

Tecnologie dei Sistemi di Automazione e Controllo

Prof. Gianmaria De Tommasi

Lezione 2 Caratteristiche dei sensori Sensori di moto

Corso di Laurea
Codice insegnamento
Email docente
Anno accademico

N39
U0998
detommas@unina.it
2019/2020

Lezione numero: 2

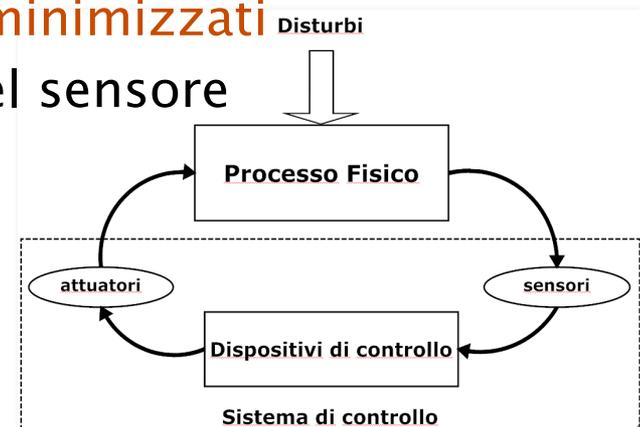
Parole chiave: Sensori, caratteristiche di un sensore, sensori di moto, sensori di prossimità

Sommario della lezione

- **Caratteristiche di un sensore**
- **Richiami su amplificatori operazionali e ponte di Wheatstone**
- **Sensori di moto**
 - **Sensori di posizione (spostamento)**
 - **Sensori di velocità**
 - **Sensori di accelerazione**
- **Sensori di prossimità**

Sensori

- In un sistema di controllo, i **sensori** sono i dispositivi che permettono di «rilevare» (misurare) lo «stato» del sistema (le variabili di interesse)
- I sensori sono elementi **critici** di un sistema di controllo e possono influire negativamente sulle prestazioni
- I sensori devono garantire un'opportuna precisione sia **statica** che **dinamica**
- **Ritardi e rumore** di misura devono essere **minimizzati**
- È preferibile lavorare in zone di **linearità** del sensore



Sensori e trasduttori

Sensore (*elemento sensibile primario*) – trasforma la grandezza da misurare nella grandezza misurata

Trasduttore – trasforma una grandezza di natura fisica o chimica in una grandezza di un'altra natura (tipicamente elettrica)

Spesso sensore e trasduttore coincidono nello stesso elemento. Pertanto si parla in generale di sensore (o trasduttore) indicando un dispositivo che trasforma le variazioni della variabile da misurare in variazioni di una grandezza di natura diversa (tipicamente elettrica)

Caratteristiche di un sensore 1/11

Tipo di uscita

Una prima «classificazione» dei sensori può essere fatta sulla base del tipo di uscita:

- **sensori analogici** – l'uscita assume valori continui in un determinato intervallo
- **sensori digitali** – l'uscita assume valori discreti in un determinato intervallo
- **sensori binari (on/off)** – l'uscita assume solo due valori

Caratteristiche di un sensore 2/11

Accuratezza

- È definita come massimo errore che il sensore può commettere in un'operazione di misura
- È definita rispetto ad una misura di riferimento (ritenuta uguale al «valore vero»)
- L'accuratezza viene specificata con un unico valore che rappresenta il massimo scostamento tra l'uscita del sensore e la misura di riferimento su tutto il range di misura
- La mancanza di accuratezza deriva da errori sistematici
- La mancanza di accuratezza può essere «compensata» da una taratura periodica del sensore
- L'accuratezza non fa confusa con la risoluzione di un sensore

Caratteristiche di un sensore 3/11

Accuratezza

- Accuratezza espressa in percentuale sul fondo scala

$$\varepsilon_f = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_{FS}}$$

- Accuratezza espressa in percentuale sulla misura

$$\varepsilon_{\%} = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_v}$$

- Accuratezza espressa come scostamento massimo:
 - costante
 - legge di variazione: lineare nel range di misura

Caratteristiche di un sensore 4/11

Precisione

- È definita come varianza tra più misure
- Esprime la dispersione di successive misure dello stesso valore di riferimento («valore reale»)
- In pratica viene calcolata come massimo scostamento tra una generica lettura e la miglior stima del «valore vero» effettuata con il sensore
- La mancanza di precisione deriva da errori casuali
- La precisione può essere aumentata mediando misure successive
- Nei sistemi di controllo è la precisione è più importante dell'accuratezza

Caratteristiche di un sensore 5/11

Caratteristica statica e sensibilità

- Descrive la relazione che esiste tra l'ingresso (grandezza da misurare) e l'uscita del sensore.
- In generale è una **funzione nonlineare** $y=f(u)$.
- Quando il campo di misura è sufficientemente ristretto e la caratteristica statica non si discosta dalla retta (tenuto conto sia dell'accuratezza che della precisione), allora la si può considerare di proporzionalità diretta (e quindi lineare).
- Sensibilità: $S(y) = \frac{\Delta y}{\Delta u}$. In caso di sensore lineare $S(y)$ è costante, altrimenti dipende dal valore dell'uscita.

Caratteristiche di un sensore 6/11

Risoluzione di un sensore

- La risoluzione esprime la minima variazione dell'ingresso che produce una variazione dell'uscita.
- La risoluzione può essere espressa percentualmente rispetto al range di misura in ingresso:

$$RES = 100 \cdot \frac{\Delta U_{min}}{U_{max} - U_{min}}$$

- Se la minima variazione in ingresso che produce una variazione in uscita può essere considerata *infinitesima*, allora impropriamente si dice che la risoluzione del sensore è *infinita*.

Caratteristiche di un sensore 7/11

Risoluzione e soglia di sensibilità

- In generale la risoluzione può essere diversa in punti diversi del campo di misura. In questi casi è utile fornire:
 - la risoluzione media
 - **la risoluzione massima (corrispondente al suo valore minimo)**
 - la risoluzione attorno allo 0, detta **soglia di sensibilità**

Caratteristiche di un sensore 8/11

Caratteristiche dinamiche

- Il comportamento dinamico di un sensore è spesso caratterizzato attraverso la sua risposta indiciale attorno ad un punto di funzionamento.

$$F(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)}$$

- Pertanto dinamicamente un sensore può essere caratterizzato mediante i parametri della sua risposta indiciale nel dominio del tempo (tempo di salita, tempo di assestamento, sovraelongazione massima, ecc.)
- Spesso, però, i costruttori si limitano a fornire solo alcuni di questi parametri, ed in particolare la **banda passante** del sensore
- **Se la banda passante risulta molto superiore alle massime frequenze in gioco nel sistema di controllo (cioè alla banda passante del sistema a ciclo chiuso che si vuole realizzare) si può assumere che il sensore sia caratterizzato dalla sola sensibilità (costante), senza dover portare in conto del suo modello dinamico nel progetto**

Caratteristiche di un sensore 9/11

Range d'ingresso e uscita

- **Range d'ingresso (Rangeability):** esprime il campo di misura (come rapporto tra fondo scala e estremo inferiore di misura normalizzato all'unità) entro il quale sono garantite alcune proprietà «di targa» (accuratezza, precisione, linearità, ecc.)
- **Range d'uscita:** è l'intervallo di valori che può assumere la grandezza di uscita

Caratteristiche di un sensore 10/11

Isteresi e drift

- **Isteresi:** si ha quando il segnale di uscita per un dato valore dell'ingresso può assumere valori differenti a seconda del «verso» della variazione dell'ingresso.
- **Drift:** è definito come la variazione dell'uscita su lunghi periodi di tempo quando all'ingresso viene applicato un segnale costante.

Caratteristiche di un sensore 11/11

Impedenza di uscita, Effetto di carico e Rumore

- **Impedenza di uscita:** Per i sensori che in uscita forniscono una grandezza elettrica, l'impedenza d'uscita è un parametro importante per i problemi di interfacciamento. In generale è tanto migliore quanto più basso è il suo valore.
- **Effetto di carico:** l'introduzione di un sensore in un processo può modificarne il funzionamento. Esempi:
 - Voltmetro a bassa impedenza
 - Accelerometro molto pesante
- **Rumore:** un sensore può generare rumore in uscita, corrompendo l'informazione utile

Scelta di un sensore 1/2

I fattori che intervengono nella scelta di un sensore sono:

- il range di misura
- la precisione statica (accuratezza, precisione, risoluzione) e l'intervallo di linearità
- la precisione dinamica (la banda passante)
- **l'affidabilità**
- **il costo**
- problemi legati all'installazione
- materiali di costruzione

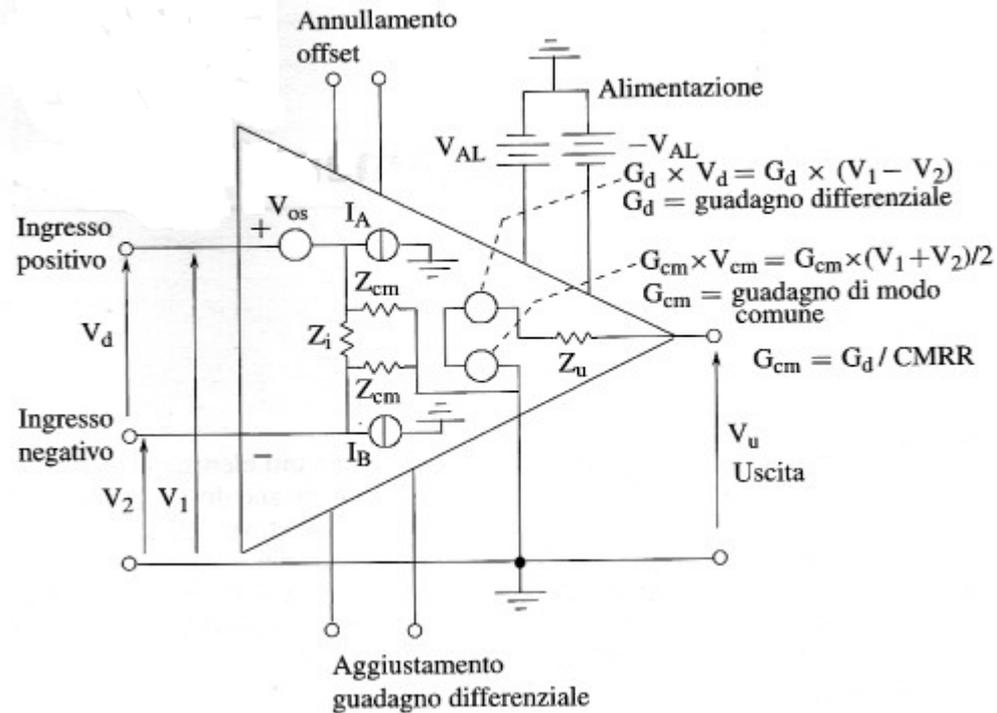
Scelta di un sensore 2/2

Poichè le caratteristiche dei sensori variano con i progressi tecnologici, **conviene sempre utilizzare i cataloghi dei fornitori** per:

- dimensioni
- caratteristiche
- prestazioni

La conoscenza delle caratteristiche dei sensori in un particolare ambito applicativo diventa parte del bagaglio professionale

Amplificatori Operazionali 1/5



$$V_u = G_d \cdot (V_1 - V_2) + G_{cm} \frac{V_1 + V_2}{2} + V_{offset}$$

Amplificatori Operazionali 2/5

- Amplificatore invertente
- Amplificatore non-invertente
- Adattatore d'impedenza
- Amplificatore differenziale
- Derivatore
- Integratore

Amplificatori Operazionali 3/5

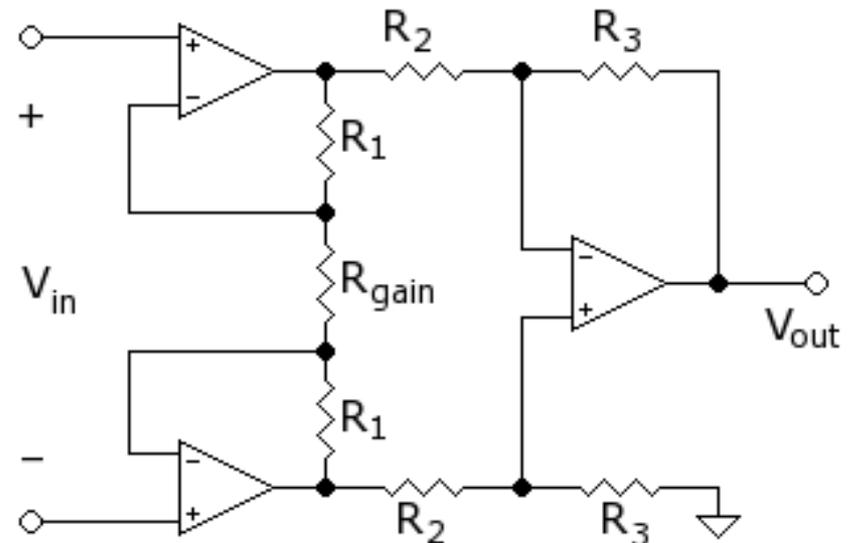
Scelta dei valori di resistenza

- I valori di resistenza dei componenti esterni va scelta nel range $100 \Omega \div 100 \text{ k}\Omega$
- I guadagni ottenibili con le configurazioni viste (invertente, non-invertente, differenziale) sono limitati (~ 100)
- Guadagni più elevati si possono raggiungere con più stadi in cascata

Amplificatori Operazionali 4/5

Amplificatori da strumentazione

- I componenti (A.O. e resistenze) devono avere ottime caratteristiche (precisione,...)
- La struttura deriva dall'amplificatore differenziale
- I due A.O. d'ingresso permettono di aumentare di molto la resistenza d'ingresso
- Il guadagno si cambia variando R_{gain}
- Consente di ottenere guadagni elevati (> 100)
- In molti integrati R_{gain} può essere variata in modo programmabile (PGIA, Programmable Gain Instrumentation Amplifier).

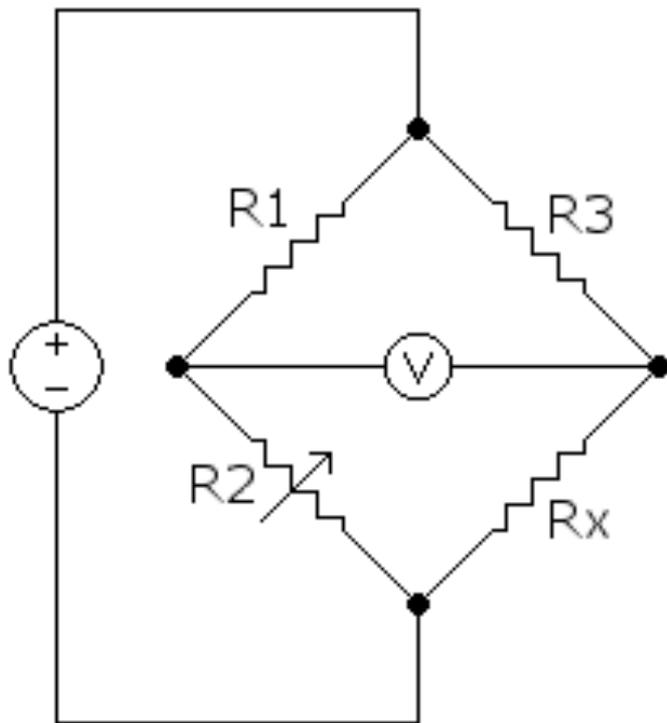


Amplificatori Operazionali 5/5

Amplificatori di isolamento

- Gli amplificatori di isolamento sono amplificatori da strumentazione in cui il circuito d'ingresso è isolato galvanicamente dall'alimentazione e dal circuito d'uscita
- Gli amplificatori di isolamento trovano applicazione in numerosi casi pratici, tipicamente:
 - quando la tensione di modo comune risulta troppo elevata per l'integrità del dispositivo (in particolare supera la tensione di alimentazione)
 - per motivi di sicurezza delle persone
- L'isolamento galvanico si ottiene mediante due tecniche:
 - accoppiamento trasformatore
 - accoppiamento ottico

Ponte di Wheatstone



Sensori di Moto

I sensori di moto includono:

- sensori di spostamento (o posizione) lineare ed angolare
- sensori di velocità
- sensori di accelerazione
- sensori di prossimità

Sensori di spostamento 1/12

Sensori di spostamento (o posizione)

I sensori di spostamento possono essere classificati in base al metodo adottato per effettuare la misura:

- **Metodi incrementali** – il segnale di posizione si ottiene mediante conteggio di impulsi
- **Metodi assoluti** – basati sulla codifica diretta del valore assoluto della posizione

Sensori di spostamento 2/12 Potenziometri commerciali



Sensori di spostamento 3/12

Il potenziometro

- Il potenziometro trasforma una variazione di posizione in una variazione di resistenza.
- La variazione di resistenza può essere misurata con un ponte o può venire direttamente trasdotta in una variazione di corrente (**metodo di misura assoluto**).
- Potenziometri lineari e angolari
- Potenziometri a spira e a film
- La banda di funzionamento è molto elevata ed è limitata dalle induttanze e dalle capacità parassite
- Vita meccanica limitata (usura dovuta ad attrito)
- Rumore elettrico in uscita dovuto allo sfregamento

Sensori di spostamento 4/12

Sensori di posizione capacitivi

- Funzionamento basato sul principio del condensatore a piatti paralleli

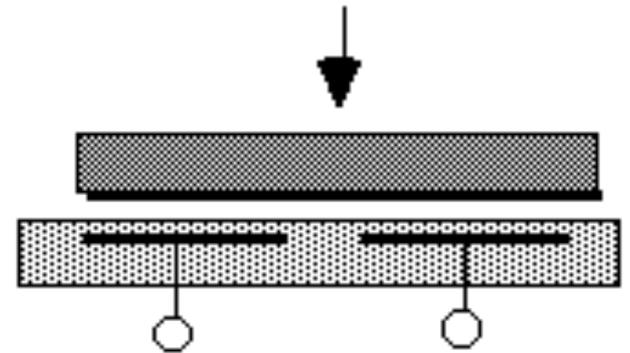
$$C = K\epsilon \frac{A}{d}$$

- Lo spostamento meccanico fa variare d oppure A .
- Le variazioni di capacità ottenibili sono tipicamente piccole.
- La variazione di capacità può essere trasdotta mediante un ponte in alternata oppure **mediante un circuito oscillatore ed un convertitore frequenza/tensione (metodo di misura assoluto)**

Sensori di spostamento 5/12 Touchpad

Una possibile applicazione dei sensori di posizione capacitivi è il *touchpad* nei laptop

- griglia di sensori capacitivi
- la posizione del dito fa variare la capacità tra due conduttori



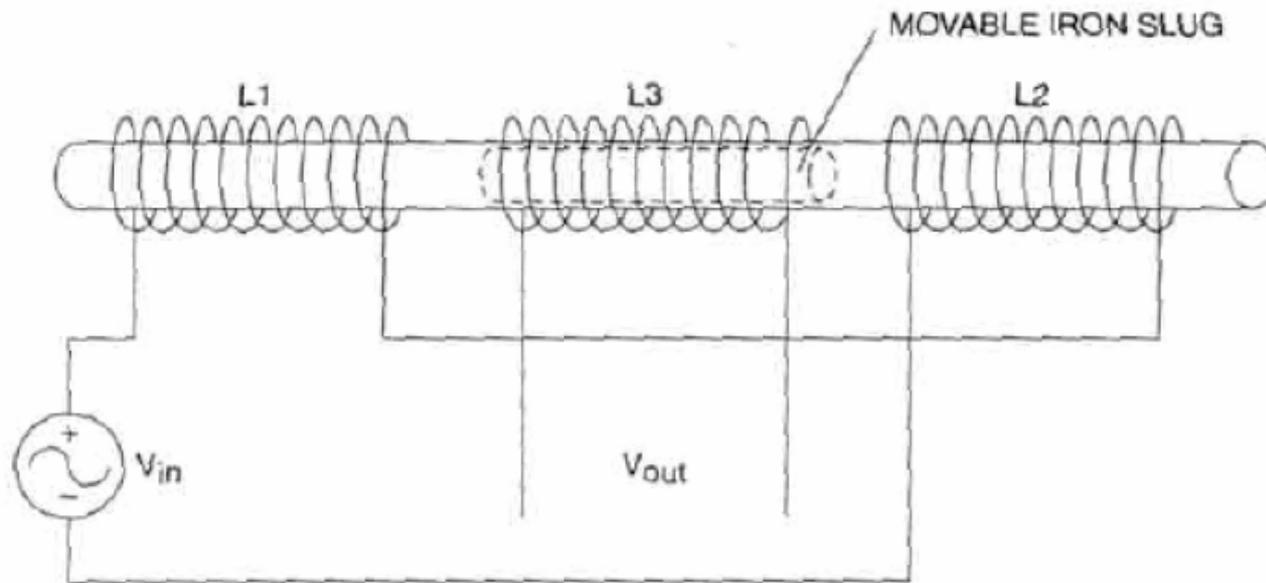
Sensori di spostamento 6/12

Sensori di posizione induttivi

- Funzionamento basato sulla variazione dell'induttanza in una bobina a seguito dello spostamento del suo nucleo di materiale ferromagnetico
- La variazione di induttanza può essere trasdotta mediante un ponte in alternata oppure mediante un circuito oscillatore ed un convertitore frequenza/tensione (**metodo di misura assoluto**)
- Rispetto al potenziometro non soffre di problemi di usura e quindi ha una vita meccanica più lunga
- Rispetto ad un potenziometro è meno sensibile alle variazioni di temperatura

Sensori di spostamento 7/12

Trasformatore Differenziale Variabile Lineare (LVDT)

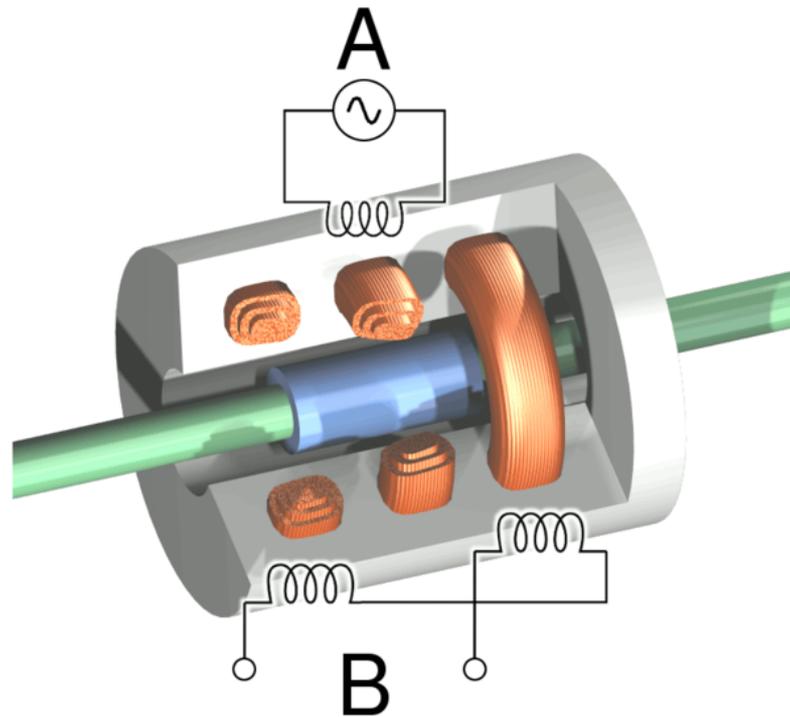


- Esiste anche la versione *rotante* per misurare spostamenti angolari
- Metodo di misura assoluto

Sensori di spostamento 8/12

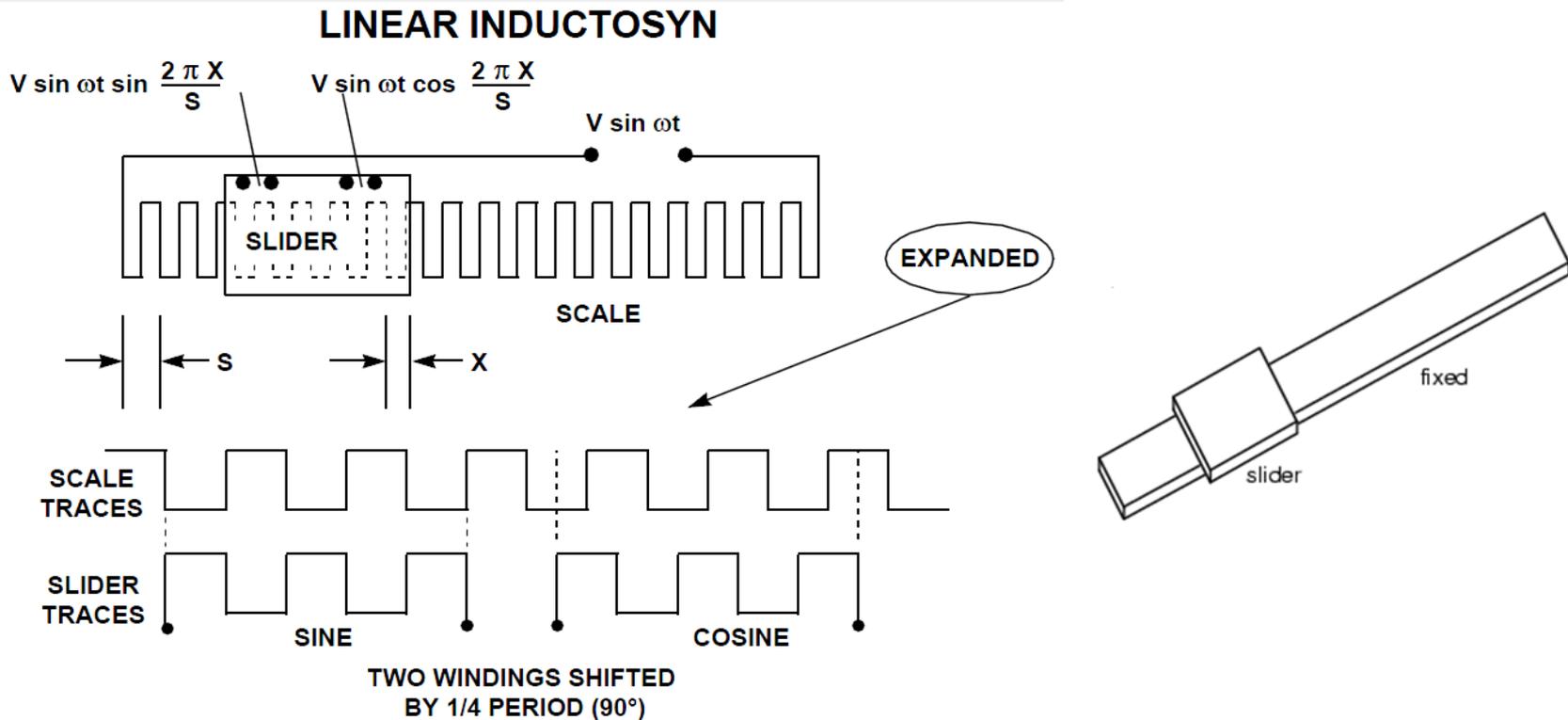
Trasformatore Differenziale Variabile Lineare (LVDT)

Esempio



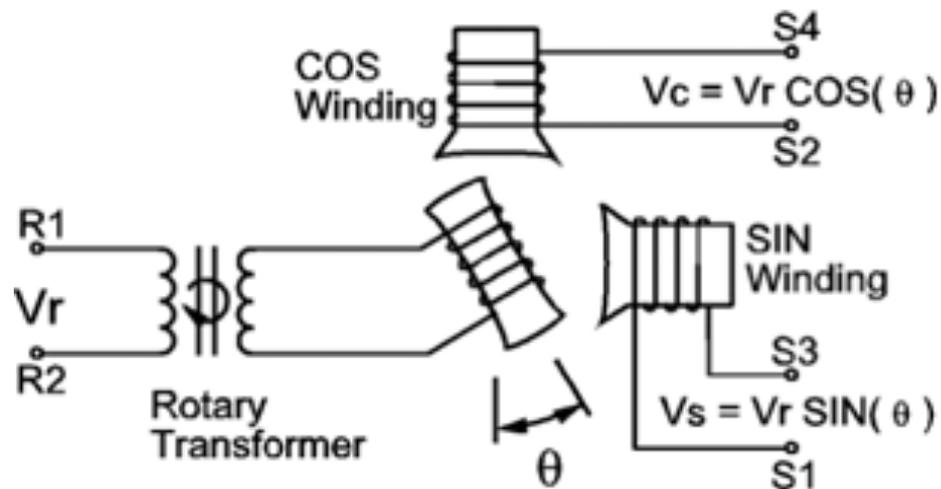
Sensori di spostamento 9/12

Inductosyn



- Metodo di misura incrementale

Sensori di spostamento 10/12 Resolver

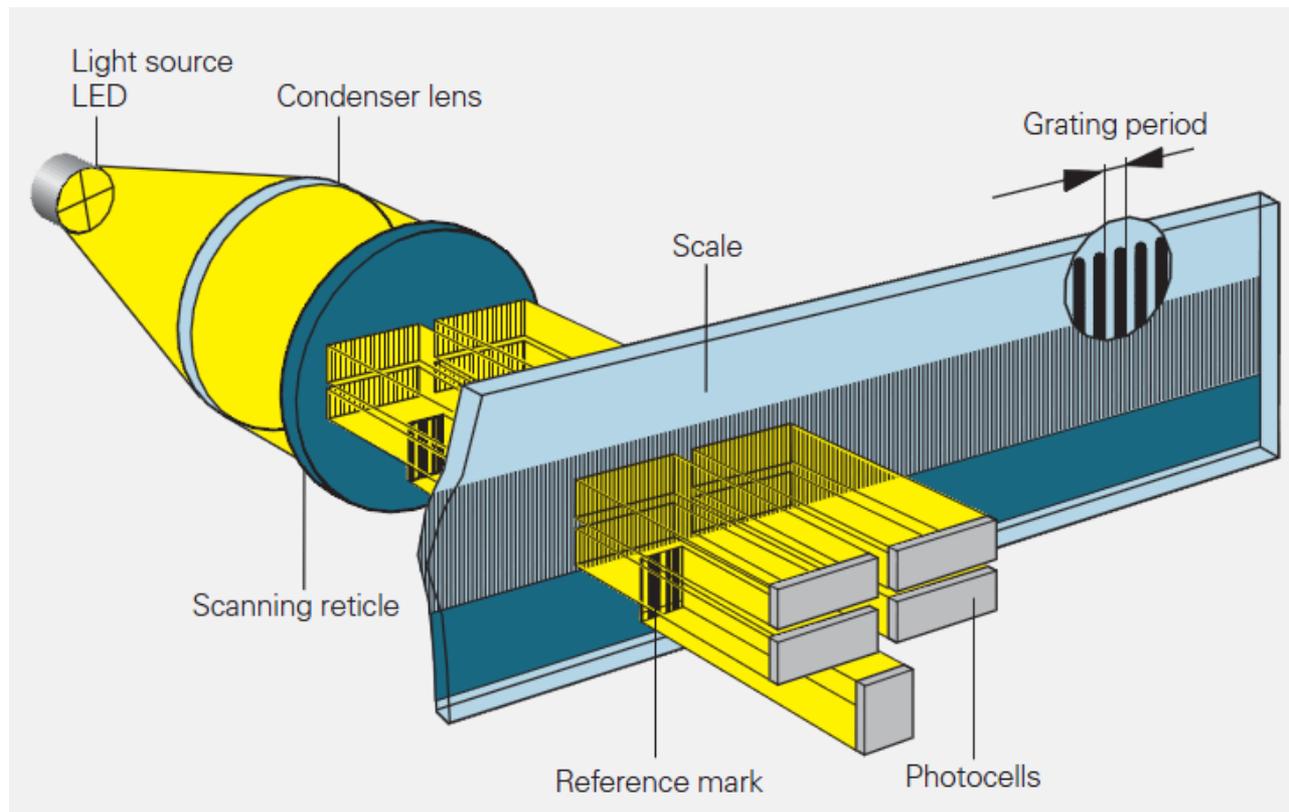


Sensori di spostamento 10/12 Encoder

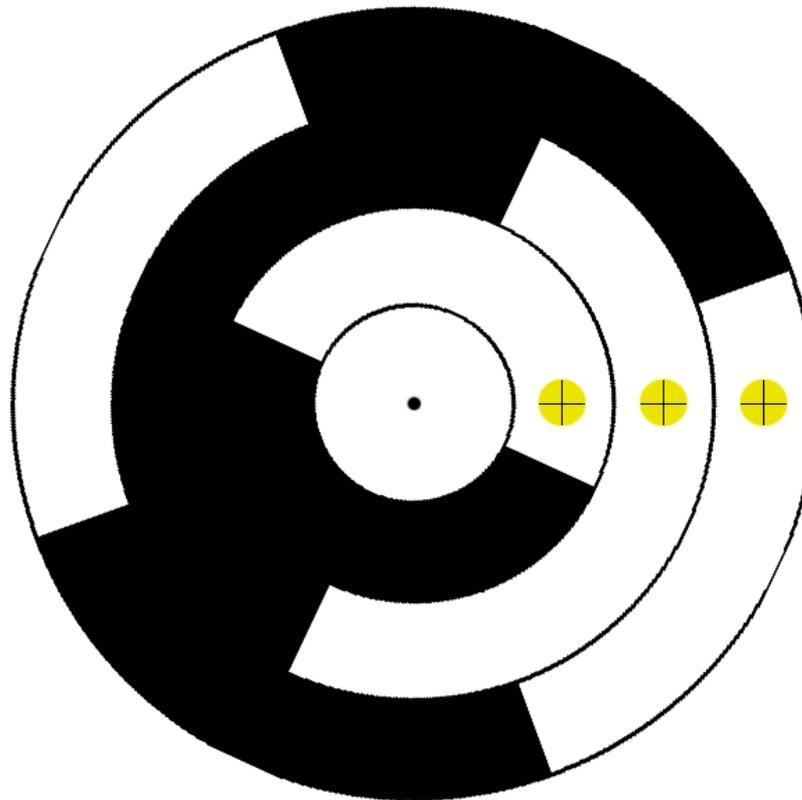
- Funzionamento basato sull'effetto fotoelettrico
- Encoder INCREMENTALI (metodo di misura incrementale) ed encoder ASSOLUTI (metodo di misura assoluto)
- Gli encoder incrementali possono essere utilizzati come sensori di posizione assoluta una volta effettuata un'operazione di inizializzazione
- Rispetto agli encoder incrementali, gli encoder assoluti sono
 - meno accurati
 - più costosi data la loro maggiore complessità

Sensori di spostamento 11/12

Encoder incrementale – Sensore di spostamento lineare

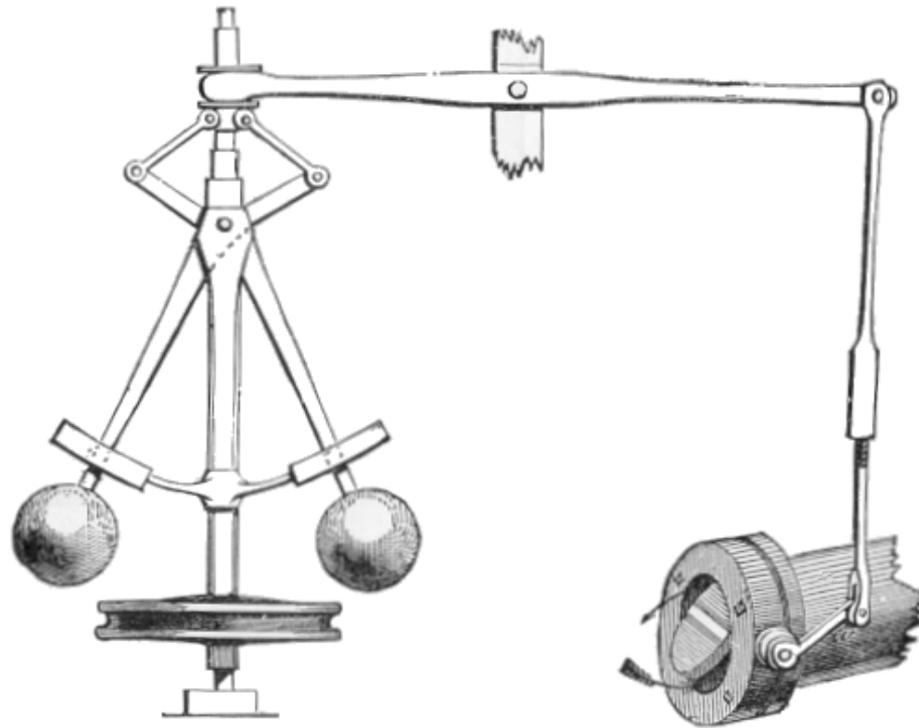


Sensori di spostamento 12/12 Encoder assoluti – Codifica in codice Gray



Sensori di velocità 1/6 Fly-ball governor (Watt 1788)

Trasduce una variazione di velocità in uno spostamento lineare

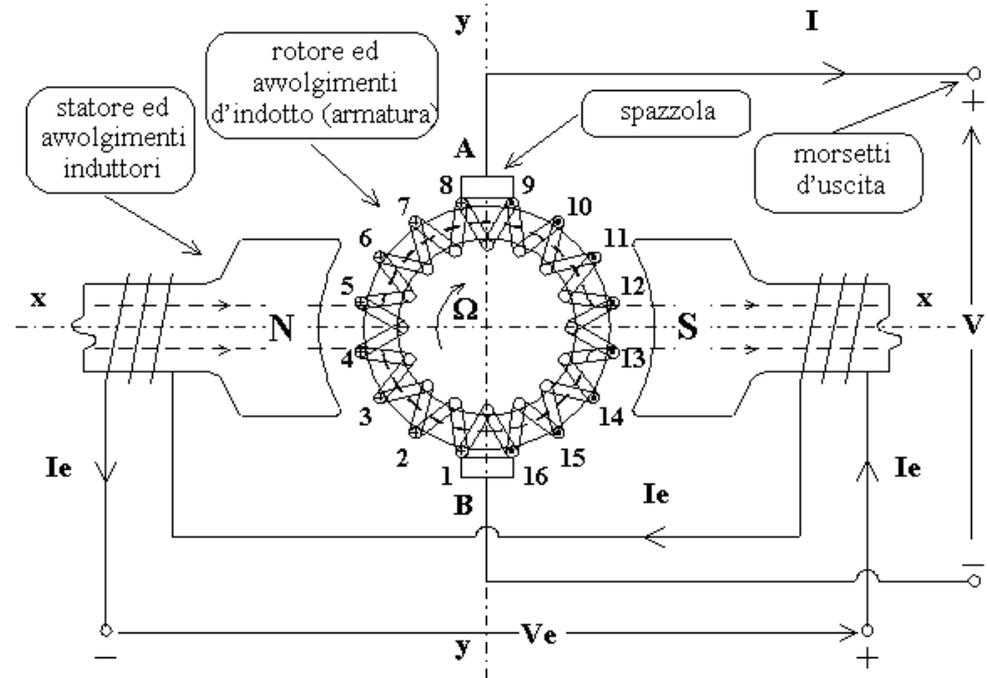


Sensori di velocità 2/6 Dinamo tachimetrica

- Motore in c.c. usato come generatore

$$V = K_t \Omega_{rpm}$$

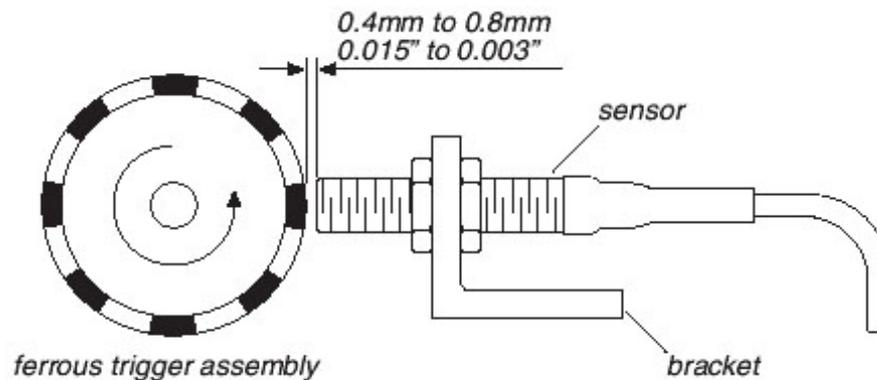
- Analogamente si possono utilizzare alternatori (generatori a.c.) + ponti raddrizzatori



Sensori di velocità 3/6

Convertitori velocità angolare/frequenza

- Principio di funzionamento basato sulla legge di Faraday
- La frequenza del segnale generato è proporzionale alla velocità angolare
- L'ampiezza e la «forma» della tensione d'uscita dipendono dalle caratteristiche geometriche della ruota
- Il segnale generato può essere convertito con un convertitore F/V



Sensori di velocità 4/6 Convertitori F/V

La tensione d'uscita è proporzionale alla corrente filtrata da un filtro passa-basso:

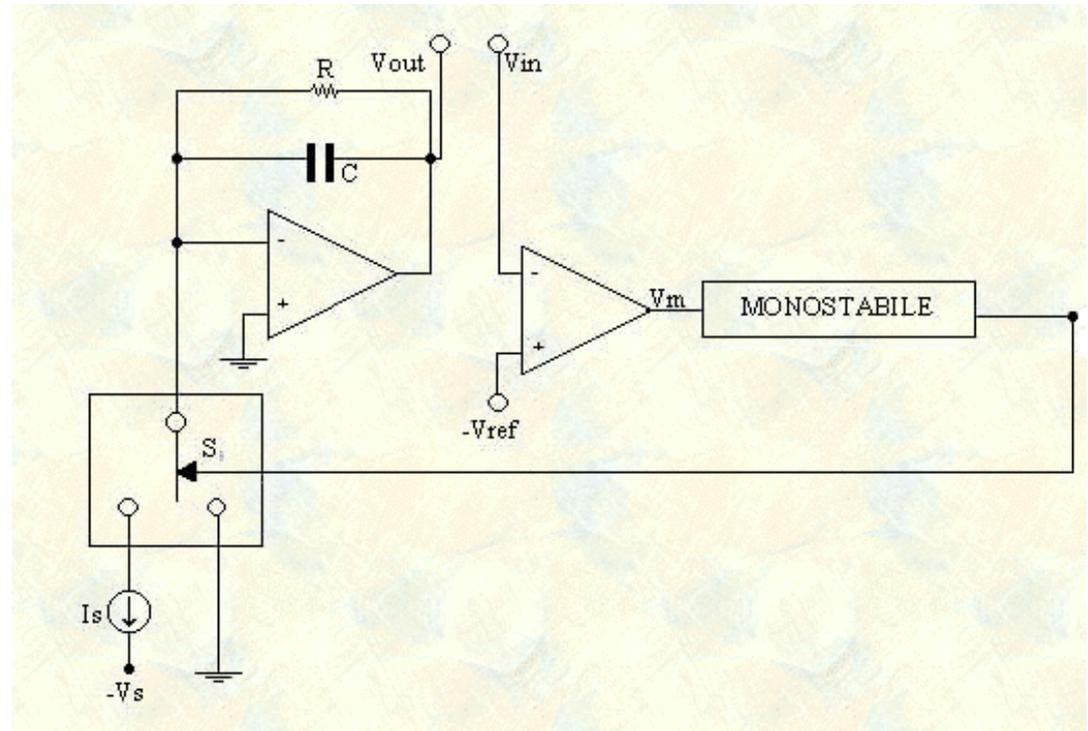
$$V_{out}(s) = \frac{R}{1 + sRC} I(s)$$

Scegliendo in maniera opportuna R e C si ha che:

$$V_{out} = R \cdot \bar{I}$$

con:

$$\bar{I} = I_s \cdot t_w \cdot f_{in}$$



Sensori di velocità 5/6

Segnale di velocità dagli encoder

- Utilizzo di convertitori F/V:
 - può causare problemi a velocità basse
- Conteggio degli impulsi in un intervallo di tempo fissato:
 - la sensibilità al rumore aumenta alle basse velocità
 - a basse velocità il tempo di campionamento aumenta

Sensori di velocità 6/6

Derivata numerica a partire da misure di posizione

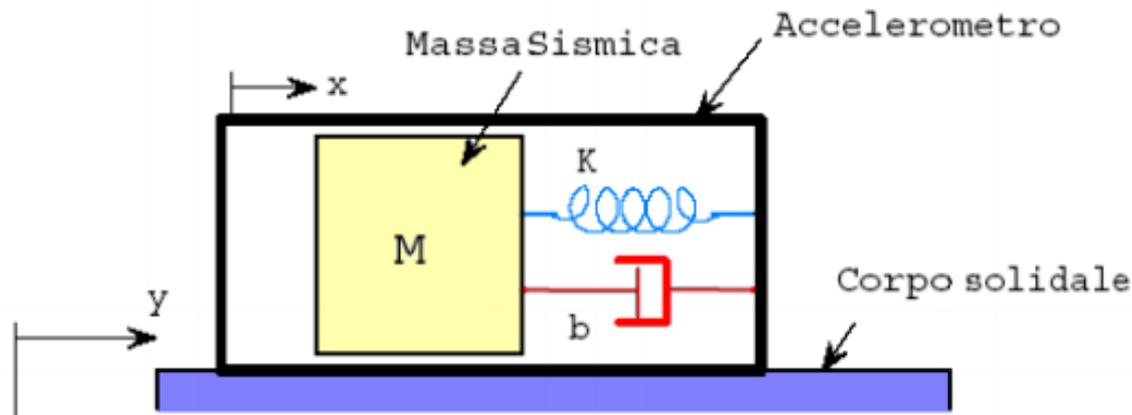
- La velocità può anche essere calcolata numericamente ogni qual volta è presente un sensore di posizione (spostamento)
- La derivata numerica viene solitamente effettuata dal dispositivo di controllo
- **Tipicamente la derivata numerica amplifica il rumore**
- **Per mitigare l'effetto di amplificazione del rumore si può pensare di filtrare o mediare il risultato peggiorando le prestazioni dinamiche del sistema di misura**
- La quantizzazione della misura di posizione può causare notevoli errori di calcolo della velocità, soprattutto a basse velocità

Sensori di accelerazione 1/2

Accelerometri a massa sismica

Trasduce una variazione di accelerazione in uno spostamento lineare

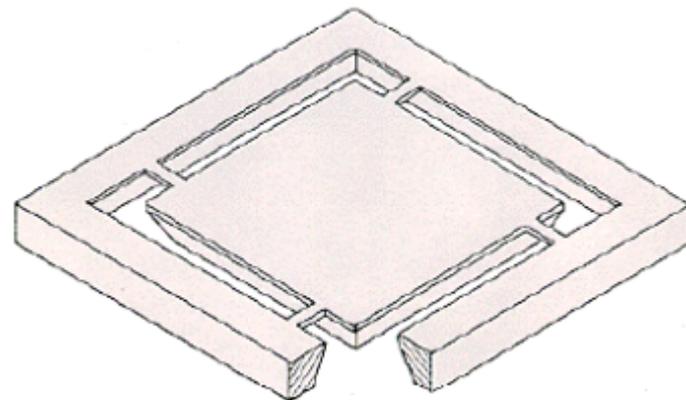
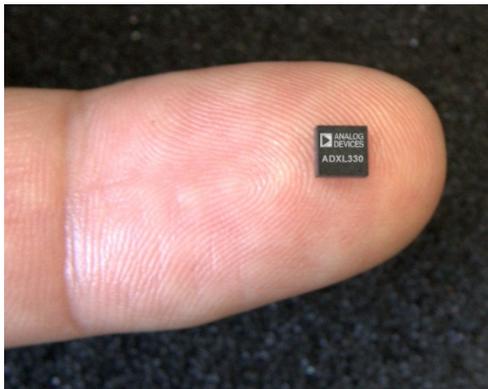
$$-X(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{M}s + \frac{K}{M}} \ddot{Y}(s)$$



Sensori di accelerazione 2/2

Accelerometri a semiconduttore (MEMS)

- I Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) sono realizzati su scala micrometrica con tecnologia a semiconduttore
- Sfruttano le capacità di miniaturizzazione del silicio che permette di realizzare una massa sismica connessa tramite barre di sospensione ad un supporto dello stesso materiale
- Vengono utilizzati anche come rilevatori di vibrazioni



Sensori di prossimità

- Forniscono un'informazione binaria sulla presenza o meno di un oggetto nel loro campo d'azione
- Sono sensori binari (ON/OFF)
- Si basano su vari principi di funzionamento
 - interruttori meccanici (con contatto fisico, problema dell'usura)
 - sensori magnetici, fotoelettrici, induttivi, capacitivi (senza contatto fisico)
- Sono molto utilizzati nelle linee automatizzate come sensori di presenza e fine-corsa

Sensori di prossimità induttivi 1/2

- Sono utilizzati per la rilevazioni di parti metalliche
- Consistono in una bobina con nucleo ferromagnetico, un circuito oscillatore ed un interruttore a stato solido
- L'ampiezza del campo magnetico generato dall'oscillatore nella bobina diminuisce a causa delle perdite in un oggetto metallico presente nel campo d'azione. Tale diminuzione viene utilizzata per azionare l'interruttore
- Possono avere distanze d'intervento diverse in avvicinamento e allontanamento a causa dell'isteresi magnetica

Sensori di prossimità induttivi 2/2

Le caratteristiche dei sensori di prossimità induttivi (distanze di intervento, frequenza massima di operazione,...) sono normalmente riferite ad un **intercettore normalizzato**



Sensori di prossimità capacitivi

- Principio di funzionamento simile ai sensori induttivi
- Tipicamente rilevano la presenza di materiali con costante dielettrica relativa maggiore di 1.2
- Possono rilevare
 - la presenza di oggetti all'interno di contenitori
 - il passaggio di un fluido in una condotta



Sensori di prossimità fotoelettrici

- Usano un fascio luminoso per rilevare la presenza di oggetti che lo bloccano o lo riflettono
- Sono costituiti da un emettitore di luce (led o a infrarosso) e da un ricevitore
- Il fascio luminoso può essere modulato in modo da incrementare l'immunità ai rumori rigettando il ricevitore luce non modulata



Indice Letture

Materiali di studio

- ❑ Paragrafi 3.1, 3.2, 3.7 e 3.8 da Magnani-Ferretti-Rocco
- ❑ Appendice B da Magnani-Ferretti-Rocco (B.1, B.2 e B3)

Fonti in rete

- ❑ [National Instruments Developer Zone](#)
- ❑ [Heidenhain](#)
- ❑ [Sensor Tips \(Online magazine\)](#)
- ❑ [Aziende produttrici di sensori di posizione](#)
- ❑ [Jacob Fraden – Handbook of Modern Sensors](#)