:

$$V_r = V_M \sin(\omega t)$$

$$V_{s1} = KV_r \cos \theta = KV_M \sin(\omega t) \cos \theta$$

$$V_{s2} = KV_r \sin \theta = KV_M \sin(\omega t) \sin \theta$$

con K costante di proporzionalità che dipende dai parametri costruttivi. Dalle equazioni sopra si evince che l'ampiezza delle due sinusoidi modulate dipende dalla posizione del rotore e sono in quadratura reciproca mentre la frequenza è pari a quella del segnale applicato al primario. Grazie alla presenza dei due circuiti di statore sfasati di 90° , il resolver fornisce la posizione assoluta dell'asse rotante all'interno di un giro. Il resolver da solo non basta, infatti esso necessita di un circuito di demodulazione per l'acquisizione del segnale. Il circuito estrae l'ampiezza delle tensioni sinusoidali del circuito rilevatore e da queste ricava l'angolo relativo tra i due circuiti.

Vantaggi

1. Sensore assoluto nel giro (risoluzione: $0.1^\circ \div 0.5^\circ$).
2. Costo contenuto.

3. Idoneo al funzionamento in ambienti ostili.

Svantaggi

1. Richiede una tensione di riferimento sinusoidale (frequenza $1 \div 20\text{kHz}$).
2. Uscita è una funzione non lineare della posizione.
3. Necessita di un circuito di demodulazione e conversione digitale abbastanza complesso e costoso.
4. Errori dinamici (la rotazione genera tensioni di uscita spurie che possono degradare la qualità della misura).

2.2 Potenziometro

Questi tipi di sensori analogici sono tra i più semplici sensori di posizione.

2.2.1 Tecnologia

Il potenziometro è costituito da un cilindro isolante su cui è avvolto un filo metallico con resistività opportuna, mentre le due estremità sono connesse a due morsetti. Come mostrato in figura 2.4, longitudinalmente al cilindro e da un'estremità all'altra, scorre un cursore recante un contatto strisciante sul filo, a sua volta collegato ad un morsetto. Questo fa sì che la resistenza totale sia variabile in base alla posizione del cursore. Nel caso del potenziometro lineare, la tensione di uscita è legata linearmente a quella d'ingresso attraverso un rapporto. Si considera allora la resistenza totale un resistore rettilineo di sezione S , lunghezza totale L_t e resistività ρ del tipo:

$$R_t = \rho \cdot \frac{L_t}{S}$$

In riferimento alla figura 2.5, il dispositivo risulta quindi essere equivalente ad una coppia di resistenze in serie il cui valore totale è costante, ma singolarmente variabili in base allo spostamento del cursore.

Le singole sezioni sono esprimibili in funzione della resistenza totale nel modo che segue:

$$\begin{aligned} R_t &= R_1 + R_2 \\ L_t &= L_1 + L_2 \\ R_1 &= R_t \frac{L_1}{L_t} = R_t \frac{(L_t - L_2)}{L_t} \\ R_2 &= R_t \frac{L_2}{L_t} \end{aligned}$$

dove:

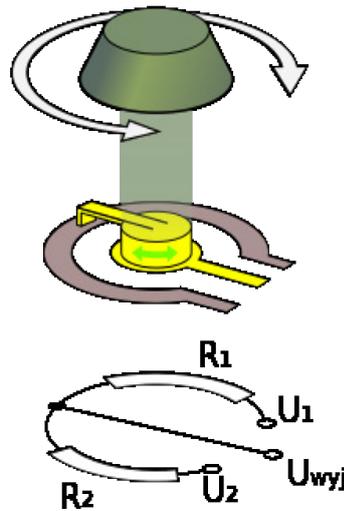


Figura 2.4: struttura di un potenziometro lineare [5]

- R_1 è la resistenza del tratto in alto
- R_2 è la resistenza del tratto in basso
- R_t è la resistenza totale
- L_1 è la lunghezza del tratto in alto
- L_2 è la lunghezza del tratto in basso

Applicando una differenza di potenziale alle estremità del potenziometro, per la legge di Ohm, si ottiene una corrente pari a:

$$I = \frac{V}{R_t}$$

dove V è la tensione applicata. Rimane verificata la condizione:

$$V = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

La tensione ai capi di R_L risulta essere, in prima approssimazione (considerando R_L un aperto), pari a:

$$V_2 = R_2 \cdot I = \rho \cdot \frac{L_2}{S} \cdot I \text{ ovvero } V_2 = \rho \cdot \frac{L_2}{S} \cdot \frac{V}{\rho \cdot \frac{L_1}{S} + \rho \cdot \frac{L_2}{S}}$$

Effettuando le semplificazioni si nota che tutto è esprimibile in funzione delle lunghezze dei tratti di resistori:

$$V_2 = V \cdot \frac{L_2}{L_t}$$

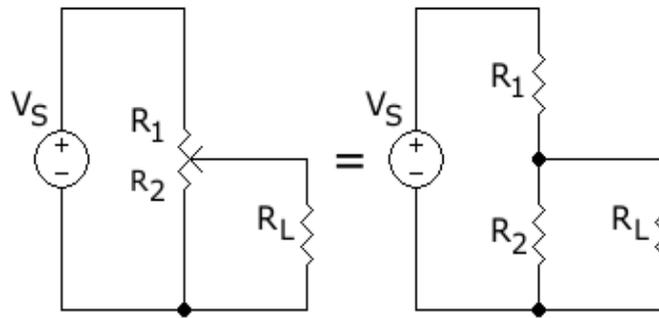


Figura 2.5: circuito equivalente di un potenziometro [5]

Parametri

- Linearità: $\pm 1\%$
- Resistenza: $10 \div 200k\Omega$
- Risoluzione: dipende dal numero di avvolgimenti
- Sensibilità alla temperatura

Vantaggi

1. Costo. Semplicità realizzativa: a filo più volte avvolto fino a formare un avvolgimento di spire.
2. Possibili realizzazioni lineari ed angolari, anche multigiro.
3. Misura assoluta della posizione.
4. Linearità per tutta la corsa del potenziometro.

Svantaggi

1. Risoluzione limitata se realizzati con tecnologia a filo.
2. Uscita analogica (possibile limite in controllori digitali e per rumore).
3. Polvere (interrompe la continuità del contatto, scintillio, difetti meccanici).
4. Sensibilità alla temperatura (la resistenza del potenziometro può variare al variare di essa).

5. Vita breve a causa dell'usura dei contatti striscianti.
6. Bassa frequenza di lavoro a causa dei contatti striscianti, rischio di bruciare i sensori ad alta frequenza.

2.3 Encoder ottico incrementale

Si definisce così in quanto questi tipi di sensori forniscono un segnale d'uscita proporzionale in modo incrementale allo spostamento effettuato. Inoltre ricade nella categoria dei sensori ottici.

2.3.1 Tecnologia

Gli encoder incrementali sono così composti (figura 2.6):

- disco opaco calettato sull'albero dell'organo da controllare. Esso presenta una certo numero di tacche o fori equidistanti tra loro.
- fotoemittitore (diodoled) che genera un segnale di input luminoso che può passare attraverso le tacche.
- fotorilevatore (fotodiode) che riceve il segnale luminoso e sua volta genera un segnale di output (alto se passa la luce, basso se non passa).

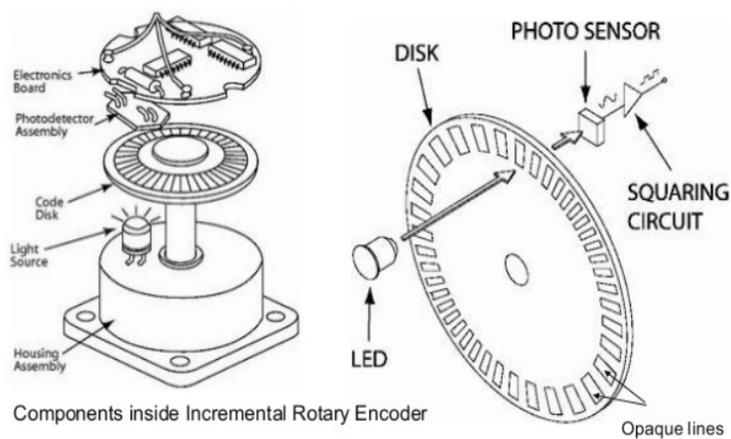


Figura 2.6: struttura di un encoder incrementale [4]

Come già anticipato il disco viene calettato sull'albero dell'apparecchiatura di cui si vuole rilevare lo spostamento angolare. E' logico pensare che ad ogni

spostamento dell'albero coincida uno spostamento uguale dell'encoder. In corrispondenza dei fori, a cavallo del disco, su una superficie viene applicato il fotomettitore mentre sull'altra il fotorilevatore in modo tale che l'attraversamento o meno del fascio luminoso possa generare l'attivazione dell'uscita. La rilevazione dello spostamento angolare avviene mediante il conteggio degli impulsi generati dal fotorilevatore alla propria uscita. Per descrivere la rilevazione dello spostamento angolare, supponiamo che l'encoder si trovi in una posizione di riferimento e che il fascio luminoso stia attraversando il foro 0. In questo momento il fotorilevatore è eccitato e porta a livello alto l'uscita. Quest'ultima rimane così finché il fascio luminoso non viene interrotto. Quando l'encoder inizia a ruotare, il fascio luminoso incontra la parte opaca del disco e l'uscita diventa bassa. Questa rimane bassa fino a quando il foro 1 non prende la posizione del foro 0. A questo punto il fascio luminoso attraversa il foro ed il fotorilevatore tornerà ad eccitarsi alzando di nuovo l'uscita. Il processo appena descritto si ripete in modo analogo durante tutta la rotazione dell'albero, consentendo la rilevazione degli spostamenti angolari. Per rilevare il numero di impulsi e quindi quantificare lo spostamento è necessario un dispositivo digitale come il contatore il cui ingresso di conteggio risulta attivo sul fronte di salita. È facile concludere che il numero di impulsi contanti è direttamente proporzionale allo spostamento angolare dell'encoder e quindi dell'albero a cui è calettato. Per poter rilevare il verso di rotazione, l'encoder presenta una seconda identica pista, ma sfasata di metà passo oppure due gruppi di elementi fotosensibili ma sfasati di un quarto di passo. A seconda di quale dei due raggi di luce paralleli si rileva per primo, ovvero quale delle onde quadre è in anticipo, un sistema logico riesce a stabilire il verso di rotazione del disco. L'encoder incrementale misura spostamenti relativi, senza avere un riferimento assoluto nel giro ed è quindi necessario definirne uno per ottenere misure assolute. La tacca di index è la soluzione, ovvero, viene aggiunta una terza traccia concentrica sul disco con una sola tacca. Essa risulta molto utile nella procedura di azzeramento da eseguire ad ogni riavvio della macchina oppure per contare le rivoluzioni complete dell'albero. Un'altra valida soluzione per la memorizzazione del valore assoluto della posizione è l'utilizzo di memorie tampone (buffer), utili per il recupero veloce dell'informazione al riavvio della macchina.

Parametri

- Risoluzione: $\delta = \frac{360^\circ}{N}$ con N numero di fori
- Linearità: elevata
- Range: $0^\circ \div 360^\circ$
- Sensibilità: dipende dalla risoluzione
- Tempo di risposta: dipende dal fotorilevatore

Vantaggi

1. Costo contenuto. L'incremento di costo dipende dalla risoluzione.
2. Durata elevata grazie a assenza di contatti striscianti.
3. Scarsa sensibilità a disturbi elettrici e magnetici.
4. Idoneo a sistemi di controllo digitale.

Svantaggi

1. Necessità di elettronica esterna, cioè di circuito esterno che permetta di effettuare l'operazione di conteggio e riconoscimento del verso di rotazione.
2. Necessaria procedura di azzeramento.
3. Realizzazioni ottiche sensibili a urti e vibrazioni.

2.4 Encoder ottico assoluto

Questi tipi di sensori forniscono un segnale in uscita descrittivo della posizione assoluta.

2.4.1 Tecnologia

Gli encoder assoluti, come gli encoder incrementale, sono composti dagli stessi elementi (disco, fotorilevatore, fotoemettitore). In questo caso però, il disco è suddiviso in settori che vanno a comporre un codice (binario oppure Gray). Il disco è diviso in n corone circolari (tracce) e in 2^n spicchi. Ogni spicchio (settore) ha n finestre che a seconda se opacizzate o trasparenti corrisponderanno a 1 logico o 0 logico. Ogni finestra ha quindi il valore di un bit. Il bit meno significativo è quello della traccia più interna. Ad ogni posizione perciò è associata una codifica binaria. La risoluzione del sensore è strettamente legata al numero di settori, infatti $\Delta = \frac{360}{2^n}$. Spesso al posto del codice binario viene utilizzato il codice Gray, studiato per evitare errori in fase di lettura. In figura 2.7 si possono notare i 2 codici a confronto. Infatti, nel codice Gray, il passaggio da un numero al successivo avviene sempre variando un'unica cifra binaria, evitando così che nel passaggio tra la lettura di un numero e del successivo possano aversi letture casuali. A differenza degli encoder incrementali, ci sono un fotoemettitore e un corrispondente fotorilevatore per ogni corona circolare del disco. In uscita il sensore non genera più una serie di impulsi/onda quadra ma una sequenza di bit. Esistono anche encoder assoluti multigiro che presentano fra un disco e l'altro un riduttore con rapporto uguale alle divisioni del disco.

Vantaggi

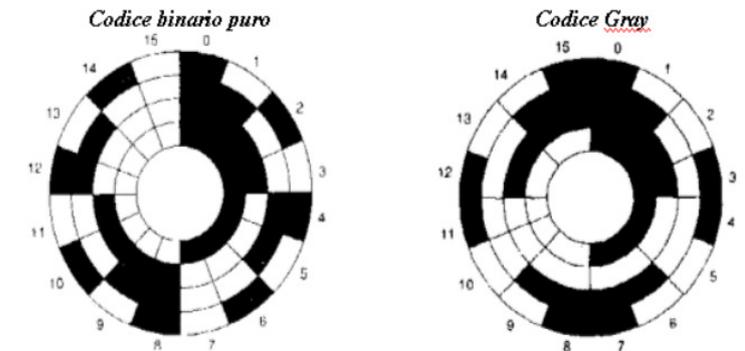


Figura 2.7: codice binario e Gray a confronto [6]

1. Fornisce informazioni che non vengono perse in caso di mancanza di alimentazione.

Svantaggi

1. Più costoso rispetto all'encoder incrementale.
2. Non è in grado di effettuare delle misure della velocità.

La figura 2.8 offre un confronto, rispetto i principali parametri, tra encoder incrementale e assoluto.

2.5 Encoder magnetico

2.5.1 Tecnologia

La struttura dell'encoder magnetico è simile a quella dell'encoder ottico. Al posto del disco scanalato c'è un disco magnetizzato con poli alternati e il fotoemittitore è sostituito da dei sensori ad effetto Hall.¹ Questa differenza la si può notare in figura 2.9. La rotazione del disco produce da parte di questi sensori una risposta che arriva ad un circuito di condizionamento del segnale per determinare la posizione dell'albero.

Vantaggi

¹I sensori ad effetto Hall producono una corrente positiva o negativa in uscita a seconda che vengano stimolati da un polo nord o sud

ENCODER ASSOLUTI	ENCODER INCREMENTALI
COMPLESSITA'	
Hanno una struttura del disco molto complessa Esempio: per avere una risoluzione di 1.4° occorrono 8 tracce, e quindi 8 fotoemettitori e 8 fotorilevatori, 256 settori e ben 2048 finestre	Hanno una struttura molto più semplice Esempio: per avere una risoluzione di 1.4° sono sufficienti 256 finestre e solo 3 fotoemettitori e 3 fotorilevatori. Necessario l'utilizzo di un contatore che possa tenere memoria degli spostamenti.
RANGE	
Possono misurare solo fino a 360°, a meno di non utilizzare encoder assoluti multigiro (comunque limitati nel numero di giri misurabili)	Non hanno limite se non quello legato all'overflow del contatore
AZZERAMENTO	
Non necessitano di azzeramento ad ogni riavvio della macchina (ma solo calibrazione iniziale). In assenza di alimentazione mantengono l'informazione sulla posizione	Non misurano in modo assoluto, necessitano di azzeramento
COSTO	
Maggiore di quello incrementale, dipende dalla risoluzione	Minore di uno assoluto, dipende dalla risoluzione
CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE	
Spesso richiedono elettronica dedicata (codifica proprietaria)	Non necessitano di codifica proprietaria. Condizionamento standard

Figura 2.8: encoder incrementale e assoluto a confronto [4]

1. Durevoli, resistenti agli urti e alle vibrazioni.
2. Non sensibili a polvere e sporcizia, per questo adatti agli ambienti difficili.

Svantaggi

1. Sensibili ad interferenze magnetiche.
2. Variazioni di temperatura causano deriva di posizione.
3. Risoluzioni e precisioni relativamente basse.

2.6 Encoder capacitivo

2.6.1 Tecnologia

In un condensatore la corrente è direttamente proporzionale alla capacità C e alla derivata della tensione applicata ai suoi capi:

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt}$$

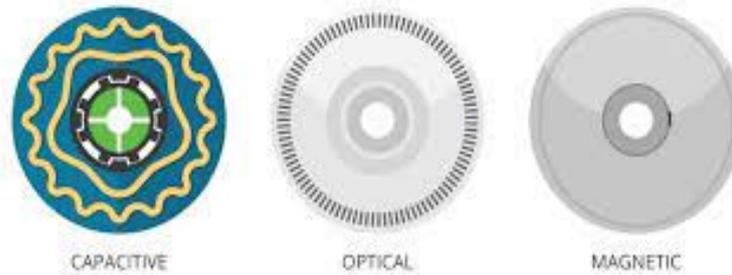


Figura 2.9: Confronto tra dischi di encoder capacitivi, ottici, magnetici [7]

e la capacità C in condensatore piano è direttamente proporzionale alla costante dielettrica ε e alla superficie S delle piastre ed inversamente proporzionale alla distanza d tra di esse:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Il principio di funzionamento degli encoder capacitivi si basa nello sfruttare la possibilità di variare la distanza di due piastre o la superficie di esse, in modo tale da ottenere una variazione di capacità e riuscire a registrare uno spostamento. Ecco che, come si nota in figura 2.10, l'encoder è formato da tre componenti:

- Disco calettato all'albero
- Trasmettitore fisso
- Ricevitore fisso

Per sfruttare il principio illustrato sopra si usa un pattern di barre o linee collocato sia sull'elemento fisso che sull'elemento in movimento come in figura 2.10, in modo tale da creare un condensatore variabile configurato come una coppia trasmettitore/ricevitore. Il movimento del disco e il suo andamento sinusoidale fissato all'albero producono un segnale unico ma prevedibile che viene interpretato da un circuito integrato per calcolare la posizione dell'albero e la direzione.

Vantaggi

1. Non sensibili a polvere e sporcizia.
2. Non sensibili a interferenze magnetiche e rumore elettrico.

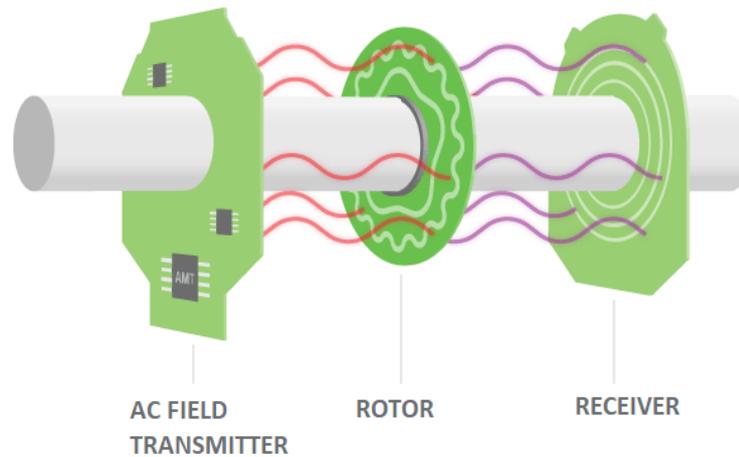


Figura 2.10: Struttura di un encoder capacitivo [8]

3. Buona precisione e alta risoluzione.
4. Flessibilità e programmabilità dei dischi.

2.7 Encoder sin/cos

Sono una variante degli encoder incrementali che trovano impiego nelle applicazioni ad elevate risoluzioni.

2.7.1 Tecnologia

La parte meccanica è identica a quella di un encoder standard, ma l'elettronica è progettata per ottenere delle forme d'onda sinusoidali, invece che onde quadre. Le piste, infatti, sono realizzate in modo tale che la luce della sorgente illumini gradualmente i fotorilevatori al ruotare del disco. I due segnali di uscita A e B diventano così segnali analogici anziché digitali. Si ottengono perciò in uscita due tensioni approssimativamente sinusoidali, sfasate tra loro di un quarto di passo dell'encoder stesso. Poiché il periodo di questi segnali è pari al passo encoder, essi sono in relazione tra loro come il seno ed il coseno di un angolo (un periodo completo equivale ad un passo).

Capitolo 3

Applicazioni pratiche di encoder

3.1 Motori sincroni a magneti permanenti

I sensori angolari sono molto impiegati e quasi indispensabili nei motori elettrici, in quanto permettono di creare un feedback per parametri come la velocità del rotore o la sua posizione. Essi possono essere integrati al motore oppure calettati esternamente.

3.1.1 Tecnologia

I motori sincroni a magneti permanenti, o anche brushless, sono molto diffusi in ambito industriale e vengono impiegati solitamente in servoazionamenti di piccola o media potenza. L'elevato costo di produzione (dovuto al prezzo dei magneti ricavati dalle terre rare) è ampiamente giustificato dall'elevate prestazioni che offrono questi tipi di motori. La conversione elettromeccanica che essi attuano segue il principio di funzionamento dei sistemi elettrodinamici, solo che in questo caso i conduttori su cui agiscono le forze sono collocati nello statore e quindi il rotore si muoverà per il principio fisico di reazione. Come si può notare dallo schema in figura 3.1 e dalla figura 3.2, il rotore e lo statore sono entrambi a forma di corona cilindrica di materiale ferromagnetico laminato e separati da un traferro di aria.

Nello statore vengono collocati gli avvolgimenti che attraversati da corrente generano i flussi, mentre nel rotore vengono fissati i magneti permanenti.

3.2 Orientamento di campo (FOC)

In un qualsiasi motore elettrico agiscono una catena di elementi causa-effetto adeguatamente illustrati nello schema a blocchi in figura 3.3, che permettono di analizzare e comprendere le tecniche di controllo. La coppia erogata da un motore elettrico viene generata dall'iterazione tra la corrente ed il flusso del campo magnetico. La figura 3.4 mostra lo schema a blocchi di un PMSM. Con

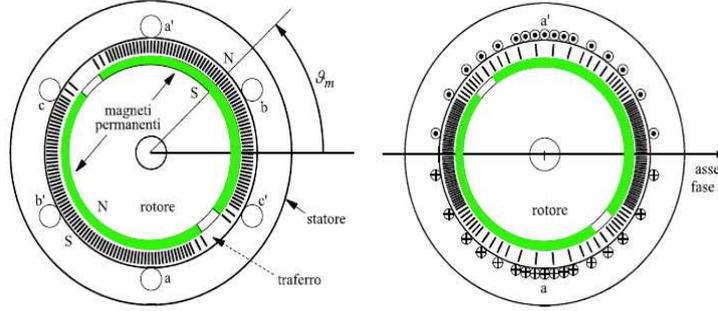


Figura 3.1: Induzione al traferro in un PMSM [9]

l'ausilio di essa ed omettendo i passaggi matematici si può esprimere la coppia elettromagnetica τ prodotta dal motore come:

$$\tau = \frac{3}{2}p\Lambda_{mg}i_q$$

dove p è il numero delle coppie polari, Λ_{mg} il flusso magnetico concatenato dai magneti permanenti, i_d e i_q le componenti del vettore spaziale delle correnti di statore rispetto al sistema di riferimento solidale al rotore. Si osservi ora il diagramma dei vettori spaziali riportato nella figura 3.5. Viene definito α_s l'angolo del vettore spaziale delle correnti di statore rispetto al sistema di riferimento solidale allo statore stesso e quindi la coppia τ può essere scritta come:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{3}{2}p\Lambda_{mg}|i_s| \cos(\alpha_s - \theta_{me} - \frac{\pi}{2}) \\ &= \frac{3}{2}p\Lambda_{mg}|i_s| \sin(\alpha_s - \theta_{me}) = \frac{3}{2}p\Lambda_{mg}|i_s| \sin(\beta)\end{aligned}$$

dove β è detto angolo di coppia. Si deduce che, a parità di flusso concatenato Λ_{mg} e di modulo della corrente $|i_s|$, per ottenere la coppia massima erogata dal motore bisogna imporre $\beta = \frac{\pi}{2}$, ovvero bisogna orientare il vettore spaziale delle correnti di statore in modo che esso risulti ortogonale all'asse d lungo il quale è posto il magnete permanente del rotore. Le due componenti i_d e i_q dovranno essere sempre in quadratura fra loro; questo significa limitare la i_d prossima allo zero. Tale funzionamento è detto appunto *ad orientamento di campo*. Un sensore angolare risulta quindi indispensabile in questi tipi di motore. Esso deve

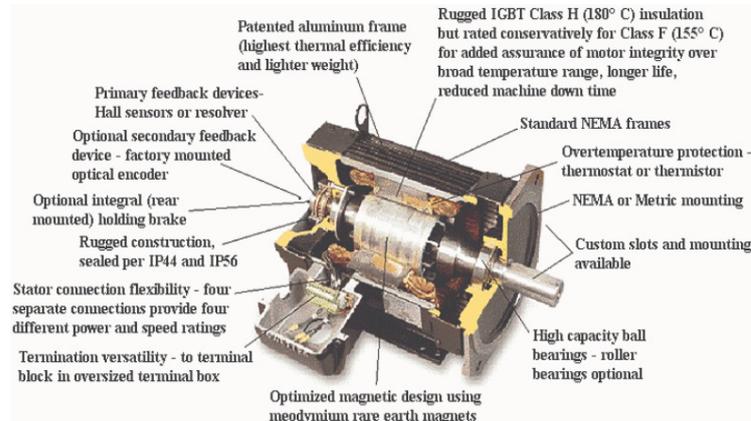


Figura 3.2: Spaccato di un motore sincrono a magneti permanenti [9]

fornire l'esatta posizione del rotore in modo tale che il sistema di controllo possa orientare nel verso corretto il vettore spaziale delle correnti.

3.3 Motori brushless CC serie BL INTECNO

3.3.1 Caratteristiche tecniche

I motori brushless cc della serie BL vengono realizzati in 5 taglie con coppie da 22 mNm a 0.7 Nm. I vantaggi di utilizzare i motori brushless anzichè i tradizionali motori cc a spazzole, sono i seguenti:

- Lunga durata nel tempo
- Elevata efficienza
- Commutazione elettronica e controllo del motore tramite sensori digitali (encoder, resolver ecc...)
- Ampio campo di regolazione della velocità
- Mancanza di manutenzione

I motori della serie BL sono estremamente compatti e grazie al basso momento di inerzia offrono una elevata prestazione dinamica. Le 3 fasi dell'avvolgimento del motore sono a bassa tensione 24V / 36V / 48V e quindi offrono maggiori garanzie in termini di sicurezza dell'impianto, soprattutto nelle applicazioni dove l'operatore può essere a contatto con il motore stesso.

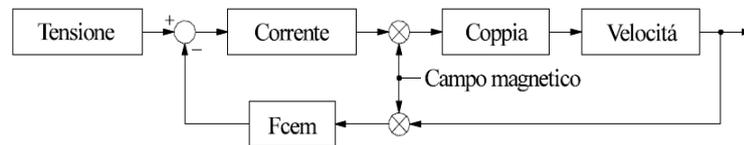


Figura 3.3: Principio causa-effetto nei motori elettrici [9]

3.4 Encoder consigliati

Di seguito una serie di encoder consigliati dall'INTECNO per il controllo dei motori.

3.4.1 Encoder ottico ME22

Descrizione

ME22 è un encoder ottico ad albero cavo, affidabile ed economico, che può essere fissato rapidamente e con facilità ad alberi motore di diverse taglie. L'encoder offre due uscite ad onda quadra in quadratura (sfasate di 90 gradi), per conteggio e direzione. La risoluzione dell'encoder è determinata dal numero di conteggi per rotazione (CPR).

Caratteristiche principali

- Dimensioni compatte: 22,0 mm (diametro) x 21,9 mm (lunghezza)
- Montaggio rapido e semplice, senza venire a contatto con componenti sensibili
- Canali di uscita: 2 (in quadratura) + 1 canale di zero opzionale
- Tensione di alimentazione: 5 Vcc
- Tipo di uscita: TTL compatibile
- Circuito di uscita: pull up

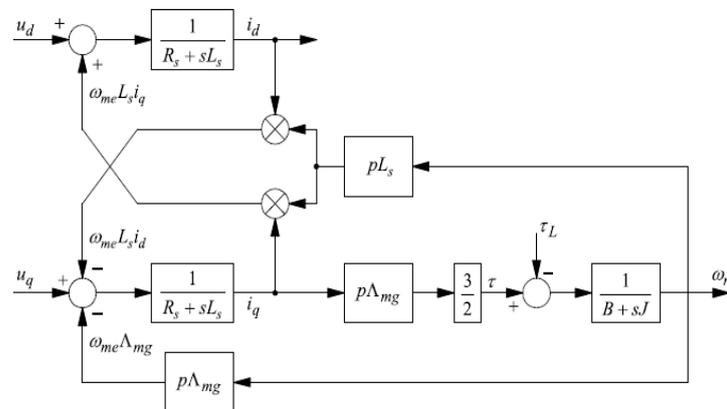


Figura 3.4: Schema a blocchi del motore sincrono a magneti permanenti [9]

- Risoluzione: fino a 360 CPR (Conteggi per Rotazione) ¹
- Diametro albero max.: 9,525 mm (3/8")
- Temperatura di funzionamento: da -20°C a $+85^{\circ}\text{C}$
- Frequenza: 60 kHz

Interfaccia elettrica

Di seguito in figura 3.6 uno schema dei due segnali in uscita all'encoder e l'interfaccia elettrica con i pin dei vari connettori.

3.4.2 Encoder ottico MEC22

Descrizione

MEC22 è un encoder ottico ad albero cavo ad alta risoluzione, che può essere fissato rapidamente e con facilità ad alberi motore di diverse taglie. L'encoder offre due uscite ad onda quadra in quadratura (sfasate di 90 gradi), per conteggio e direzione, e un canale di zero (un impulso per rotazione). La risoluzione dell'encoder è determinata dal numero di conteggi per rotazione (CPR).

Caratteristiche principali

- Dimensioni compatte: 22,0 mm (diametro) x 21,9 mm (lunghezza)

¹CPR - Conteggi per rotazione: numero di tacche del disco ottico o di periodi per rotazione dell'encoder

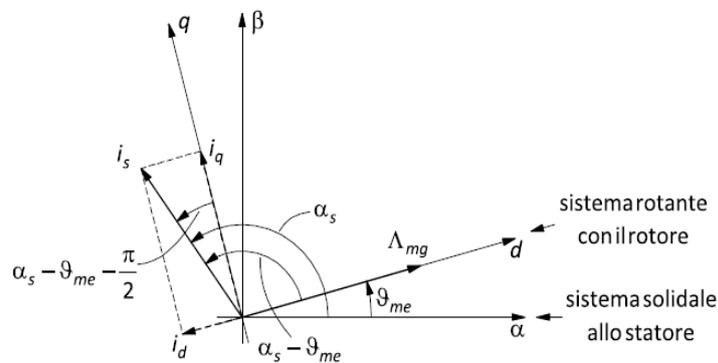


Figura 3.5: Diagramma dei vettori spaziali in un PMSM [9]

- Montaggio rapido e semplice, senza venire a contatto con componenti sensibili
- Uscita in quadratura a due canali con impulso di zero (A / B / I)
- Tensione d'alimentazione: 5 Vcc
- Tipo di uscita: TTL compatibile
- Circuito di uscita: pull up
- Risoluzione: fino a 2048 CPR (Conteggi per Rotazione) ²
- Diametro albero max.: 9,525 mm (3/8")
- Temperatura di funzionamento: da -20°C a $+85^{\circ}\text{C}$

Interfaccia elettrica

In figura 3.7 è rappresentato uno schema dei segnali di uscita. Rispetto all'encoder ME22, questo oltre ad avere una risoluzione maggiore, presenta anche il canale di zero.

²CPR - Conteggi per rotazione: numero di tacche del disco ottico o di periodi per rotazione dell'encoder

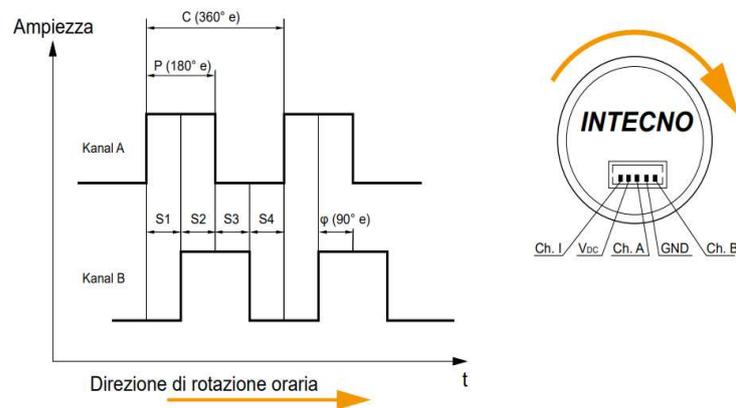


Figura 3.6: Interfaccia elettrica encoder ME22 [10]

3.4.3 Encoder magnetico MEM22

Descrizione

MEM 22 è un encoder magnetico ad albero cavo, affidabile ed economico, che può essere fissato rapidamente e con facilità ad alberi di diverse taglie. Questo encoder è stato specificatamente sviluppato per lavorare in ambienti gravosi, con elevate vibrazioni, oppure basse temperature. Su richiesta, l'encoder è disponibile anche con segnale di commutazione UVW (1, 2 o 4 coppie di poli).

Caratteristiche principali

- Canali di uscita: 2 (in quadratura) + 1 canale di zero
- Opzionale a richiesta: segnali di commutazione UVW
- Tipo di uscita :HTL compatibile o TTL compatibile
- Risoluzione: fino a 1024 CPR (conteggi per rotazione) Opzionale a richiesta: fino a 4 coppie di poli
- Frequenza fino a 300 kHz
- Alimentazione: 5-30 Vcc
- Montaggio rapido e semplice
- Dimensioni compatte: 22,0 mm (diametro) x 21,9 mm (lunghezza)
- Temperatura di funzionamento: da -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$

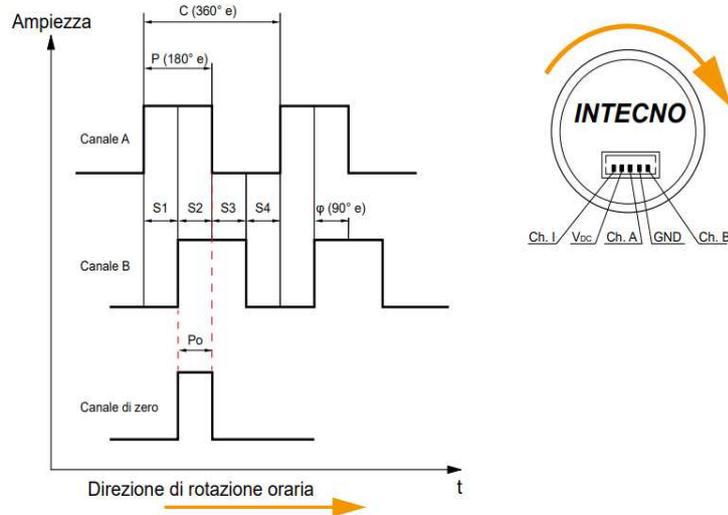


Figura 3.7: Interfaccia elettrica encoder MEC22 [11]

Interfaccia elettrica

L'encoder è disponibile sia con interfaccia elettrica classica come in figura 3.8, con i due canali più quello di zero, oppure con i segnali di commutazione UVW

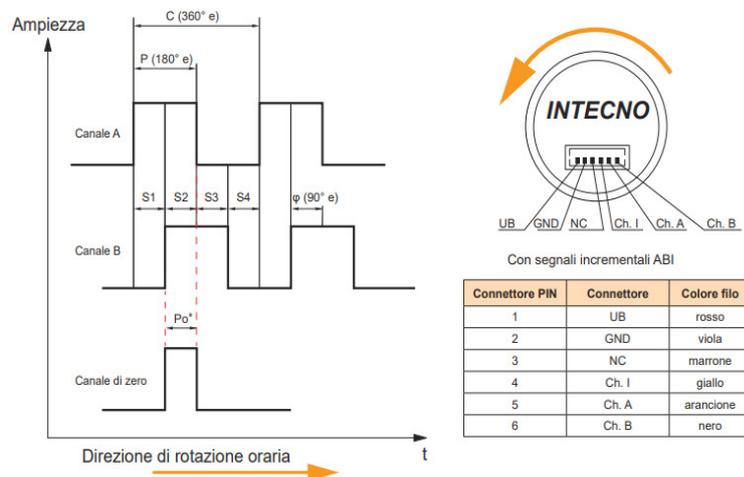


Figura 3.8: Interfaccia elettrica dell'encoder magnetico MEM22 [12]

come si può vedere dalla figura 3.9. Essi sono generati da 3 sensori di Hall posizionati sullo statore del motore.

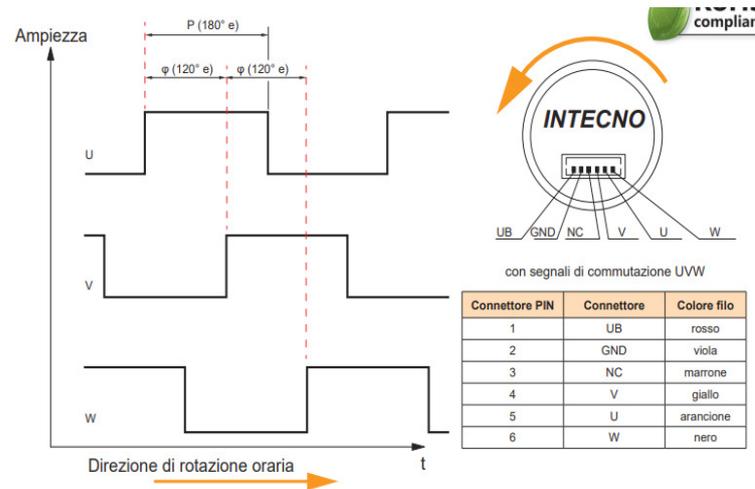


Figura 3.9: Interfaccia elettrica con segnali di commutazione UVW [12]

3.5 Encoder secondario nei robot Fanuc

I robot Fanuc sono equipaggiati con degli encoder secondari, specificatamente progettati per migliorare la precisione dei processi come la maschiatura o la graffiatura a rullo che richiedono robot per esercitare un elevato grado di forza. I benefici dell'uso di un encoder extra sono:

- Alto livello di accuratezza e ripetibilità
- Controllo delle vibrazioni e overshoot
- Riduzione deviazione dei robot
- Compensazione della flessione dovuta alla coppia
- Affidabile rilevamento ottico

3.5.1 Compensazione della deviazione

Affiancato all'encoder principale, l'encoder secondario misura le deviazioni causate da coppia e pressione sull'utensile e le compensa controllando la posizione del robot a velocità ridotte o nella posizione finale. Essi identificano inoltre vibrazione e ampiezza più rapidamente rispetto all'encoder principale, assicurando così un controllo rapido e preciso di vibrazioni e overshoot.

3.5.2 Miglioramento dell'accuratezza

Oltre al rilevamento della posizione del motore tramite codificatore di impulsi, su ogni asse del robot è installato un dispositivo di rilevamento di posizione

con funzione di miglioramento dell'accuratezza e rigidità per il controllo stesso della posizione. Questo strumento garantisce la massima accuratezza e rigidità, eliminando gli effetti di contraccolpo e distorsione causata da ingranaggi e riduttori. Una schematizzazione di tutto ciò è rappresentata in figura 3.10.

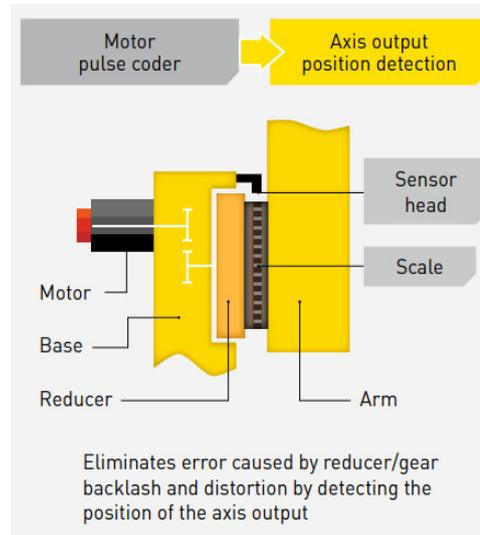


Figura 3.10: Schema di un asse di un robot FANUC [13]

Capitolo 4

Particolari sensori angolari sul mercato

4.1 Encoder a filo lika

4.1.1 Tecnologia

Un encoder a filo è costituito essenzialmente da due parti integrate insieme in un unico dispositivo:

1. Un encoder rotativo, che può essere sia ottico che magnetico, con uscite di tipo incrementale, assoluto e analogico (ma si può montare anche un potenziometro).
2. Un filo d'acciaio di lunghezze diverse avvolto su un tamburo dal quale viene estratto per essere poi riavvolto durante il funzionamento.

Il filo d'acciaio viene fissato all'asse mobile di cui si vuole monitorare il movimento. I due componenti sono solidali per cui al movimento del filo (estrazione e riavvolgimento) corrisponde la rotazione dell'encoder. Ecco quindi che il movimento lineare del filo viene tradotto dall'encoder tramite la rotazione del tamburo in un valore di posizione.

4.1.2 Vantaggi

Il corpo encoder-tamburo (la parte fissa -e anche più delicata- del dispositivo) e il filo d'acciaio collegato all'asse da misurare (la parte mobile, e anche la più resistente) si possono intendere, in qualche modo, come due elementi separati. Ne consegue che il corpo encoder può essere montato a una certa distanza rispetto all'area di movimentazione del filo e al sistema che si vuole monitorare. Questo significa che il corpo encoder può essere installato in uno spazio facilmente accessibile, agevole, adeguatamente protetto; mentre il filo d'acciaio può essere contemporaneamente sottoposto a condizioni di lavoro più crude, ossia a sporcizia,

umidità, alte temperature, ecc. Inoltre date le esigue dimensioni del filo, lo spazio di movimento può essere alloggiato, come detto, in uno spazio diverso e più ampio. Un ulteriore vantaggio deriva dal fatto che al meccanismo di movimentazione del filo può essere abbinato un qualsiasi encoder capace di tutte le funzionalità di un encoder standard. Questi tipi di encoder trovano largo impiego per esempio nei sistemi di trasporto senza conducente dotati di sollevatore dove misurano l'altezza di sollevamento per misurare o recuperare con precisione la merce trasportata. Altre tipiche applicazioni sono le attrezzature mobili, gru telescopiche, autocarri con piattaforma aerea, macchinari ed equipaggiamenti per l'agricoltura e l'industria forestale, bracci allungabili, carrelli elevatori, piattaforme di sollevamento, apparecchiature elettro-medicali (tavoli operatori a da visita, letti ospedalieri e poltrone dentistiche).

4.1.3 Encoder a filo SFE lika

Gli encoder a filo SFE montano al proprio interno un encoder incrementale. Un modello della gamma SFE è per esempio il SFE-1500-H-500-4-L1 che presenta le seguenti caratteristiche:

- Corsa per giro = 100mm
- Risoluzione per giro = 500 PPR
- Risoluzione lineare = 0,2 mm
- Numero massimo di giri = 15
- Corsa massima = 1500 mm

Lo schema dei segnali di uscita dall'encoder è rappresentato in figura 4.1. Esso fornisce una canale A, B e di zero; di tutti e tre è presente anche quello negato. Il numero di impulsi in uscita è proporzionale allo spostamento meccanico del supporto mobile a cui è fissato il filo. Il valore di posizione letto nel dispositivo è espresso in impulsi; pertanto è necessario tradurre poi questo valore in un'informazione di posizione lineare. Per ottenere la posizione in millimetri, per esempio, bisogna moltiplicare il numero di informazioni per la risoluzione lineare dell'encoder in millimetri. Considerando che una rotazione dell'encoder corrisponde a uno sviluppo lineare di 100 mm, la risoluzione lineare di esso è ricavabile dal seguente calcolo:

$$\text{Risoluzione lineare} = \frac{\text{Sviluppo lineare rotazione}}{\text{Risoluzione}}$$

Per conoscere poi la posizione lineare sarà necessario moltiplicare il valore della quota trasmessa per la risoluzione lineare:

$$\text{Posizione lineare} = \text{quota trasmessa} \cdot \text{risoluzione lineare}$$

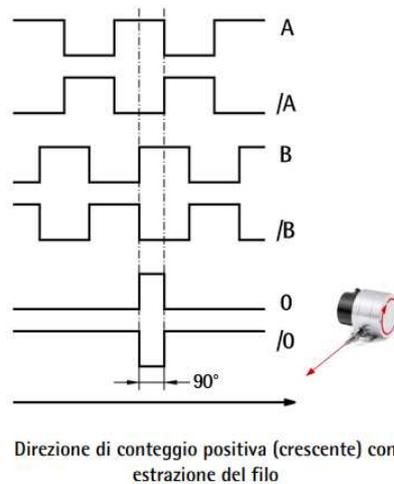


Figura 4.1: Schema segnali di uscita [14]

4.2 Encoder incrementale programmabile ITALSENSOR

L'azienda ITALSENSOR produce degli encoder incrementali programmabili, ovvero, tramite software fornito, è possibile impostare e cambiare i parametri dell'encoder a seconda delle esigenze e dal tipo di applicazioni. I principali vantaggi di questo dispositivo è che diventa una soluzione ideale per diverse applicazioni che richiedono un unico modello di encoder ma con risoluzioni differenti. Inoltre si riducono notevolmente i tempi di setup e manutenzione. Il software incluso con l'encoder permette di programmare i seguenti parametri:

- **Risoluzione PPR** ($1 \div 65536$)
- **RPM velocità** permette di ottimizzare la struttura del segnale di uscita in termini di Jitter e fase. La scelta del RPM è in relazione con la risoluzione scelta. Infatti più grande è la risoluzione, più piccola dovrà essere la velocità massima.
- **Direzione di conteggio** E' possibile definire la direzione di conteggio tramite apposito tasto, oppure attraverso lo sfasamento tra il segnale del canale A e B.
- **Sincronismo di zero** definito attraverso due opzioni possibili: sincronizzato rispetto al canale A (180°) o rispetto al canale AB (90°). In figura 4.2 è possibile vederne una schematizzazione.

- **Livello di tensione del segnale di uscita** il range di tensione di uscita può essere compreso tra 0V e 5V oppure tra 0V e V_{cc} con V_{cc} tensione di alimentazione dell'encoder, come mostrato in figura 4.3.

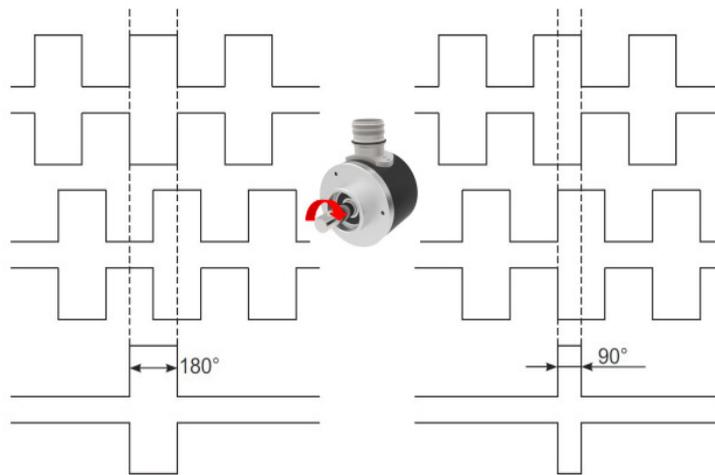


Figura 4.2: Segnali di uscita canali A, B e zero [15]

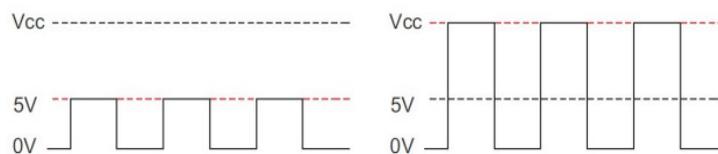


Figura 4.3: Voltaggio del segnale di uscita [15]

4.3 Encoder con tachogenerator ITALSENSOR

L'azienda ITALSENSOR produce una gamma speciale di encoder con tachogenerator integrato in grado di misurare oltre che la posizione angolare anche la velocità dell'albero su cui è montato. La figura 4.4 mostra un disegno tecnico del dispositivo e l'integrazione del generatore con l'encoder.

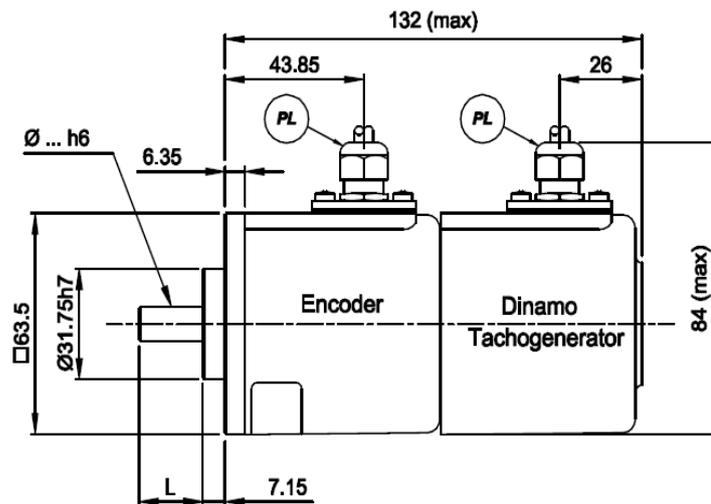


Figura 4.4: Disegno tecnico encoder con tachogenerator [16]

4.3.1 Tachogenerator

Il tachogenerator è a tutti gli effetti un generatore, e quindi in quanto tale trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. Per quantificare e misurare la velocità di rotazione del dispositivo a cui viene collegato sfrutta la relazione che lega la tensione prodotta alla velocità angolare. In formule:

$$V_0 = K_t \cdot \omega_s$$

e

$$K_t = \frac{\phi P}{60} \cdot \frac{Z}{a}$$

con

- V_0 = tensione di uscita (V)
- K_t = costante dinamo tachimetrica (Vs/rad)
- ω_s = velocità angolare (rad/s)
- Φ = flusso per polo (Weber)

- P = numero di poli
- Z = numero di conduttori negli avvolgimenti dell'indotto
- a = numero di percorsi paralleli negli avvolgimenti dell'indotto

In figura 4.5 è rappresentato un tachogenerator di tipo CC a spazzole con lo statore a magneti permanenti e un'armatura rotante avvolta. Un'estremità dell'armatura del rotore è attaccata all'oggetto di cui viene misurata la velocità e il rotore a sua volta è immerso nel campo magnetico generato dallo statore. Il rotore ruotando induce una tensione elettrica e l'ampiezza di quest'ultima come visto in precedenza è proporzionale alla velocità di rotazione. Un commutatore infine converte la corrente alterna generata in continua che viene interpretata da un circuito voltmetro e convertita in velocità. Inoltre i tachogenerator riescono a determinare anche il senso di rotazione in quanto se esso cambia cambia anche la polarità della tensione.

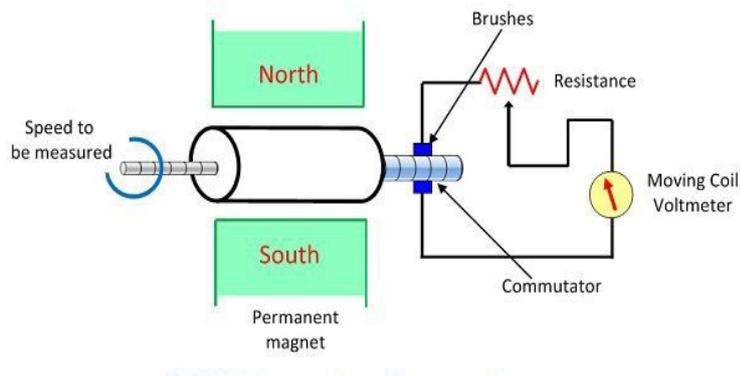


Figura 4.5: Schema di un tachogenerator CC [16]

Conclusioni

Il seguente lavoro ha analizzato la pratica di applicazione delle tecnologie relative al campo dei sensori angolari nell'industria moderna, considerando alcuni esempi presenti sul mercato.

In prima battuta la ricerca ha preso in considerazione il contesto di applicazione di tali sensori. Nel campo della robotica industriale quest'ultimi risultano di vitale importanza. Nel proseguo del lavoro si è riportata la storia della nascita della robotica e ci si è soffermati nell'analisi dei robot manipolatori, delle loro caratteristiche e dei vari tipi di modelli.

Nel secondo capitolo si è poi proposta una panoramica dello stato delle tecnologie utilizzate per la realizzazione dei sensori angolari: si è analizzato nel dettaglio i vari principi fisici sfruttati per convertire la posizione angolare in un segnale elettrico e i vantaggi e svantaggi dei principali trasduttori di posizione angolare. Proseguendo, nel terzo capitolo si sono affrontati due casi studio: il primo descrive l'importanza e l'utilizzo di encoder nei motori elettrici brushless per applicare la tecnica di *orientamento di campo* (FOC) e sfruttare così la massima coppia erogabile dal motore; il secondo caso invece, si presta ad illustrare i vantaggi del montare un encoder secondario nei robot manipolatori dell'azienda Fanuc dedicati alla maschiatura e graffiatura.

Infine, nell'ultimo capitolo ci si è soffermati nell'illustrazione di particolari trasduttori presenti nei cataloghi di alcune aziende leader nel settore.

La presente ricerca ha quindi evidenziato come analizzando il contesto di applicazione, le principali caratteristiche dei sensori e alcuni esempi ritenuti rilevanti all'interno dell'offerta di mercato, si può affermare che questo tipo di trasduttore continua a svolgere un ruolo importante nel campo della mecatronica e dell'automazione.

Bibliografia

- [1] P. Lino, “Corso di controllo dei robot.”
- [2] “Elemania, sensori-definizioni.”
- [3] M. Bertocco and A. Sona, *Introduzione alle misure elettroniche*. Lulu, 2nd ed., 2010.
- [4] A. Sona, “Sensori per l’automazione.”
- [5] “Potenziometro su wikipedia.”
- [6] G. Tudisco, “Appunti sugli encoder.”
- [7] “Confronto tra encoder capacitivi ed encoder induttivi-celera.”
- [8] “Cui devices.”
- [9] M. Zigliotto, “Dispensa macchine e azionamenti elettrici.”
- [10] INTECNO, “Scheda tecnica encoder intcno me22.” https://www.micro-intecno.com/wp-content/uploads/2020/03/ManualeEncoder_ME22_IT190528.pdf.
- [11] INTECNO, “Scheda tecnica encoder intcno mec22.” https://www.micro-intecno.com/wp-content/uploads/2020/03/ManualeEncoder_ME22_IT190528.pdf.
- [12] INTECNO, “Scheda tecnica encoder intcno mem22.” https://www.micro-intecno.com/wp-content/uploads/2021/06/ManualeEncoder_MEM22_IT210303.pdf.
- [13] FANUC, “Fanuc secondary encoders.” <https://www.fanuc.eu/it/it/robot/accessori>.
- [14] lika, “Manuale d’uso encoder a filo gamma sfe.” <https://www.likaitalia.it/ita/prodotti/encoder-a-filo/encoder-a-filo/sfe>.
- [15] ITALSENSOR, “Encoder incrementale programmabile.” <http://www.italsensor.com/wp-content/uploads/2015/10/TISP58-SW-UM-EN-R1.pdf>.
- [16] D. Collins, “What is a tachogenerator and when is it used?,”

- [17] D. S. Nyce, *Position sensor*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [18] “Trasduttori di posizione angolare su wikipedia.”
- [19] “Resolver su wikipedia.”
- [20] “Cobot su wikipedia.”
- [21] “Robot industriali su wikipedia.”
- [22] “Robot industriali: quali sono le funzioni, le origini e come funzionano.”
- [23] M. Costacurta, “Storia della robotica: origini e sviluppi,”
- [24] “Resolver, encoder ottici ed encoder induttivi-celera.”
- [25] J. Smoot, “Pro e contro delle tecnologie degli encoder,”
- [26] “Automazione robotica industriale: Cos’è e quali vantaggi per le industrie.”
- [27] “Intelligenza artificiale: Nuove tecnologie a supporto delle imprese.”
- [28] “Cos’è il machine learning?-oci.”
- [29] A. associazione italiana automazione e misura, “Linee guida per gli encoder rotativi.”
- [30] P. Rocco, “Robotica industriale.”
- [31] P. S. Ambrosini, Maini, *Elettrotecnica ed elettronica*. RCS Libri S.p.a-Tramontana, 2014.
- [32] “Intecno.”
- [33] INTECNO, “Scheda tecnica motori brushless cc.” https://www.microintecno.com/wp-content/uploads/2018/06/E_MicroBrushless180504WEB.pdf.
- [34] “Encoder a filo lika.”
- [35] “Encoder a filo kubler.”
- [36] ITALSENSOR, “Scheda tecnica encoder + tachogenerator.” <http://www.italsensor.com/tdt50/>.