



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Sensori per l'automazione

Automazione

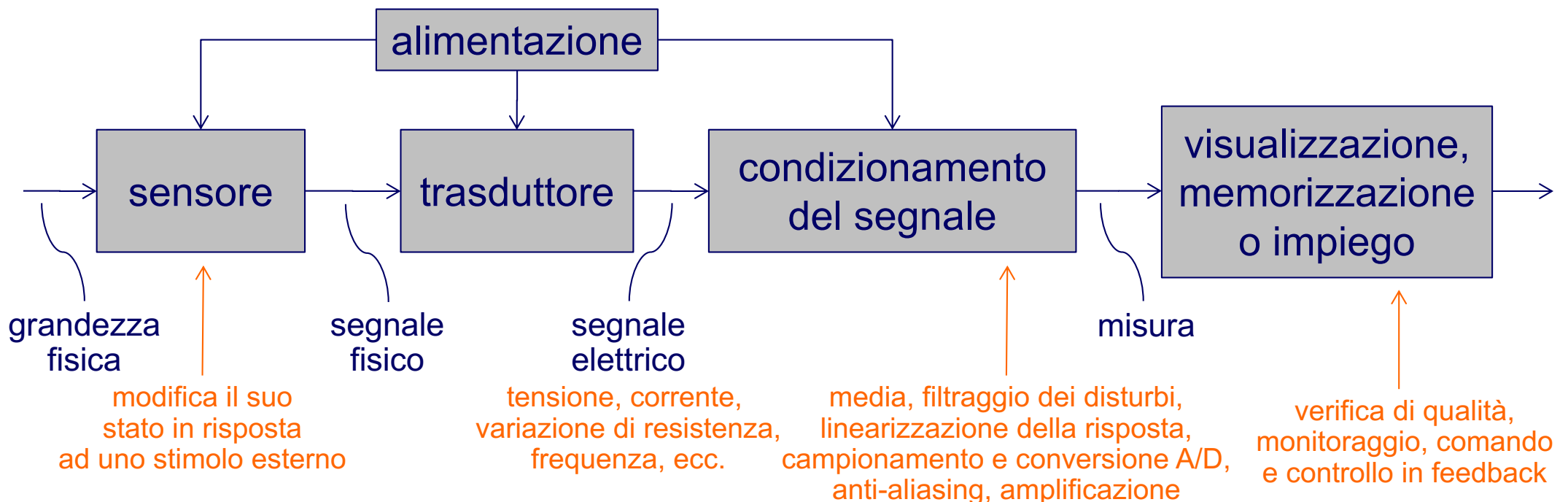
Alessandro De Luca

i **sensori** sono sensibili a **grandezze fisiche** e le convertono in segnali (elettrici, meccanici, pneumatici o idraulici); i relativi **trasduttori** li trasformano in segnali elettrici utili per elaborare il contenuto informativo

- unità e denominazioni soggetti a standard (International System of Units = **SI**)



la **catena di misura** è una successione ininterrotta di strumenti e procedure collegati in modo da poter acquisire ed elaborare il segnale in ingresso (la grandezza fisica da misurare) fino all'ottenimento della lettura in uscita (la misura vera e propria)



accuratezza

accordo dei valori misurati con un valore di riferimento standard (“ground truth” o caratteristica ideale)

precisione (o ripetibilità)

capacità di riprodurre in uscita valori misurati simili in campagne di misura consecutive della stessa quantità costante in ingresso

stabilità

capacità di mantenere le stesse caratteristiche di misura nel tempo o, ad es., in un campo operativo di temperature (simile alla precisione, ma nel lungo periodo)

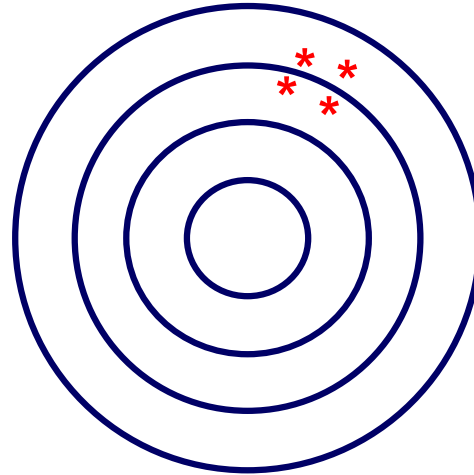
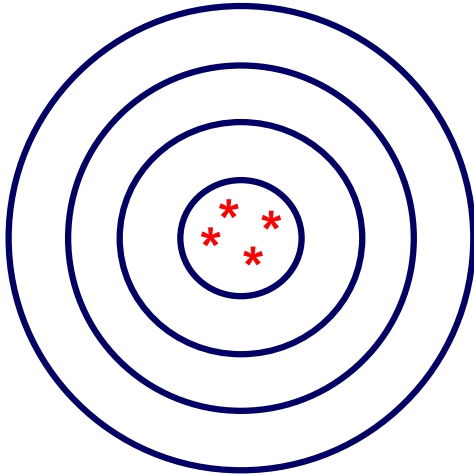
Accuratezza e Precisione

ACCURATEZZA

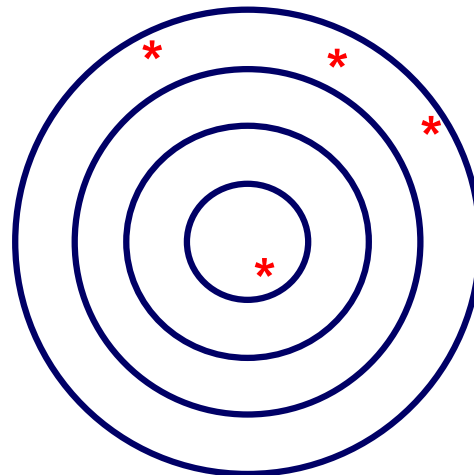
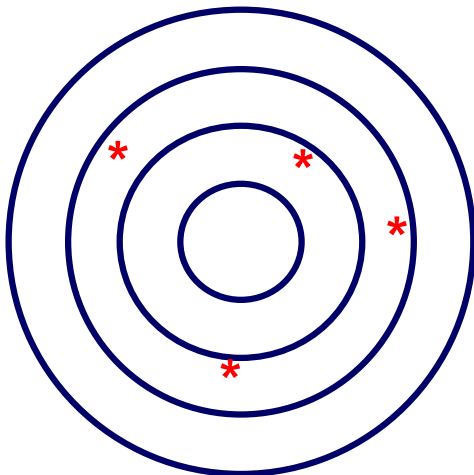
elevata

scarsa

elevata

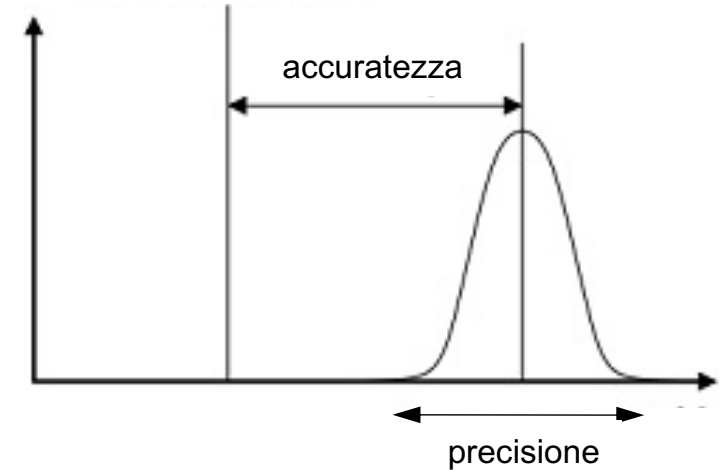


scarsa



in termini di
distribuzione di probabilità
delle misurazioni

valore di
riferimento
(ground truth)



precisione = **repeatability**
accuratezza = **accuracy**

curva di calibrazione

estrapolazione di un legame funzionale dai valori misurati tramite un modello matematico con parametri da tarare (*curve fitting*)

sensibilità

variazione del valore dell'uscita di misura per unità di variazione del segnale di ingresso (*guadagno* del sensore)

risposta in frequenza

dinamica del trasduttore (con eventuale ritardo di risposta) e campo di frequenze di misura, dalla continua (o meno) fino ad una massima componente frequenziale rilevabile (*banda di misura*)

rumorosità

SNR (rapporto segnale/rumore) e natura del rumore: additivo, bianco (indipendenza dei campioni) o colorato, ...

Curve tipiche di calibrazione

$$y = kx + h$$

lineare

$$y = h \exp(kx)$$

esponenziale

$$y = k \log(x) + h$$

logaritmica

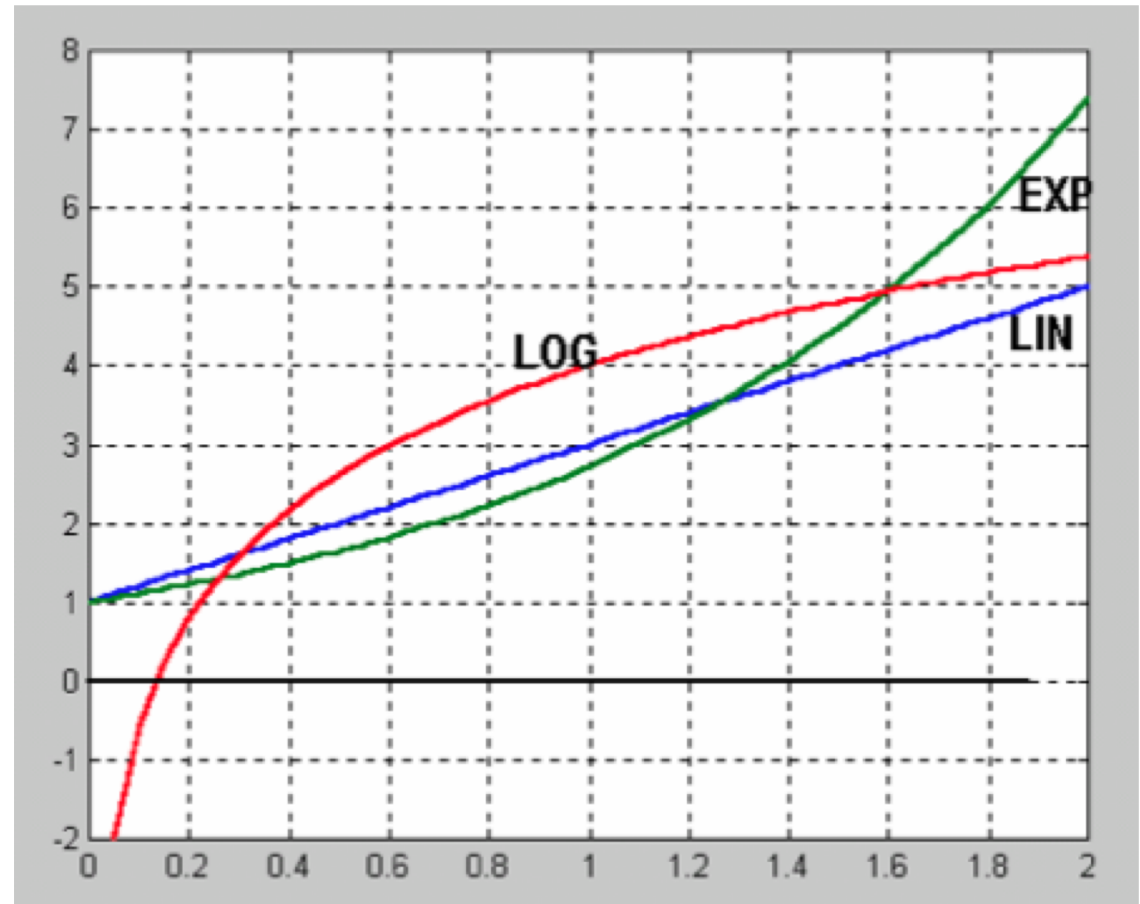
$$y = kx^h$$

quadratica,
cubica, ecc.

$$y = k\sqrt{x} + h$$

altre forme...
(senza nomi)

$$y = \frac{1}{kx + h}$$

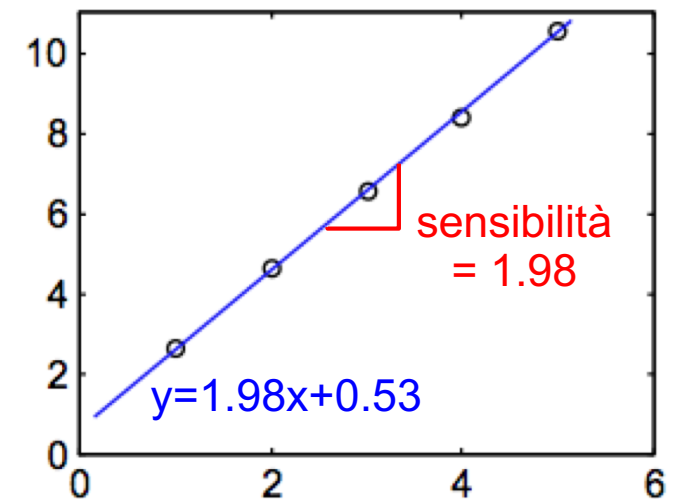
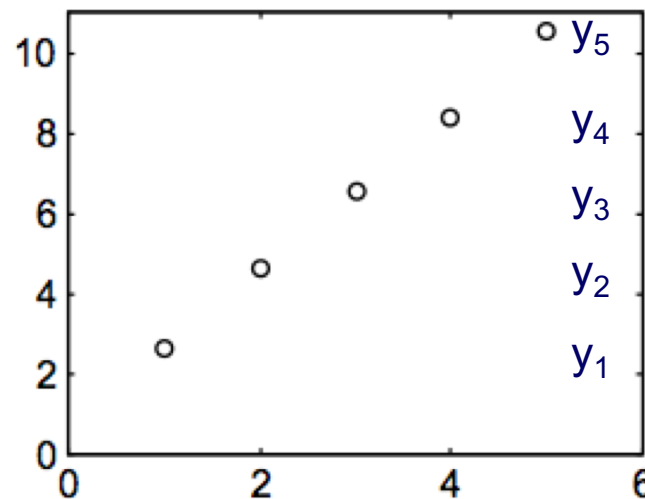
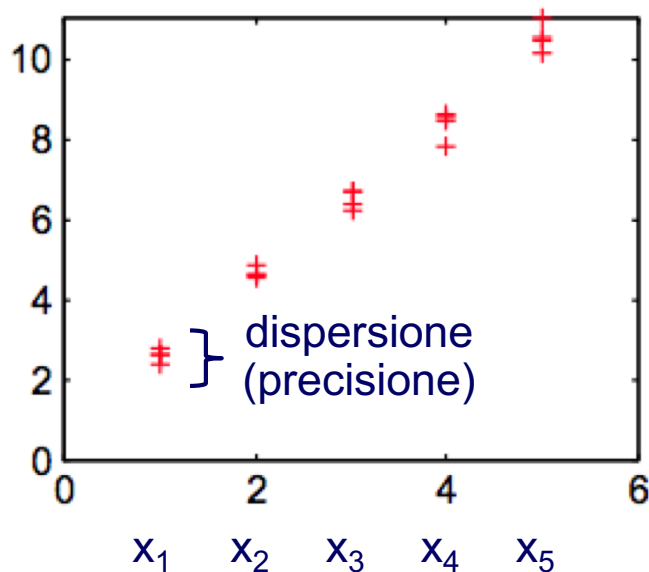


in genere, modelli con pochi parametri (solo 1 o 2)
per evitare una sovra-parametrizzazione (overfitting)

Calibrazione del sensore/trasduttore

operazioni da svolgere

1. applicare una serie di campioni x_i e registrare l'uscita
2. ripetere più volte la misura per ogni campione
3. fare la media delle letture per ogni campione $\Rightarrow y_i$
4. scegliere una curva di calibrazione in una data classe (lineare, logaritmica, ...)
5. determinare i parametri con un metodo di curve fitting



errore di **linearità** (nel modello lineare)

massimo scostamento dell'uscita misurata dalla retta che approssima al meglio le caratteristiche reali del sensore

- espresso in % del campo dei valori (di misura) in uscita

errore di **offset**

valore dell'uscita di misura quando l'ingresso è nullo

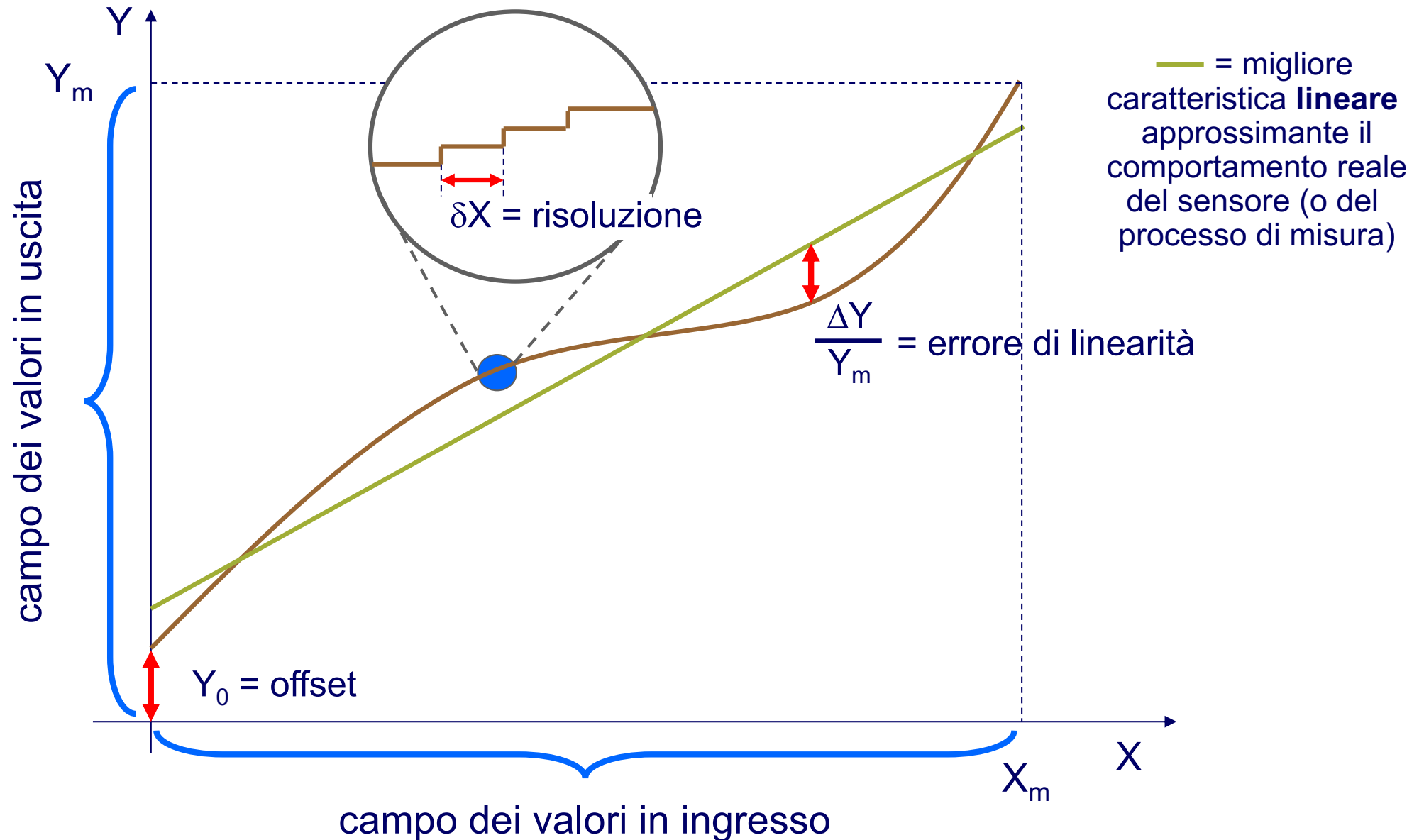
- a volte $\neq 0$ dopo qualche ciclo operativo, a causa di fenomeni di **isteresi**

risoluzione

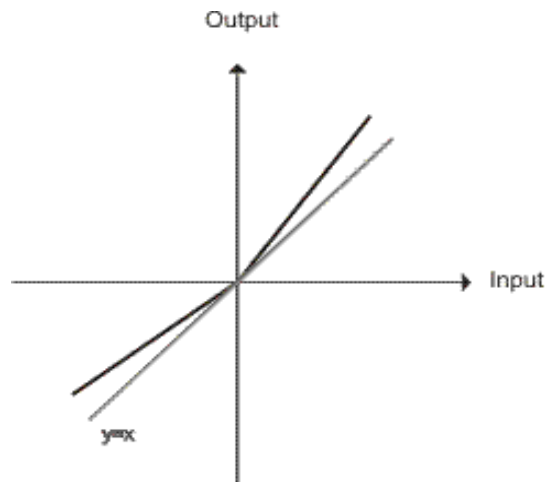
massima variazione della grandezza in ingresso che non produce variazione nell'uscita di misura

- espressa in termini assoluti o in % del campo dei valori in ingresso

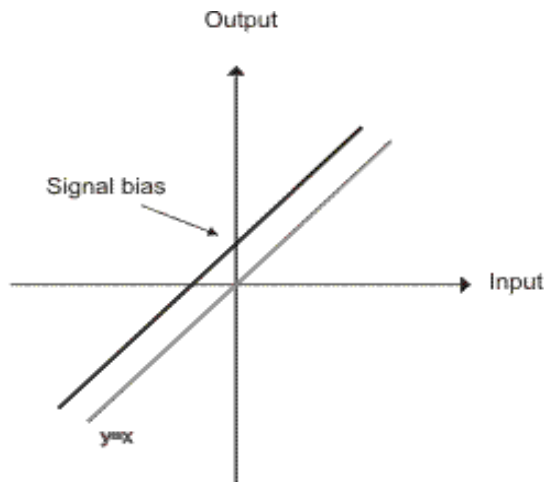
Linearità, offset e risoluzione



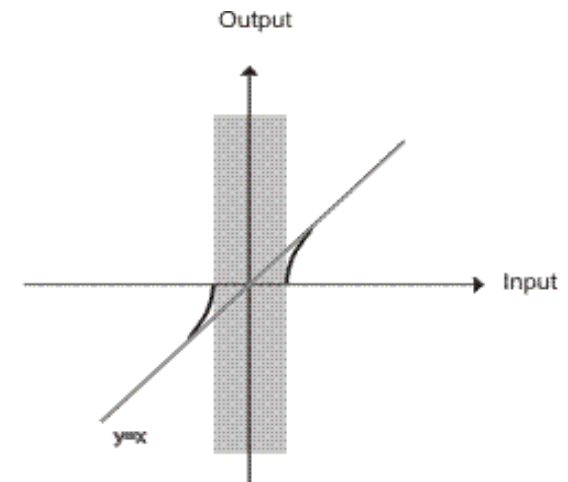
Non idealità nelle misure



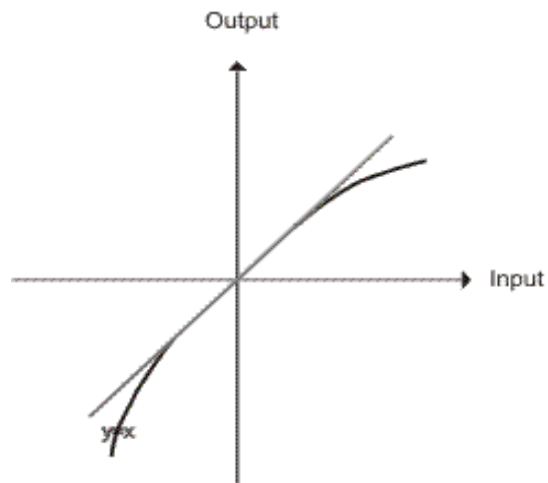
Asimmetria



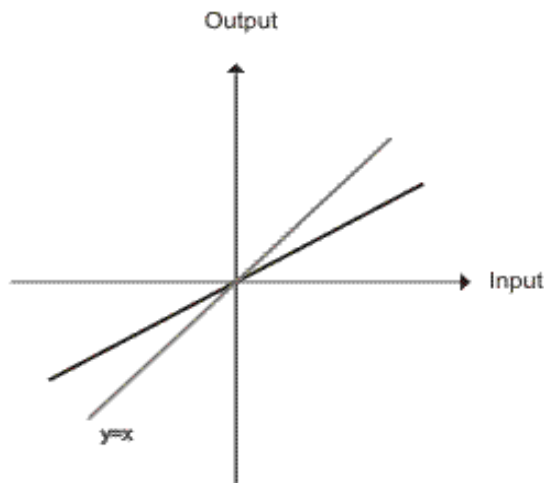
Polarizzazione (bias)



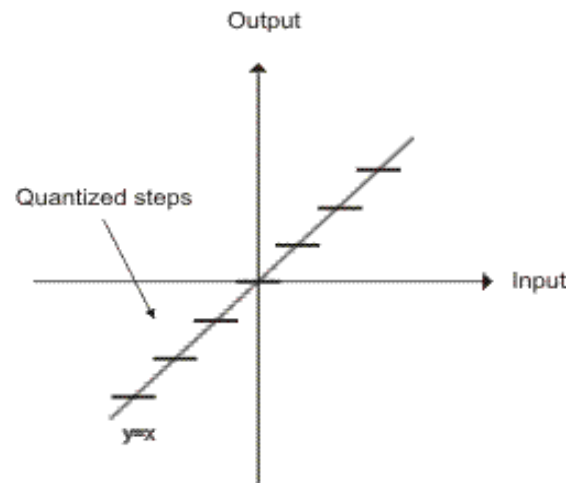
Zona morta (dead zone)



Non linearità



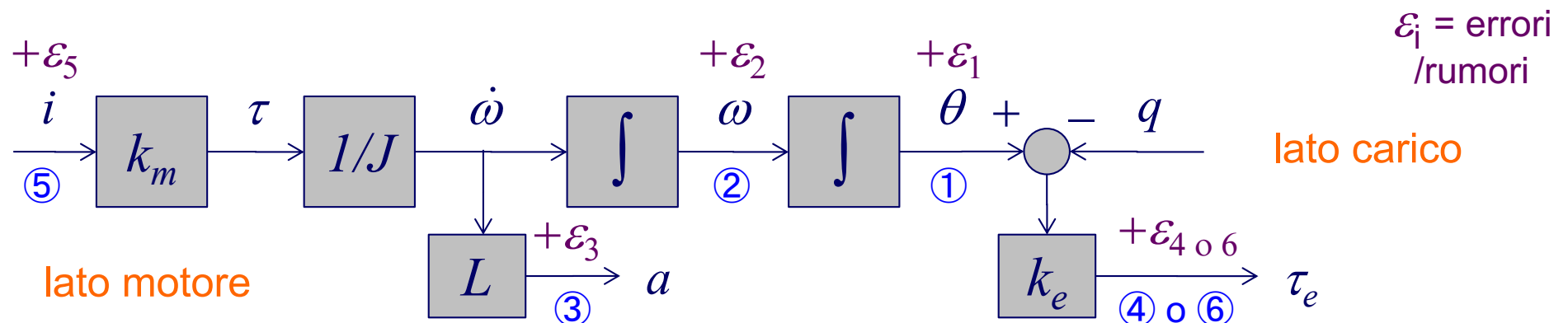
Fattore di scala
(deriva di sensibilità)



Quantizzazione

Sensori per la movimentazione controllata

- su grandezze “meccaniche” di tutta la catena cinematica/dinamica
- utilizzati per chiudere diversi anelli di controllo a retroazione
- legami integrali/proporzionali tra loro, ma con tecnologie diverse
 - sensori di **posizione** ① (lineare o angolare)
 - sensori di **velocità** ② (con misura diretta o derivata)
 - sensori di **accelerazione** ③ (per lo più, solo lineare)
 - sensori di **coppia torcente** ④ (sugli elementi di trasmissione del moto)
 - sensori (o sonde) di **corrente** ⑤ (\propto alla coppia del motore)
 - sensori (o celle) di **carico** ⑥ (mono o multi-direzionali)



Sensori di posizione

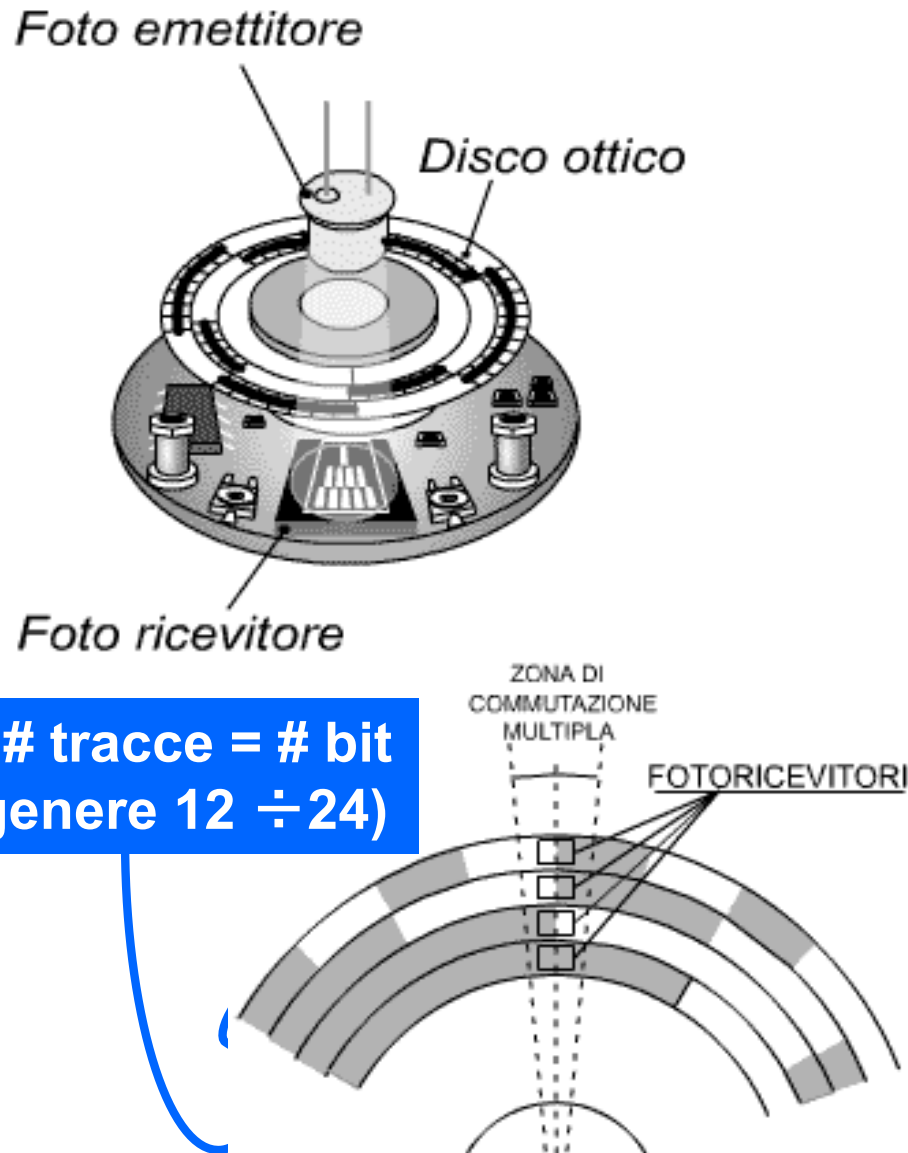
generano un **segnale elettrico proporzionale allo spostamento** (angolare o lineare) di una parte meccanica rispetto ad una posizione di riferimento

spostamenti **lineari**: potenziometri, trasduttori di spostamento induttivi (LVDT), inductosyn

spostamenti **angolari**: potenziometri, inclinometri, resolver, syncro, RVDT (tutti dispositivi analogici che necessitano di conversione A/D), **encoder** (digitali)

i più usati in automazione, dove anche gli spostamenti lineari sono realizzati con motori in rotazione e opportune trasmissioni

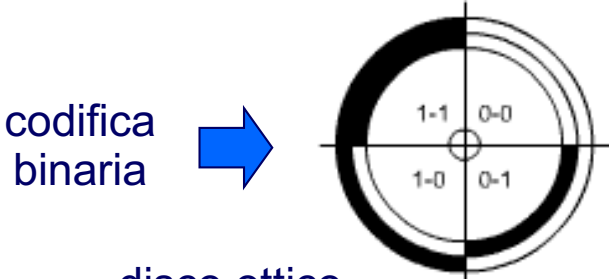




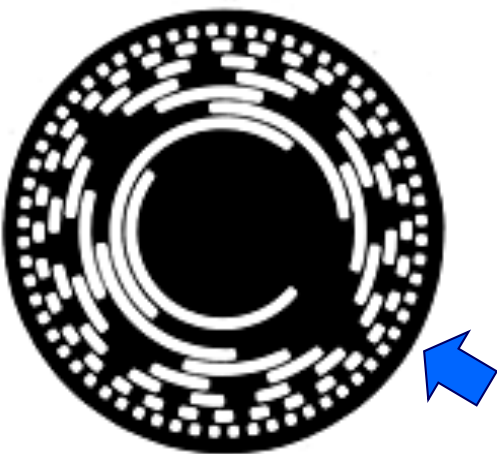
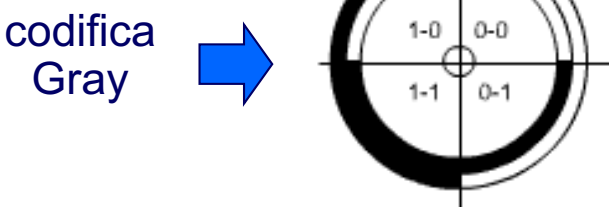
$N_t = \# \text{ tracce} = \# \text{ bit}$
(in genere 12 ÷ 24)

- un disco ottico rotante, con settori opachi e trasparenti che si alternano su ognuna delle tracce multiple e concentriche
- dei led emettono (nel campo infrarosso) fasci di luce raccolti poi da foto-ricevitori
- gli impulsi luminosi sono convertiti in impulsi elettrici, processati dall'elettronica del sensore e trasmessi in uscita
- **risoluzione = $360^\circ / 2^{N_t}$** ($N_t = \text{min } 4, \text{max } 32$)
- è necessaria una opportuna codifica digitale della posizione angolare **assoluta** quando il disco ottico ruota velocemente, l'uso di una **codifica binaria** potrebbe dare (grandi) errori di lettura, in corrispondenza a transizioni multiple di bit nel codice ("alee")

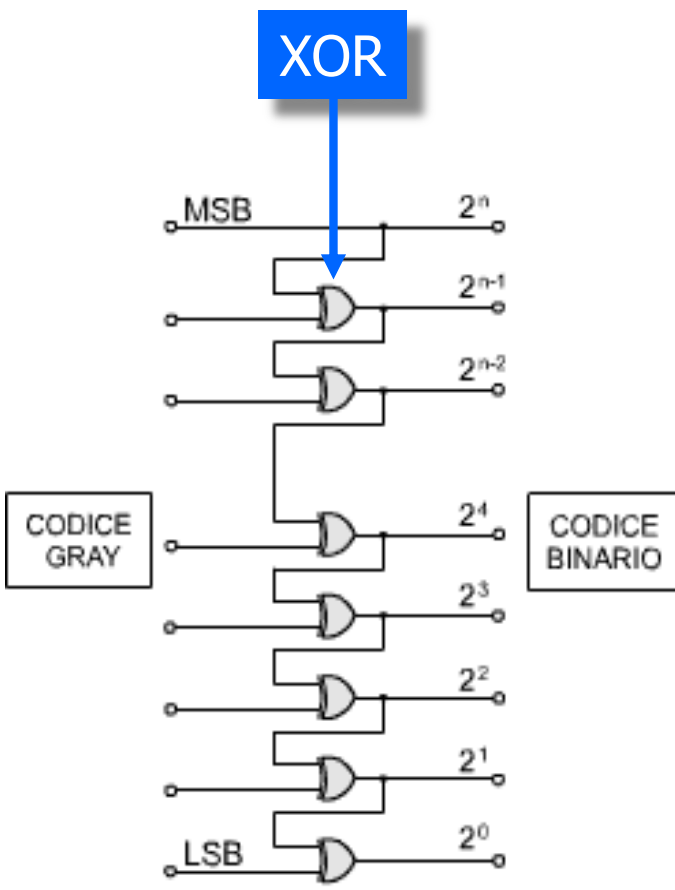
Codifica assoluta



disco ottico con 2 bit



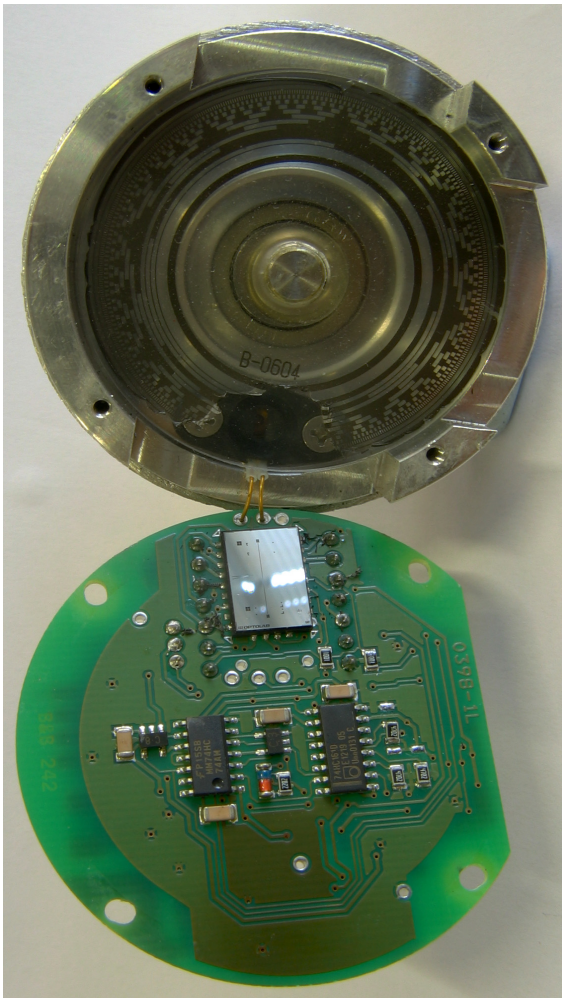
encoder assoluto a 8 bit con codifica Gray



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

le codifiche di zone adiacenti differiscono per un solo bit

Uso degli encoder assoluti



vista interna di un encoder assoluto
a 13 bit: disco ottico con
codifica Gray e relativa elettronica

- pronti per la misura già all'avvio (“no homing”)
- due modalità operative per l'uso continuato
 - quando si spegne il servomotore, i parametri di posizione sono salvati in una memoria flash (e si attiva un freno)
 - è presente una batteria sempre attiva e l'encoder misura la posizione anche a servomotore spento
 - durata dati in memoria tampone > 20 anni
- versioni **single-turn** o **multi-turn**, ad es.
 - single-turn a 13 bit con $2^{13} = 8192$ tacche/giro (risoluzione = 0.044°)
 - multi-turn a 29 bit con 8192 tacche/giro + conteggio fino a $2^{16} = 65536$ giri
- corpo in alluminio con interfaccia disponibile per molteplici sistemi fieldbus (CANopen o PROFIBUS)
- alimentazione tipica 5/28V DC @1.2 W



ad albero cavo



con flangia

Encoder incrementali

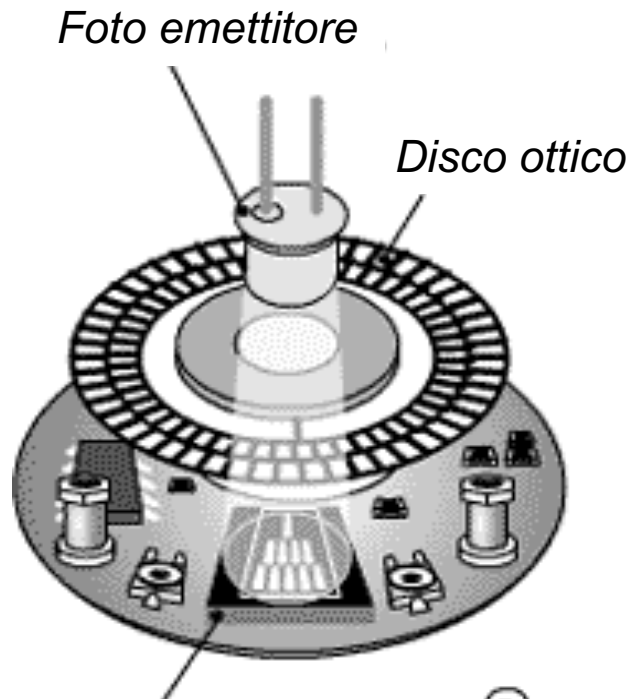
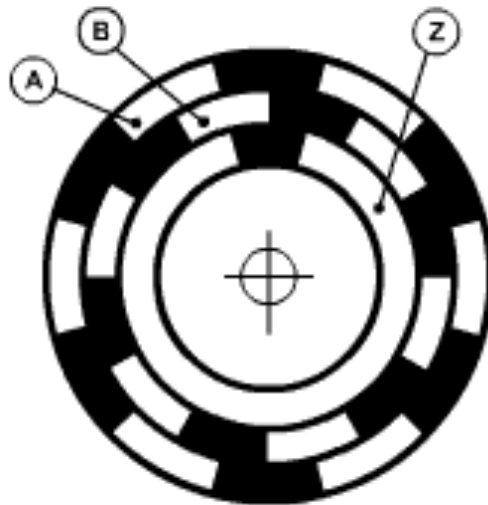


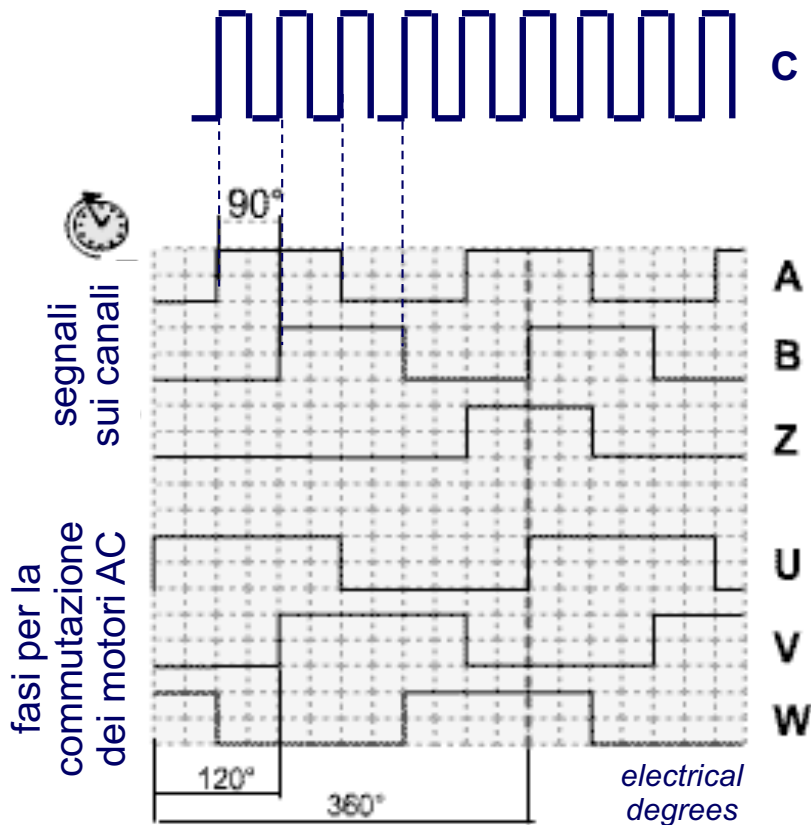
Foto ricevitore

Le tre tracce
sul disco ottico
(qui $N_e = 6$)

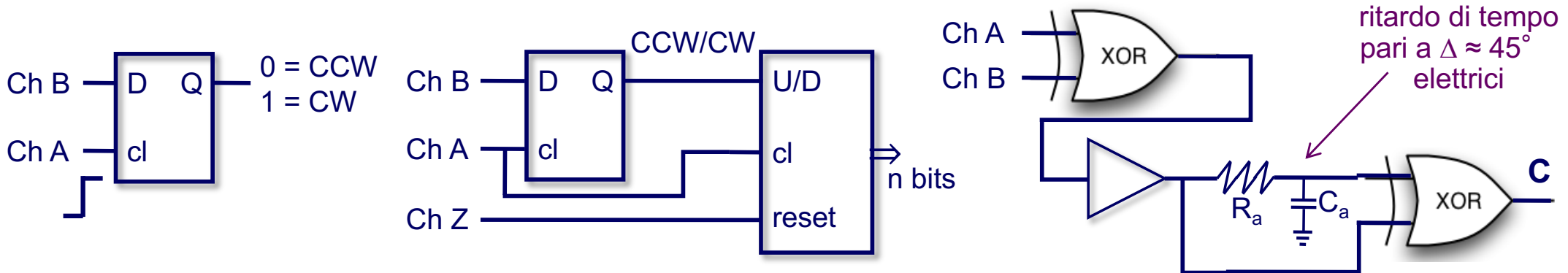


- disco ottico rotante con tre tracce, su cui si alternano aree trasparenti e opache: si misurano **incrementi** di spostamento angolare **contando** treni di impulsi (“tacche”), N_e per un giro ($N_e = 100 \div 5000$)
- le due tracce A e B (**canali**) sono in quadratura (sfasamento di 90° elettrici), in modo da permettere il riconoscimento del verso di rotazione
- la terza traccia Z serve a definire la posizione di riferimento “0”, che resetta il conteggio (**serve un “homing” all’avvio**)
- alcuni encoder forniscono in uscita anche le tre fasi (a 120°) utili per il circuito di commutazione dei motori brushless

Elaborazione del segnale

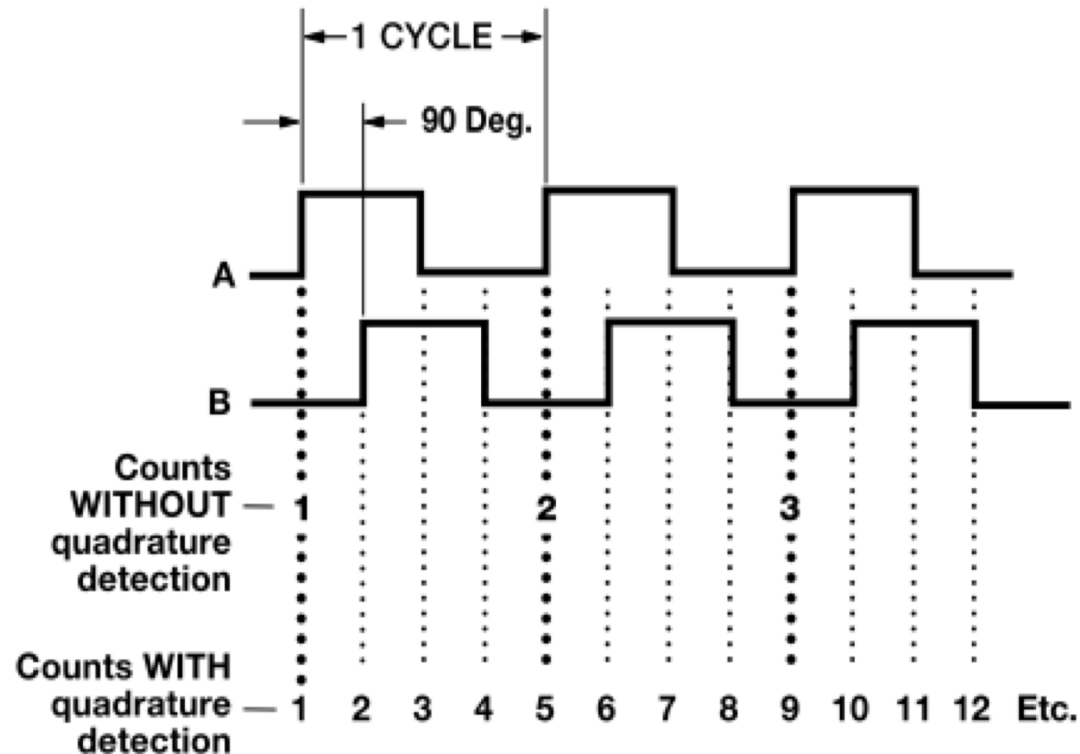


- le “frazioni di ciclo” di ogni treno di impulsi sono misurate in “gradi elettrici”
- $1^\circ \text{ elettrico} = 1^\circ \text{ meccanico} / N_e$,
 $360^\circ \text{ meccanici} = 1 \text{ giro}$
- i segnali pilotano un **contatore** digitale, con un flip-flop di **tipo D** per riconoscere il verso + **reset**
- per **migliorare la risoluzione** ($4 \times$), si usano i fronti d’onda di salita e discesa dei segnali A e B
- sarà la sequenza di impulsi C a fornire il clock al contatore (Up = **incrementi** o Down = **decrementi**)



Moltiplicazione del conteggio

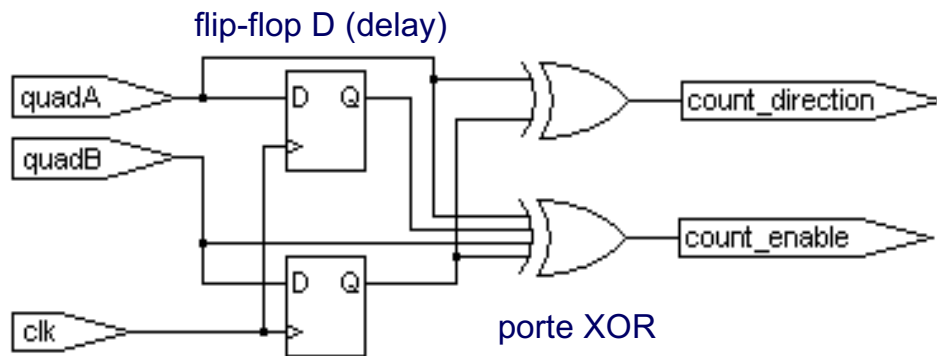
esempio di decodifica in quadratura



- un encoder incrementale con $N_e = 2000$ cicli (elettrici) fornisce un conteggio di $N = 8000$ impulsi/giro, a valle dell'elettronica di moltiplica
- la sua **risoluzione** finale (meccanica) è $360^\circ / 8000 = .045^\circ (= 0^\circ 2' 42'')$
- serve un contatore a 13 bit per coprire un angolo giro senza reset ($2^{13} = 8192$)

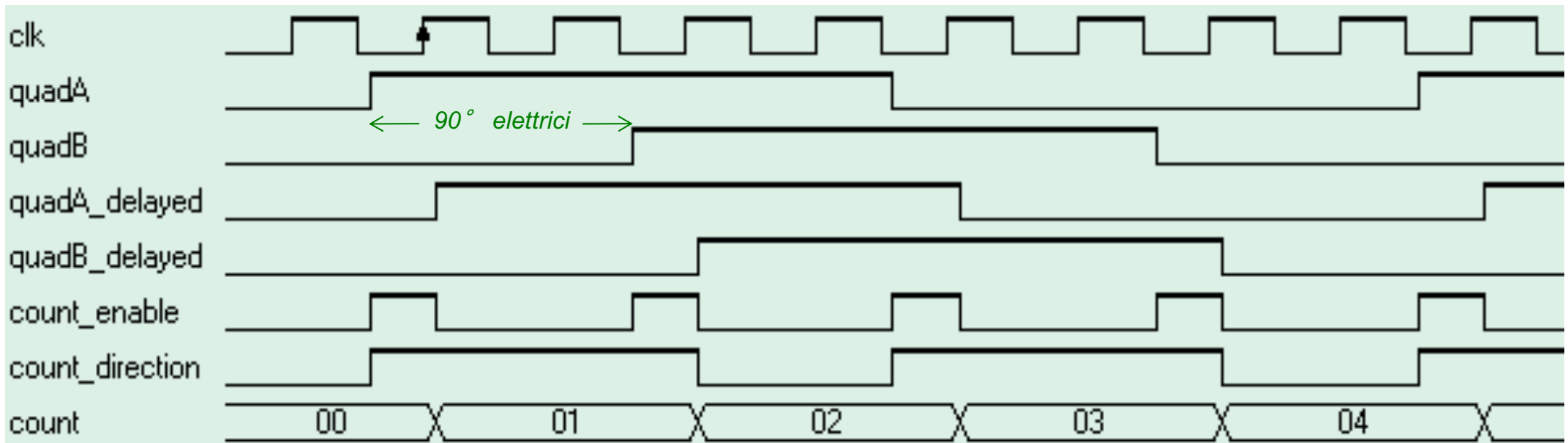
Decodifica in quadratura

un'implementazione più completa



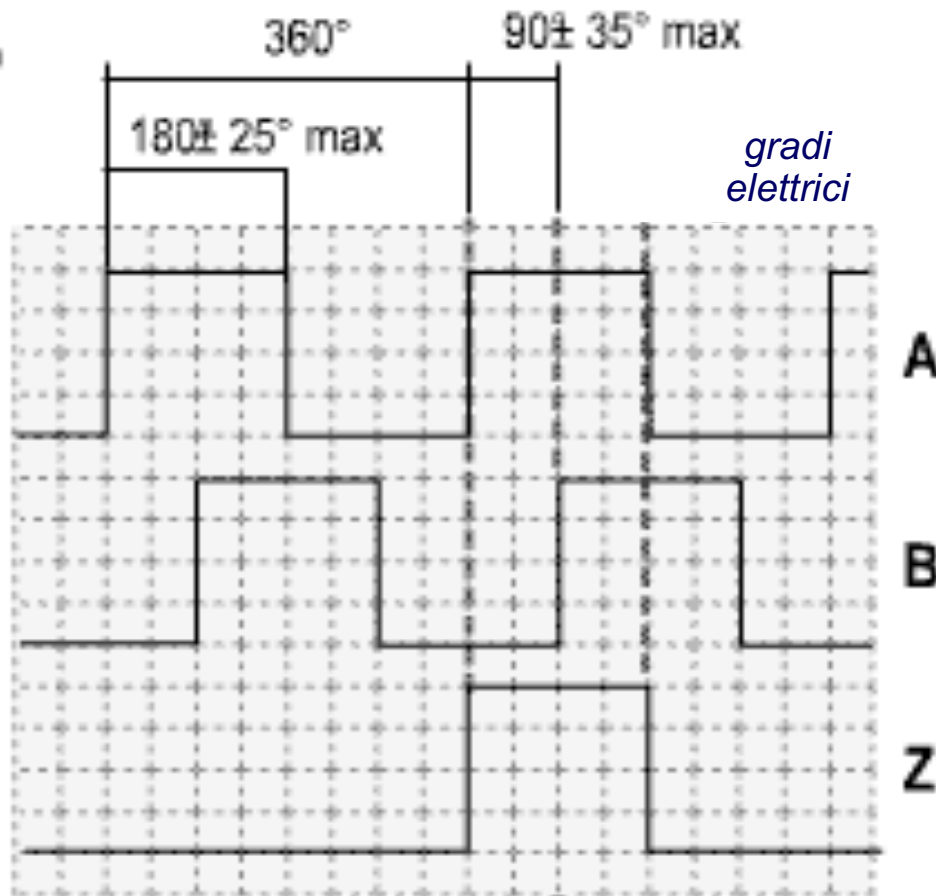
NOTA 1: poiché i segnali A e B potrebbero **non** essere sincronizzati al clock di sistema, si usano due flip-flop di tipo D aggiuntivi per ciascun ingresso in modo da evitare stati meta-stabili nel contatore

NOTA 2: logica XOR su quattro segnali in input: output è 1/ON quando un # dispari (1 o 3) di inputs è 1/ON



- si assume che sia **disponibile** un segnale di clock "clk" ad alta frequenza (fornito ad esempio da un FPGA), più veloce dei due segnali in quadratura A e B
- il conteggio digitale in uscita avrà una migliore **risoluzione** ("moltiplicata per 4")

Accuratezza negli encoder incrementali



... a parte gli errori di quantizzazione

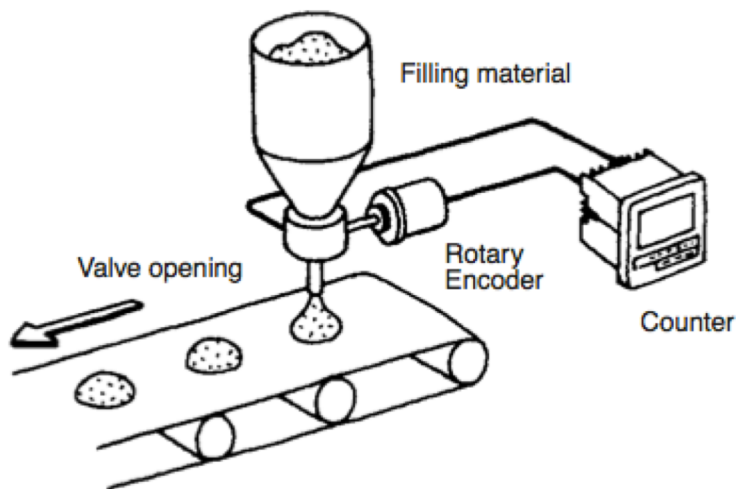
- **errore di divisione:** è il massimo ritardo tra due fronti d'onda (salita o discesa) consecutivi, in genere entro $\pm 25^\circ$ elettrici
- lo **sfasamento** tra i due canali, pari a 90° elettrici nominali, può di fatto variare in un campo di $\pm 35^\circ$ elettrici (**errore di quadratura**)

Esempio di encoder incrementale



- Omron Rotary Encoder (incrementale) serie E6B2-C
- risoluzione fino a 2000 impulsi/giro
- tensione di alimentazione da 5 a 24 V DC
- peso = 100 g, diametro = 0.4 cm
- inerzia = $1 \cdot 10^{-6}$ kg m²
- temperatura di funzionamento: -10 ÷ 70° C
- massima velocità ammessa: fino a 6000 giri/min

una possibile applicazione



Item	E6B2-CWZ6C	E6B2-CWZ5B	E6B2-CWZ3E
Power supply voltage	5 VDC -5% to 24 VDC +15%, Ripple (p-p): 5% max.	12 VDC -10% to 24 VDC +15%, Ripple (p-p): 5% max.	5 VDC -5% to 12 VDC +10%, Ripple (p-p): 5% max.
Current consumption (See note 1.)	70 mA max.	80 mA max.	
Resolution (pulses/rotation)	10/20/30/40/50/60/100/200/300/ 360/400/500/600/720/800/1,000/ 1,024/1,200/1,500/1,800/2,000 P/R	100/200/360/500/600/ 1,000/2,000 P/R	10/20/30/40/50/60/100/200/300/ 360/400/500/600/1,000/1,200/ 1,500/1,800/2,000 P/R
Output phases	A, B, and Z		
Output configuration	NPN open-collector output	PNP open-collector output	Voltage output (NPN output)
Output capacity	Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 35 mA)	Applied voltage: 30 VDC max. Source current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at source current of 35 mA)	Output resistance: 2 kΩ Sink current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 20 mA)
Max. response speed (See note 3.)	100 kHz	50 kHz	100 kHz
Phase difference on output	90°±45° between A and B (1/4T±1/8T)		
Rise and fall times of output	1 μs max. (Control output voltage: 5 V; load resistance: 1 kΩ; cable length: 2 m)	1 μs max. (Cable length: 2 m; source current: 10 mA max.)	1 μs max. (Cable length: 2 m; sink current: 10 mA max.)

Misura indiretta della velocità

derivata numerica a partire da misure campionate/digitali di **posizione**

□ realizzata **in linea** con formule di derivazione all'indietro

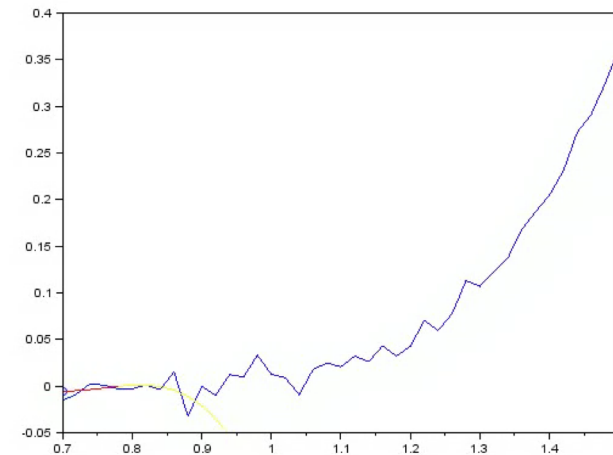
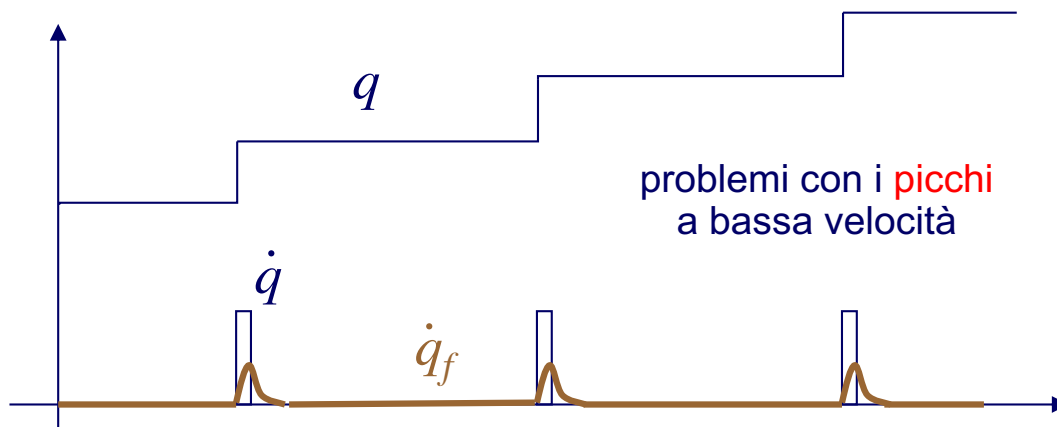
□ a 1 passo (metodo di Eulero): $\dot{q}_k = \dot{q}(kT) = \frac{1}{T}(q_k - q_{k-1}) \Leftrightarrow \dot{q}_k = \Delta q_k / T \Leftarrow$ direttamente da encoder incrementale

□ a 4 passi: $\dot{q}_k = \frac{1}{T} \left(\frac{25}{12} q_k - 4q_{k-1} + 3q_{k-2} - \frac{4}{3} q_{k-3} + \frac{1}{4} q_{k-4} \right)$

rumore e quantizzazione della posizione necessitano di un **filtraggio** per convoluzione

□ uso efficace di filtri **non causali** (ad es., di Savitzky-Golay), **ma** con introduzione di ritardo

filtro di **Kalman** per stima dello stato (è **ottimo** per sistemi lineari con rumori gaussiani a media nulla)



animazione di un filtro di Savitzky-Golay con polinomi cubici

Filtro di Kalman cinematico

per stima della velocità

modello a tempo discreto del moto e della misura usato per la stima

$$\xi(k) = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \xi(k-1) + \mu$$

$$z(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \xi(k) + \nu$$

misura di posizione rumorosa (uscita dell'encoder)

rumori gaussiani a media nulla con (co-)varianze Q (matrice) e R

T = passo di campionamento

$$\xi(k) = \begin{pmatrix} x(k) & \dot{x}(k) \end{pmatrix}^T$$

↑ stato attuale

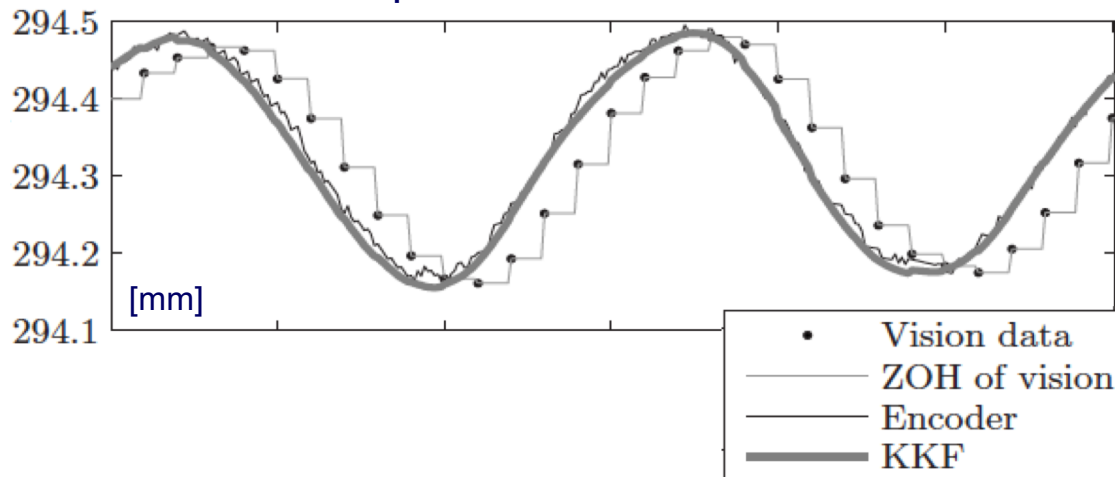
↓ velocità non misurata

filtro di Kalman (lineare) che fornisce una stima $\hat{\xi}(k)$ dello stato del modello

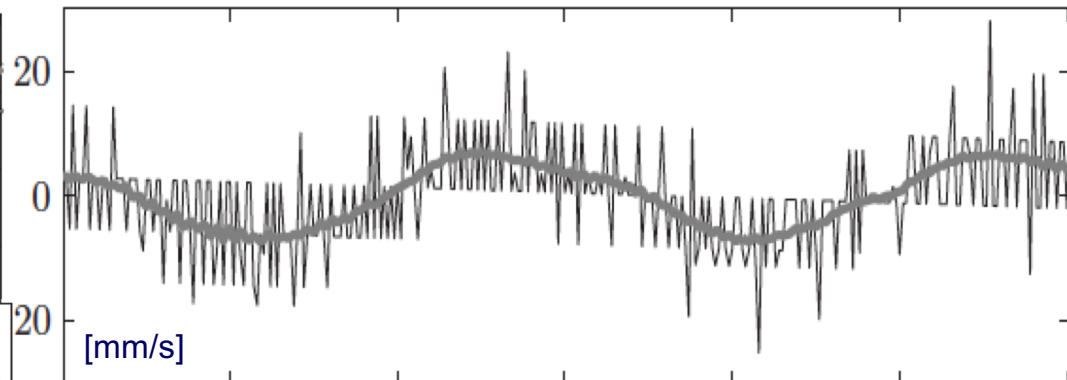
$$\hat{\xi}(k) = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{\xi}(k-1)}_{\text{predizione (a priori)}} + \underbrace{K_k \left(z(k) - \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{\xi}(k-1) \right)}_{\text{correzione (basata sull'uscita misurata)}}$$

usando il guadagno ottimo di Kalman K_k

misura di posizione e sua stima filtrata



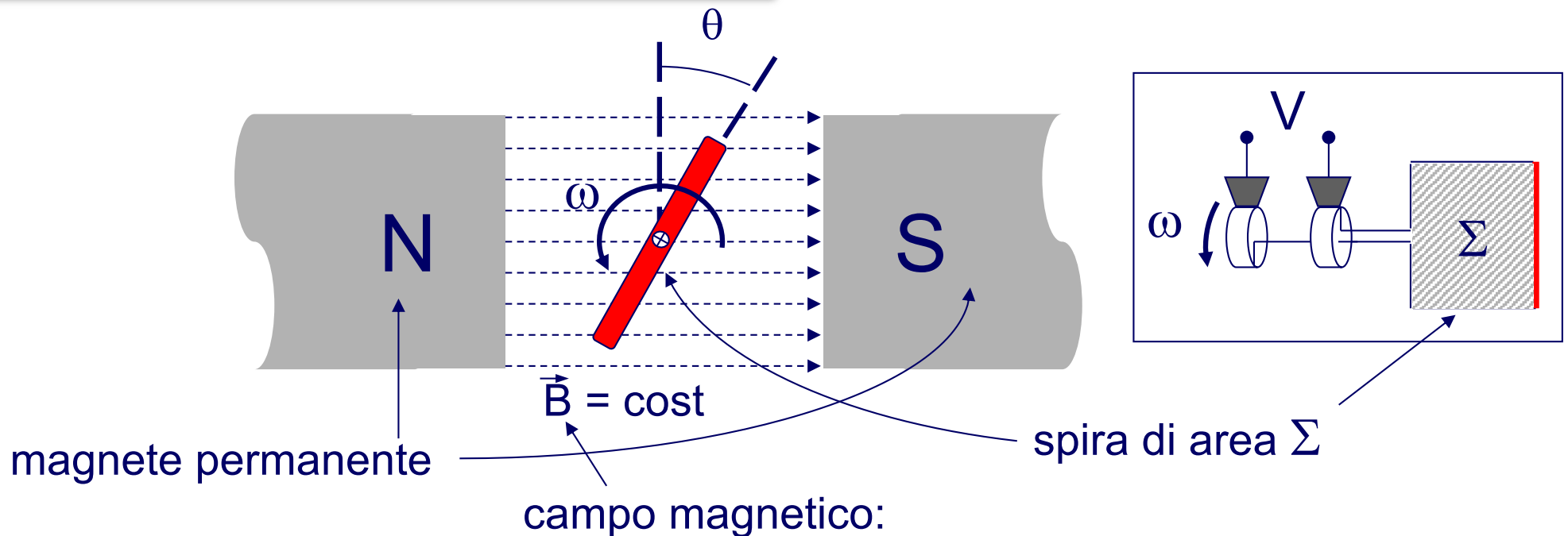
velocità per derivata numerica e sua stima filtrata



Dinamo tachimetrica

misura diretta della velocità
sempre montata su asse del motore

principio di funzionamento (singola spira)



il flusso attraverso la spira è $\Phi(\vec{B}) = |\vec{B}|\Sigma \cos \theta = |\vec{B}|\Sigma \cos \omega t$

$$V = - d\Phi/dt = |\vec{B}| \Sigma \omega \sin \omega t$$

l'ampiezza V è $\propto \omega$

...ma c'è anche la componente
sinusoidale a pulsazione ω di misura

⇒ per ridurre le oscillazioni (ripple),
si usano m spire ruotate in modo
regolare di $180^\circ / m$

Esempio di dinamo tachimetrica



- Servo-Tek DC Tach Generator (A & B series)
- bi-direzionale
- massima velocità: 8000 ÷ 12000 giri/min (RPM)
- tensione di uscita 1 ÷ 10 V (A), 11 ÷ 24 V (B)
- basso ripple: picco-picco < 3% del valore della continua (con un filtro a 72 KHz)
- peso = 85 ÷ 113 g, diametro = 2.9 cm
- errore di linearità < 0.1% (a qualsiasi velocità)
- stabilità 0.1% (rispetto alla temperatura)

Model Number	Mounting	Weight (Approx.)	Inertia (Approx.) oz-in-sec ²	V/1000 RPM	RPM (max)	Armature Resistance (dynamic)	Armature Inductance (henrys)	Outline Dimensions	Mounting Dimensions	Shaft Size (in.)
SA-740A-7	Face	3.0 oz	1.32 x 10 ⁻⁴	2.6v	12,000	40Ω	0.024h	Fig. 10	Fig. 1	.120
SB-740A-7	Flange	3.0 oz	1.32 x 10 ⁻⁴	2.6v	12,000	40Ω	0.024h	Fig. 10	Fig. 2	.120
SA-740A-2	Face	3.0 oz	1.32 x 10 ⁻⁴	7.0v	12,000	350Ω	0.18h	Fig. 10	Fig. 1	.120
SB-740A-2	Flange	3.0 oz	1.32 x 10 ⁻⁴	7.0v	12,000	350Ω	0.18h	Fig. 10	Fig. 2	.120
SA-757A-2	Face	3.0 oz	1.32 x 10 ⁻⁴	7.0v	12,000	350Ω	0.18h	Fig. 11	Fig. 1	.187
SB-757A-2	Flange	3.0 oz	1.32 x 10 ⁻⁴	7.0v	12,000	350Ω	0.18h	Fig. 11	Fig. 2	.187
SA-740B-1	Face	4.0 oz	2.27 x 10 ⁻⁴	20.8v	8,000	1000Ω	0.56h	Fig. 10	Fig. 1	.120
SB-740B-1	Flange	4.0 oz	2.27 x 10 ⁻⁴	20.8v	8,000	1000Ω	0.56h	Fig. 10	Fig. 2	.120
SA-757B-1	Face	4.0 oz	2.27 x 10 ⁻⁴	20.8v	8,000	1000Ω	0.56h	Fig. 11	Fig. 1	.187
SB-757B-1	Flange	4.0 oz	2.27 x 10 ⁻⁴	20.8v	8,000	1000Ω	0.56h	Fig. 11	Fig. 2	.187

1 oz = 28.4 g

1 oz-in-sec² = 72.0077 g-cm-sec² (inerzia come carico)

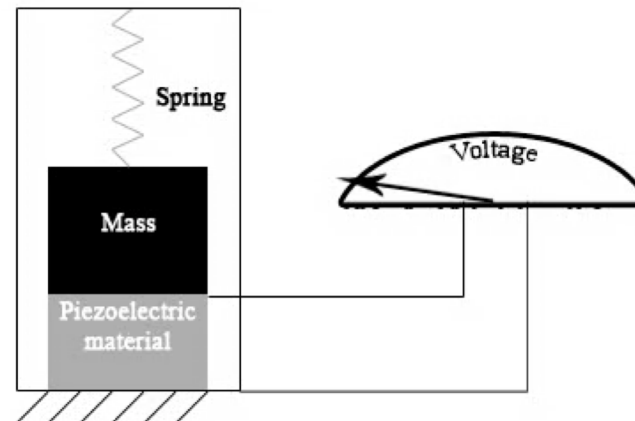
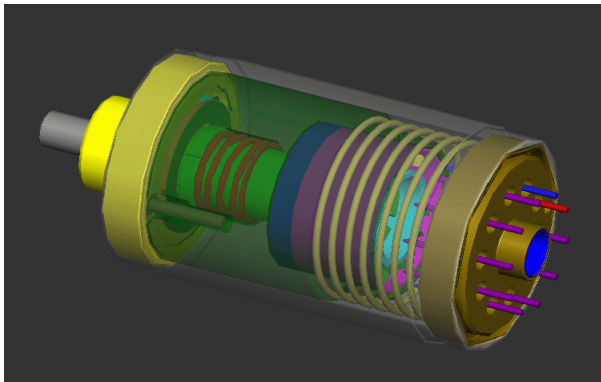
misura di accelerazione lineare basata sulle **forze inerziali** (senza “contatto”)

- unità di misura: $[m/s^2]$ o accelerazione gravitazionale $[g]$ (unità non-SI: $1g \approx 9.81 m/s^2$)

diversi principi per convertire moto accelerato (energia meccanica) in segnale elettrico

- **piezoelettrico**: ceramiche (PZT) o cristalli (quarzo), buona linearità e stabilità, ampio campo dinamico fino alle alte frequenze, nessuna parte in movimento, non richiede alimentazione
- **piezoresistivo**: tollera urti/shock, misura accelerazione continua (g), richiede alimentazione
- **capacitivo**: elemento sensibile in silicone micro-lavorato, superiore qualità dalla continua alle basse frequenze, utilizzabile in un anello di controllo, basso costo ma risoluzione limitata
- soluzione moderna: piccoli **MEMS** (Micro Electro-Mechanical Systems)

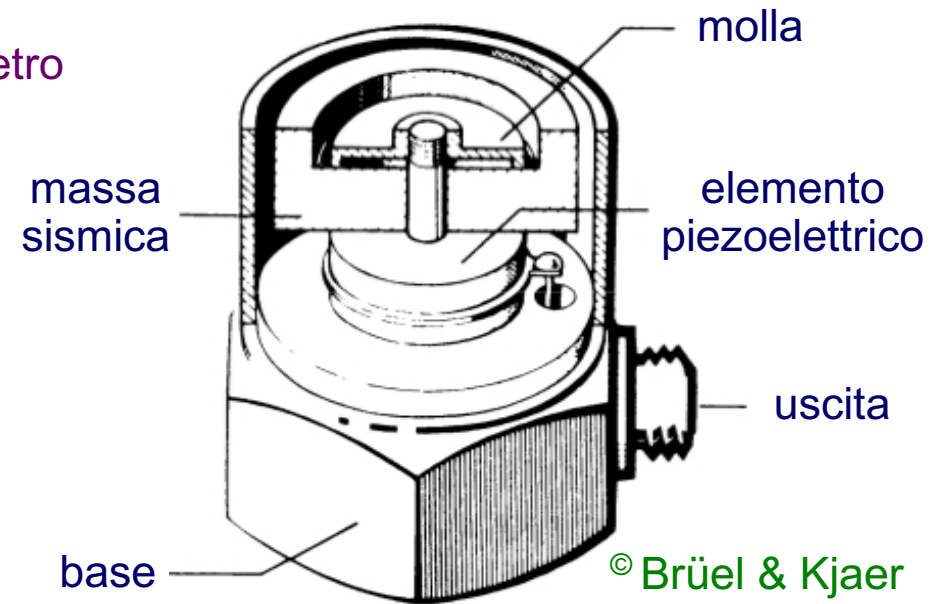
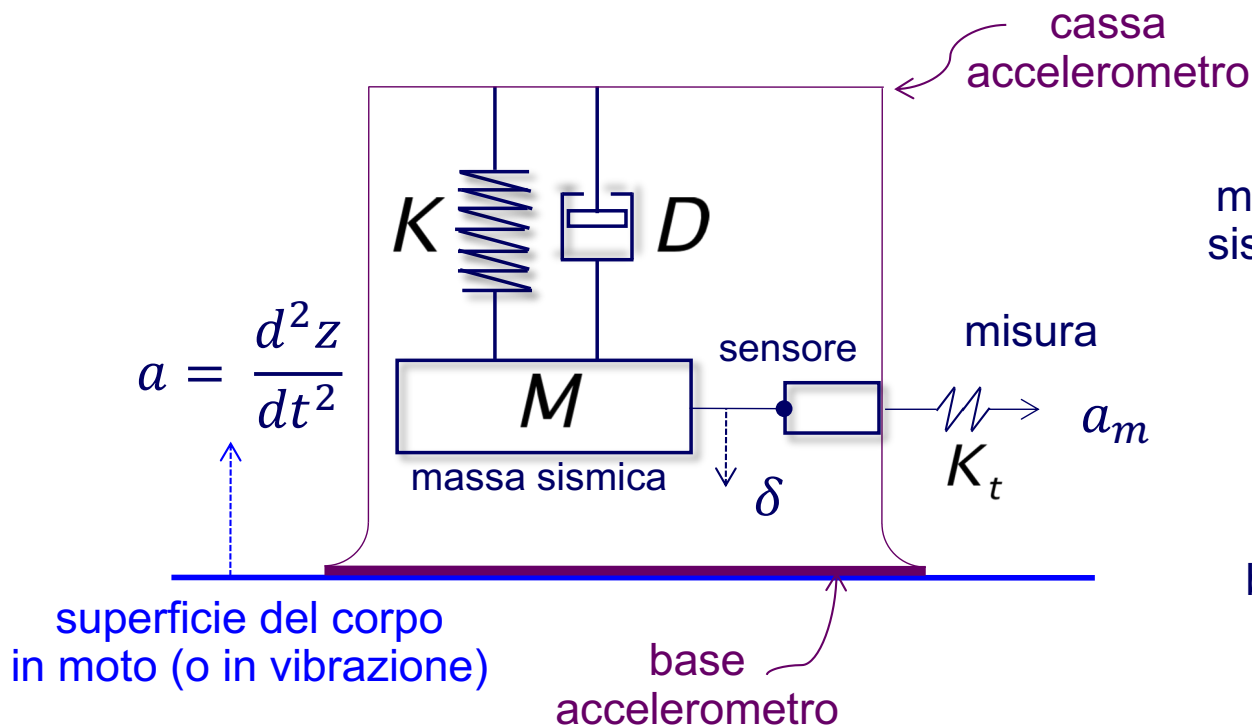
uso in molteplici applicazioni: dall'analisi di vibrazioni alla navigazione a lungo raggio



animazione del principio di misura in un accelerometro piezoelettrico

Principio di funzionamento

accelerometro sismico



$$Ma = M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + K\delta$$
$$a_m = K_t\delta$$

trasformata
di Laplace

$$\frac{A_m(s)}{A(s)} = K_t \frac{M}{Ms^2 + Ds + K}$$
$$= \frac{K_t}{s^2 + (D/M)s + (K/M)}$$

Caratteristica in frequenza

accelerometro piezoelettrico

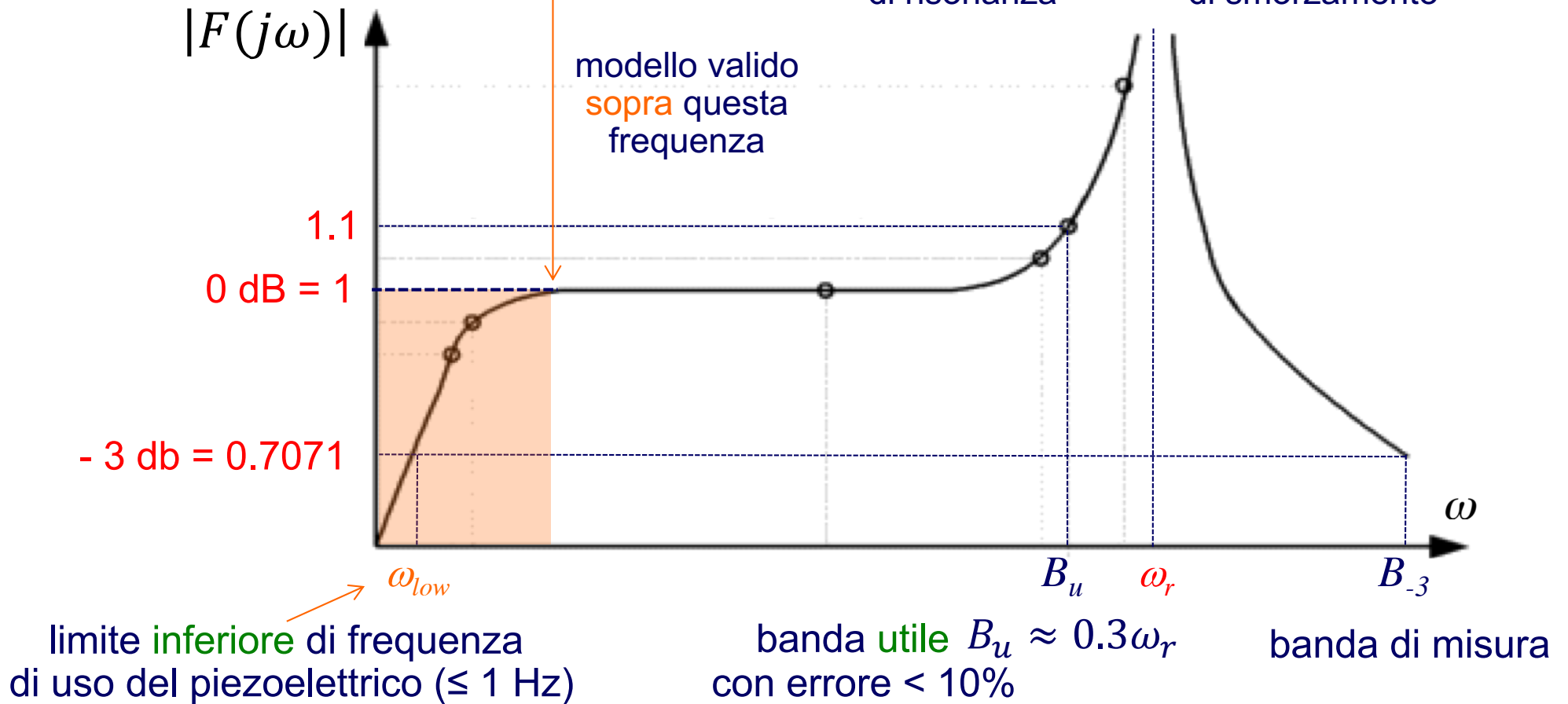
$$F(s) = \frac{A_m(s)}{A(s)} = \frac{K_t}{s^2 + (D/M)s + (K/M)}$$

$$\omega_r = \sqrt{K/M}$$

frequenza
di risonanza

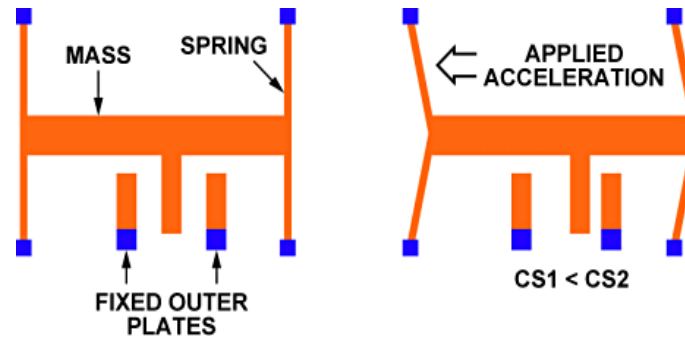
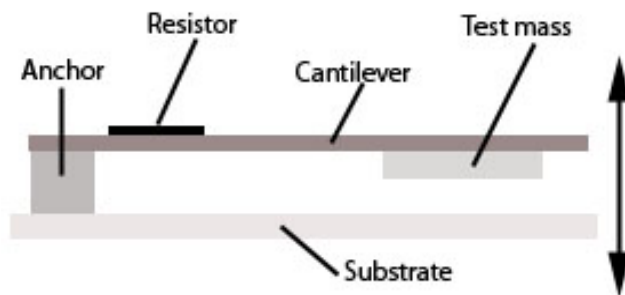
$$\zeta = \frac{D}{2} \sqrt{1/KM}$$

coefficiente
di smorzamento

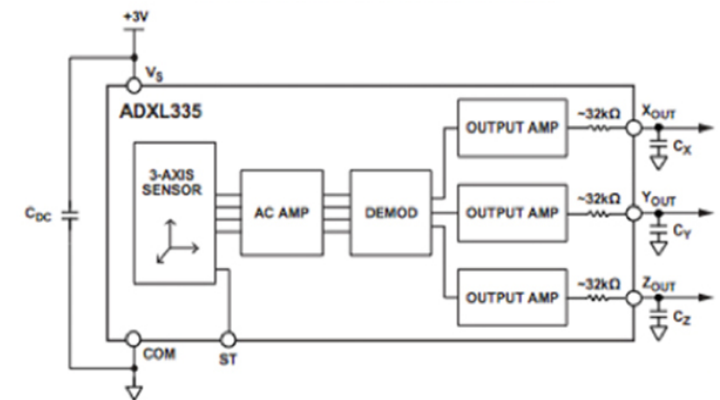
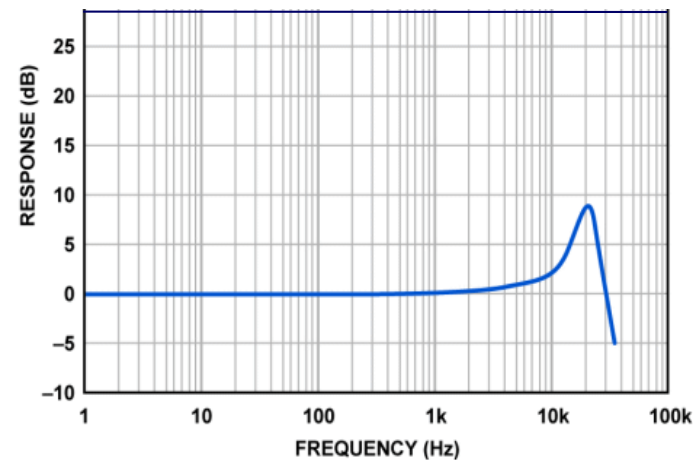
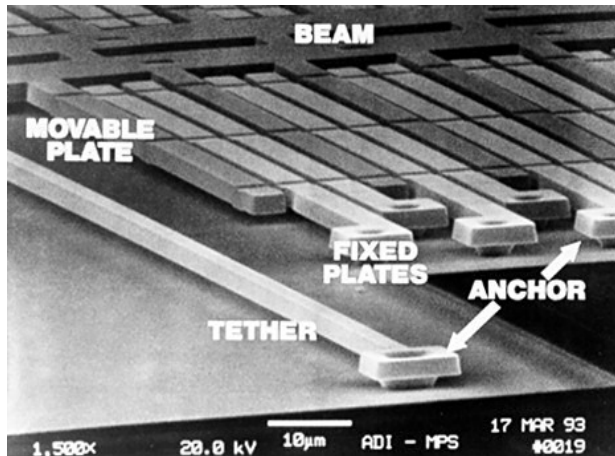


Accelerometri MEMS

- strutture MEMS molto semplici (una **trave a sbalzo** con **massa campione** e smorzamento viscoso dato da gas residui sigillati nel dispositivo), con possibilità di misura su singolo asse o **tri-assiale**, molto piccole e leggere
- gli **accoppiamenti** tra diverse direzioni di misura dell'accelerazione devono limitarsi a $\leq 3\%$



ADXL335 a 3 assi, piccolo, bassa potenza, ± 3 g, con uscite pre-condizionate in tensione

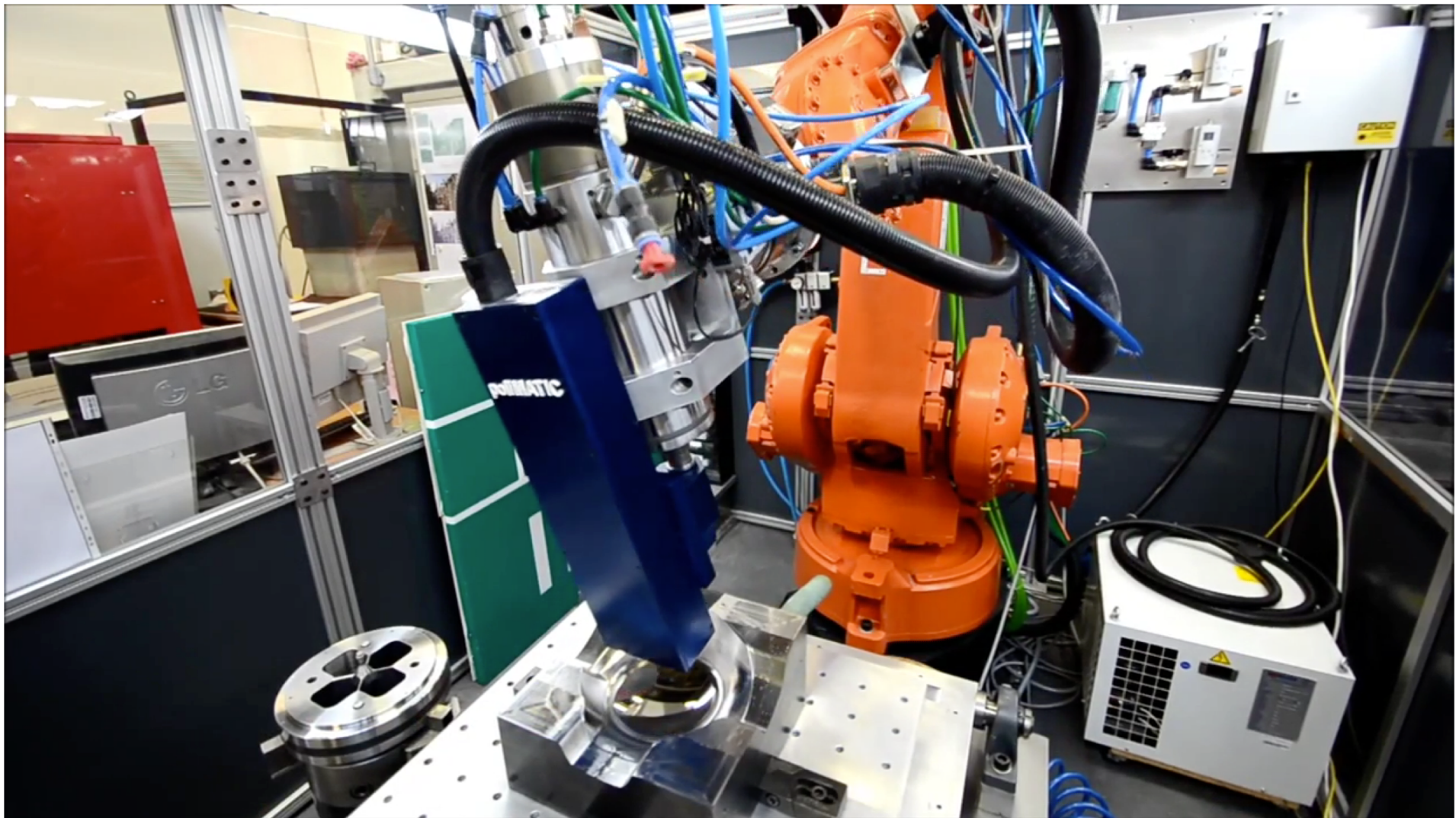


Altri sensori per l'automazione

- ❑ bussole, GPS, giroscopi, piattaforme inerziali (IMU)
- ❑ celle di carico e sensori di forza/coppia
 - estensimetri ('strain gages' con ponte di Wheatstone), trasduttori piezoelettrici, torsionometri
- ❑ sonda di corrente a effetto Hall
 - non necessita di essere posta in serie
- ❑ sensori di temperatura, pressione, flusso, livello, umidità, pH
 - termo-resistenze, sonde a termo-coppia, manometri, tubi di Pitot, ...
- ❑ sensori di prossimità e distanza
 - micro-switch (contatto)
 - capacitivi, induttivi, effetto Hall
 - infrarossi, ultrasuoni
 - laser
- ❑ sistemi di visione
- ❑ sensori per altre grandezze d'interesse relative al prodotto o al processo
 - durezza, rugosità, usura di utensili, spessore, olfattivi ...

Sensore laser di rugosità

video

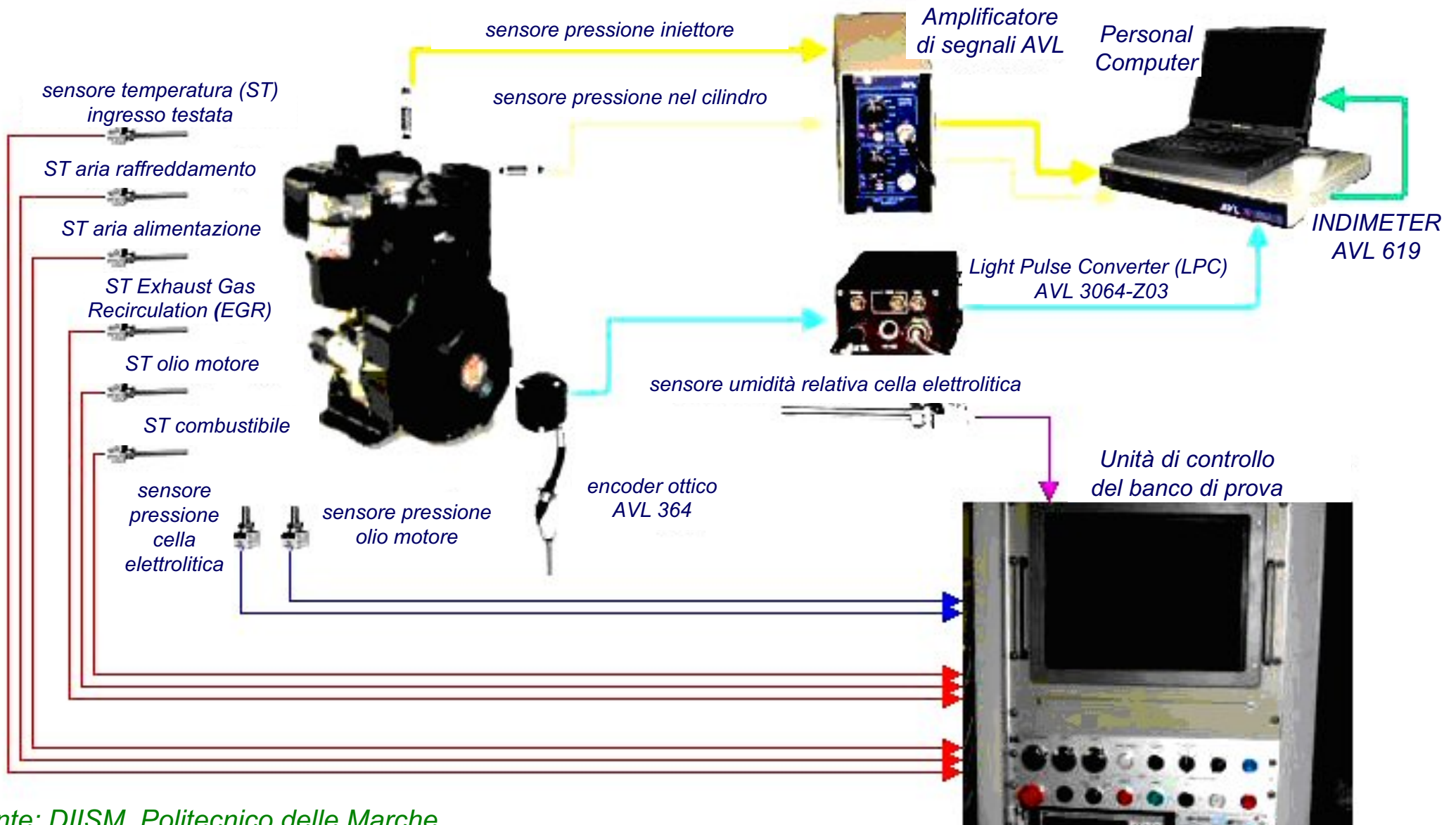


▣ QISAB CWS (Coherent Wave Scatter) System (Svezia)



Esempio di suite sensoriali

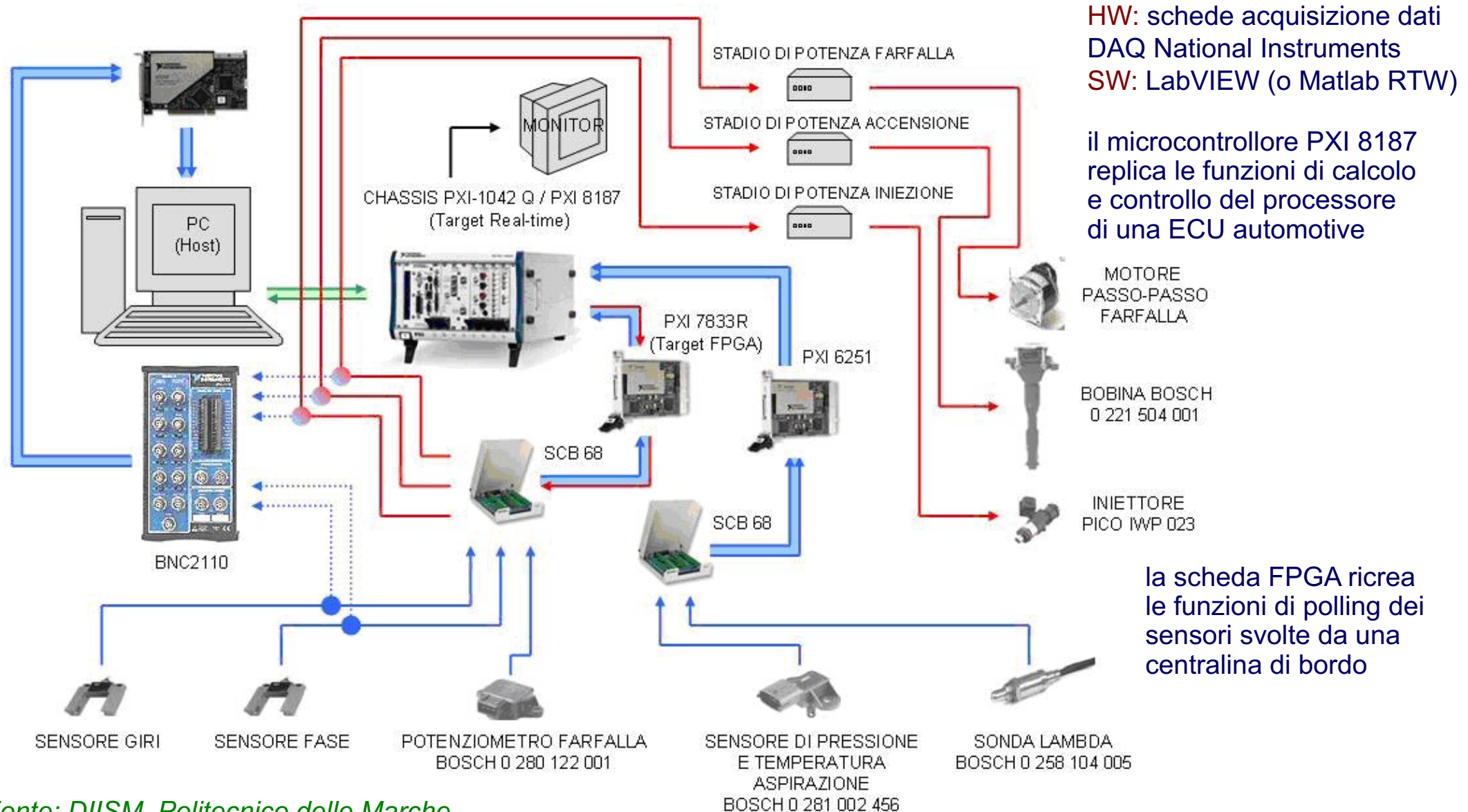
Monitoraggio di motore diesel con miscele e analisi gas emessi (CO_2 , CO , HC , NO_x)



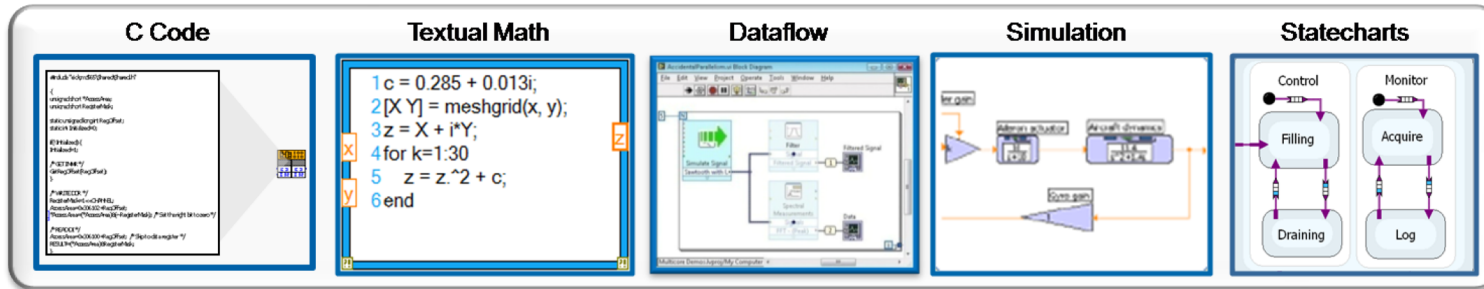
Fonte: DIISM, Politecnico delle Marche

Uso di sensori per automazione e controllo

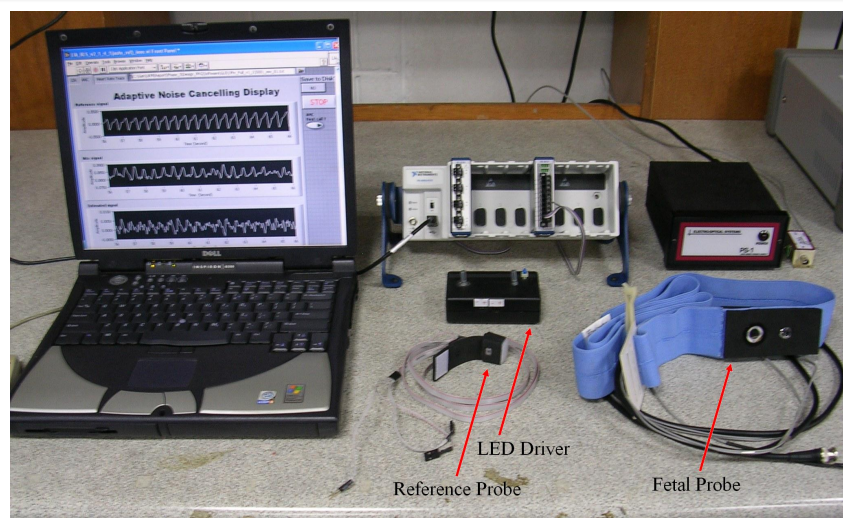
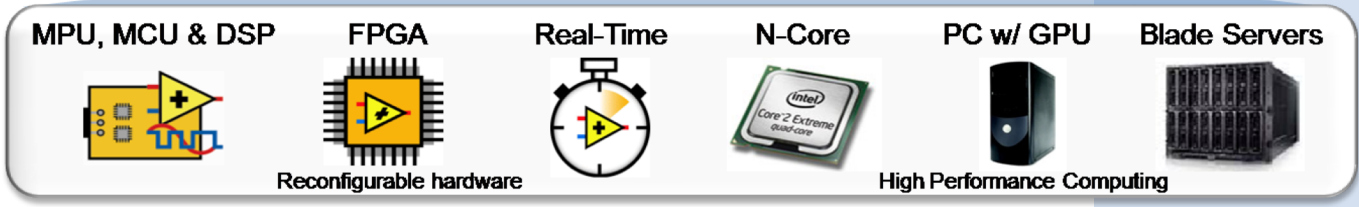
Sistema di controllo per motore a combustione interna (*emulazione hardware-in-the-loop*)



Fonte: DIISM, Politecnico delle Marche



Ambiente di sviluppo per applicazioni di misura, analisi e controllo, con funzioni di programmazione grafica, interfacce configurabili e facile integrazione hardware con una vasta gamma di dispositivi



Generate, Process, Analyze and Display Signals

User Operation Inputs
 Signal Frequency
 Signal Amplitude
 Noise Amplitude
 Trace Separation

Time Domain Display
 Amplitude vs Time

Frequency Domain Display
 Amplitude vs Frequency

Block Diagram (LabVIEW "G"-Source Code)

Main While Loop: keeps the VI running until the Stop button is pressed

Trace Separation, Signal Frequency, Signal Amplitude, Generate Sine Wave, Noise Amplitude, Generate Noise, Calculate FFT of the pure sine wave and the one with noise, Time Domain Display, Frequency Domain Display

This VI continuously generates two signals: a pure sine wave of variable frequency and amplitude and a white noise signal of variable amplitude. The noise is then added to the pure sine. The sine wave with and without the noise are then shown in a time domain graph. Additionally an FFT is calculated for both signals and the results are then shown in the frequency domain graph. Note that the square shaped functions are subroutines in the form of subVIs.

- ❑ il più diffuso ambiente software per acquisizione dati (DAQ) e non solo
- ❑ sviluppato da National Instruments (NI) dal 1986, *de facto* uno standard industriale
- ❑ acquisizione dati tramite molteplici canali di comunicazione
 - bus seriali (RS-232, RS-485) o paralleli (IEEE 488), TCP/IP, connessione remota via web
 - interfaccia con schede DAQ e/o controllo proprietarie (NI CompactDAQ, CompactRIO, myRIO) o di terze parti (Arduino, Raspberry Pi/Pi2, ...)
- ❑ strumentazione virtuale (VI = Virtual Instrument)
 - con VI si emulano i dispositivi di misura (ad es., oscilloscopi) o controllo
 - le interfacce utente sono altamente personalizzabili
- ❑ programmazione grafica ad icone (G-language) o con moduli utente scritti in C
- ❑ analisi e elaborazione dei segnali
 - libreria di algoritmi veloci, efficienti, affidabili (“script nodes” con sintassi tipo Matlab)
- ❑ interfaccia con hardware in/out di misura e di controllo
 - mediante l’uso di driver, il codice è facilmente trasferibile sui diversi target hardware: PC desktop, computer industriali, dispositivi embedded, PLC, FPGA, ...
- ❑ moduli dedicati alle applicazioni
 - visione, motion control, robotica (toolbox KUKA, ROS), monitoraggio e test automatizzati ...

- toolbox di applicazioni di misura e controllo per robot manipolatori KUKA

video

