



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Sensori per l'automazione

Automazione

27/10/2015

Alessandro De Luca

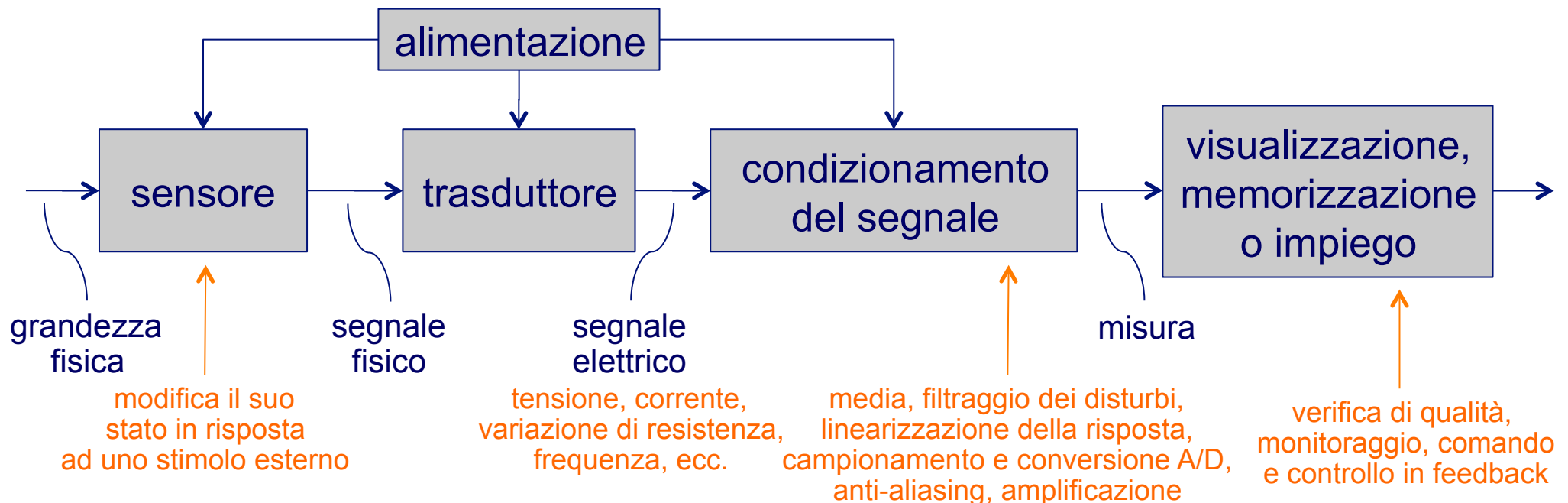
# Sistemi di misura

i **sensori** misurano **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)



# Proprietà dei sistemi di misura - 1

---

## 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)

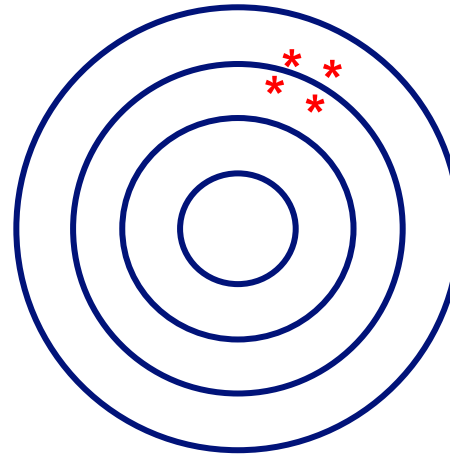
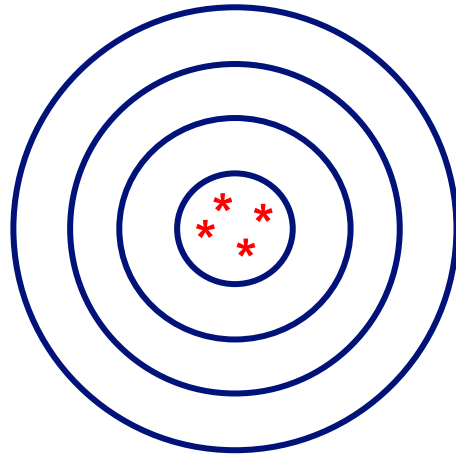
# Accuratezza e Precisione

## ACCURATEZZA

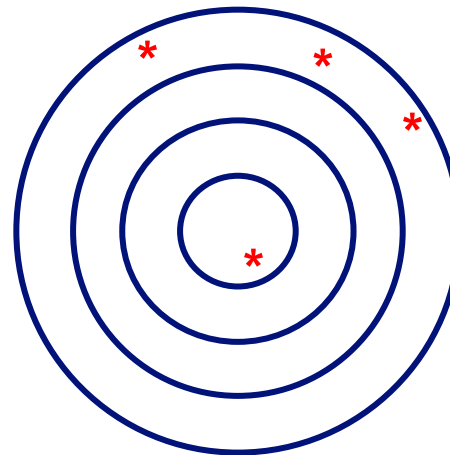
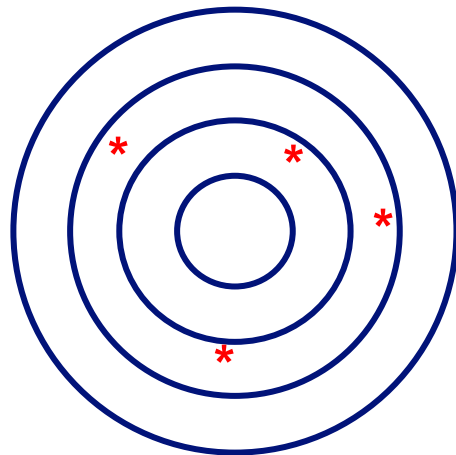
elevata

scarsa

elevata

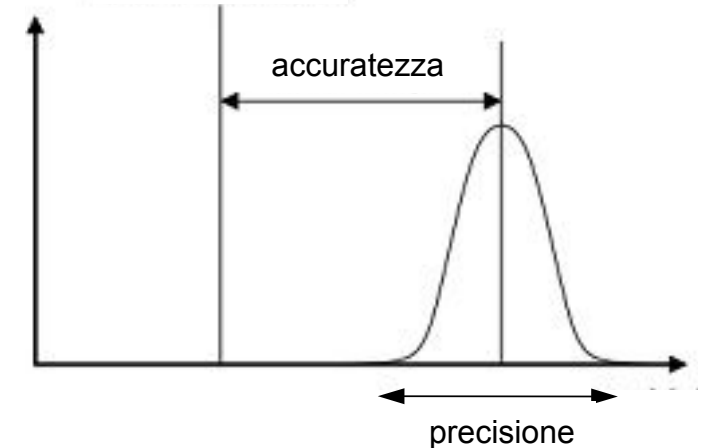


scarsa



in termini di  
distribuzione di probabilità  
delle misurazioni

valore di  
riferimento  
(ground truth)



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

# Proprietà dei sistemi di misura - 2

---

## 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**

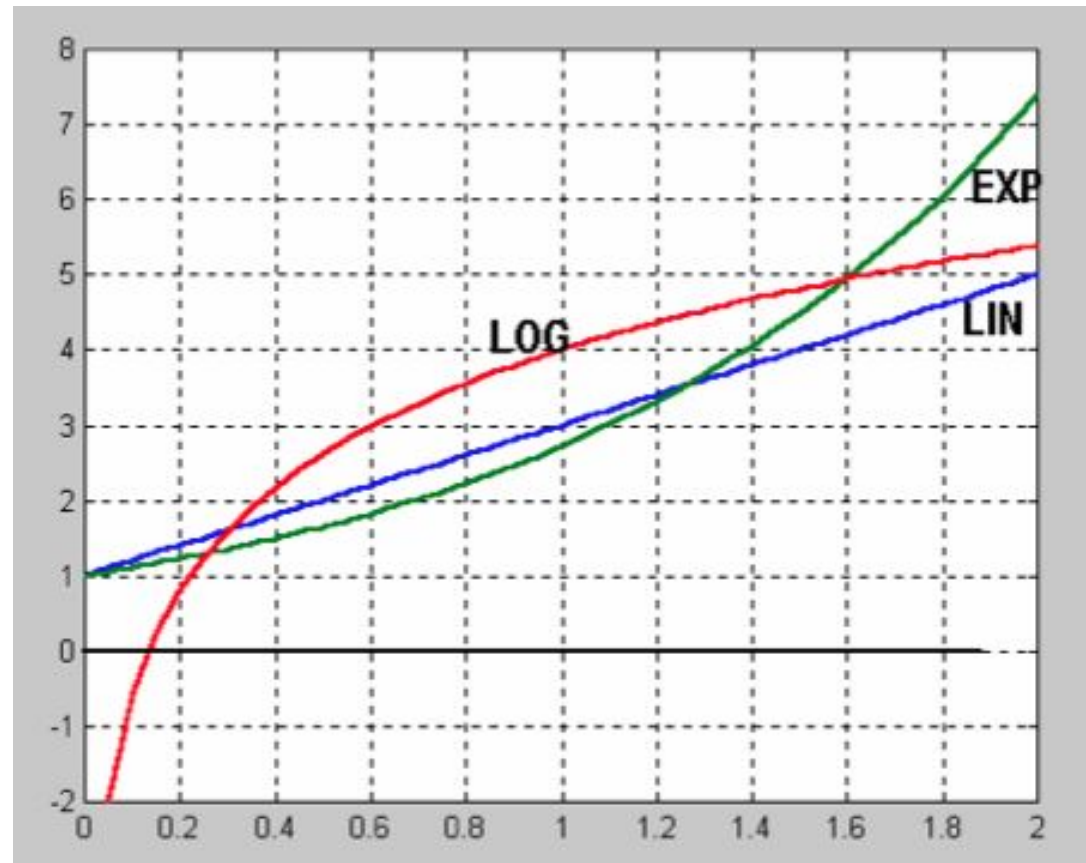
$$y = kx^h$$

**quadratica,  
cubica, ecc.**

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

**altre forme...  
(senza nomi)**

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

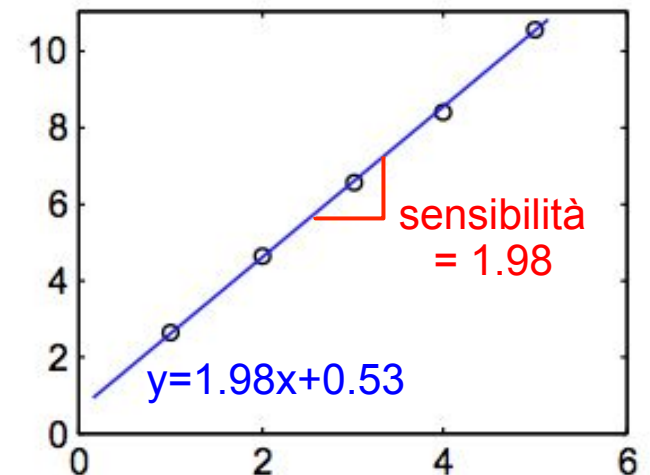
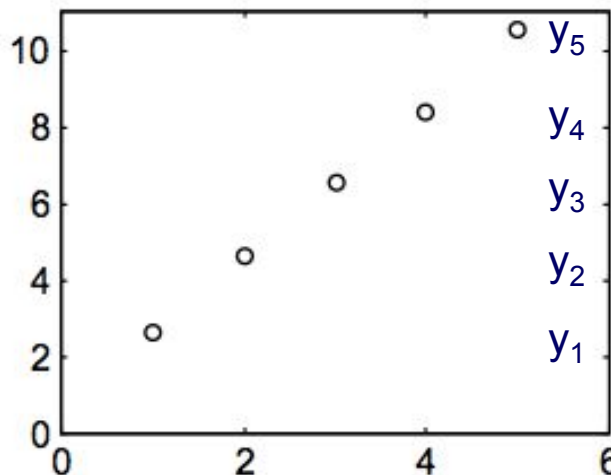
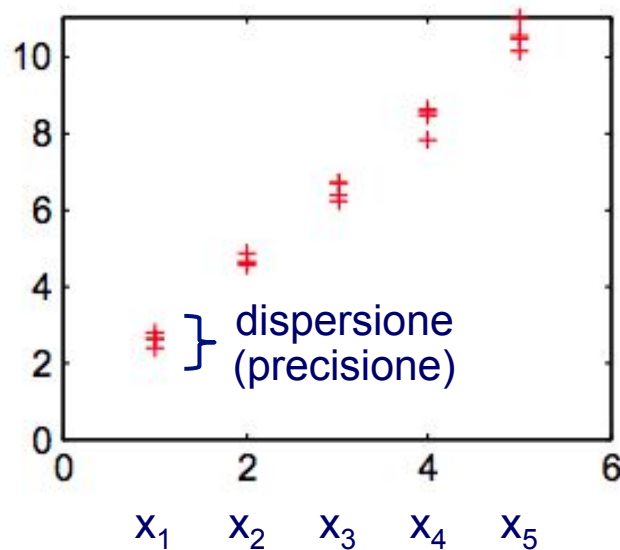


in genere, modelli con pochi parametri (solo 1 o 2)  
per evitare una sovra-parametrizzazione (overfitting)

# 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



# Proprietà dei sistemi di misura - 3

---

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**

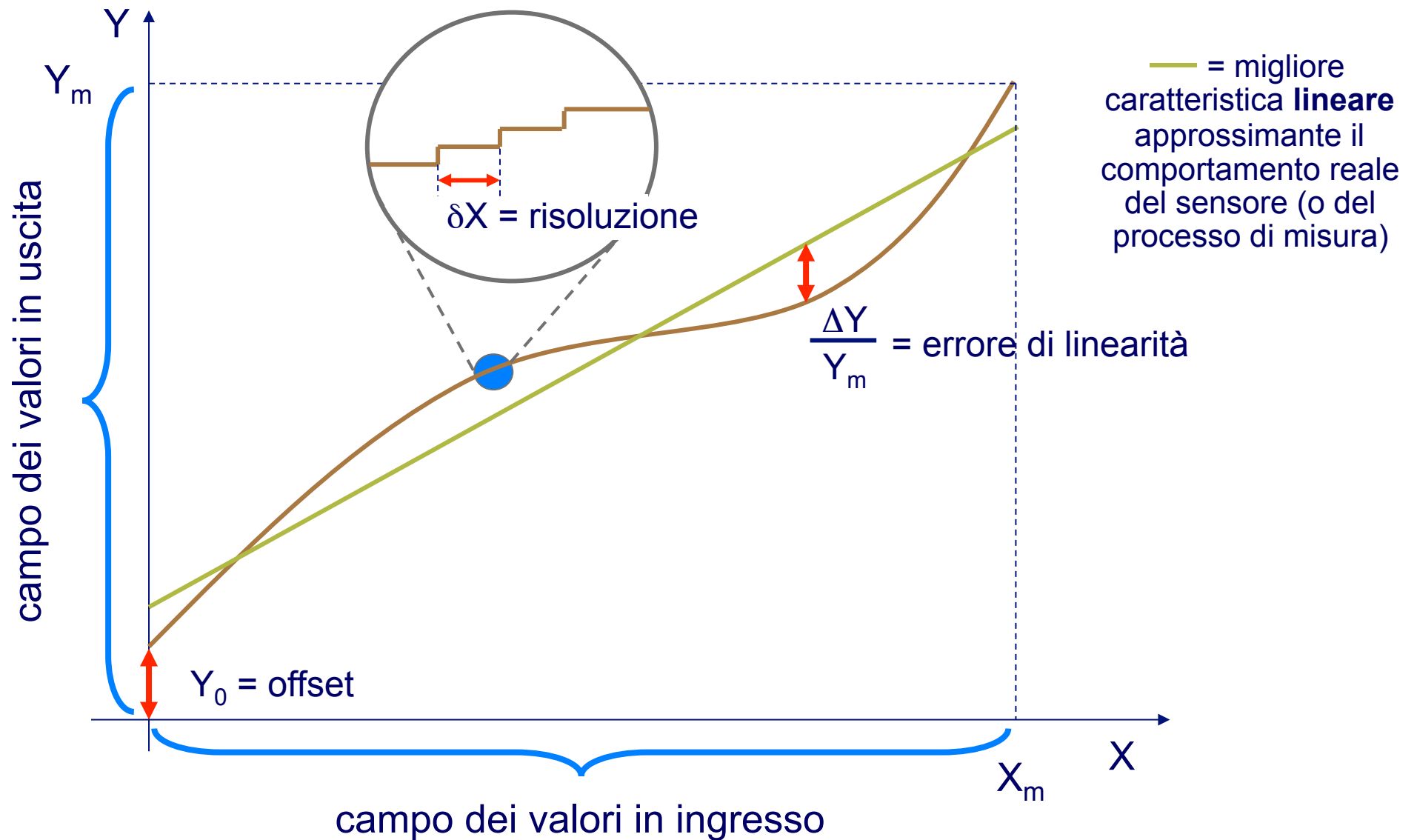
**risoluzione**

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

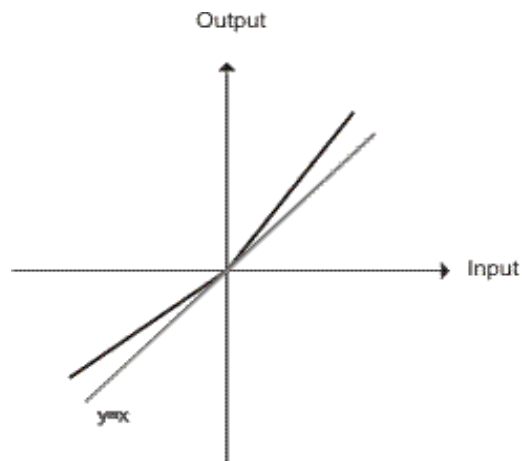
- espressa in termini assoluti o in % del campo dei valori in ingresso



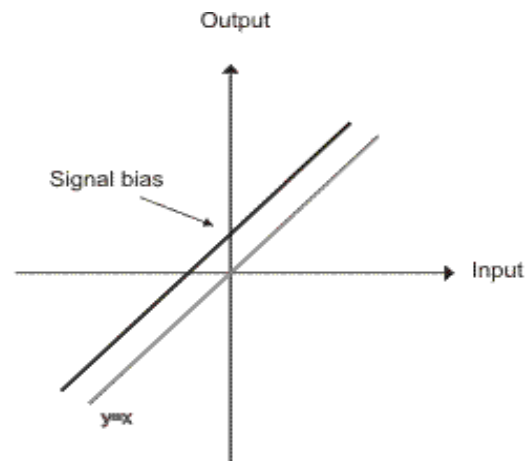
# Linearità, offset e risoluzione



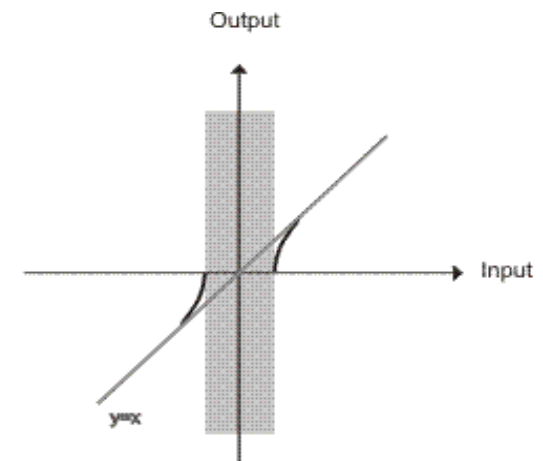
# Non idealità nelle misure



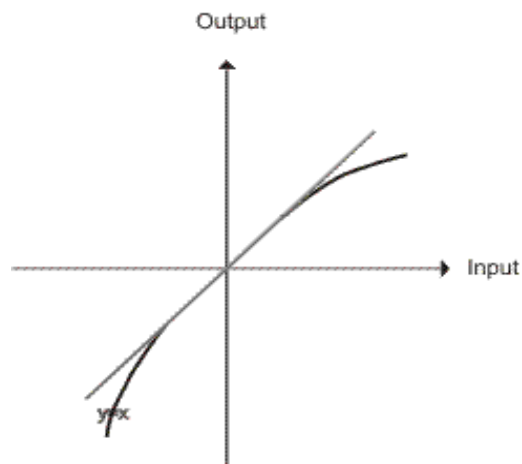
Asimmetria



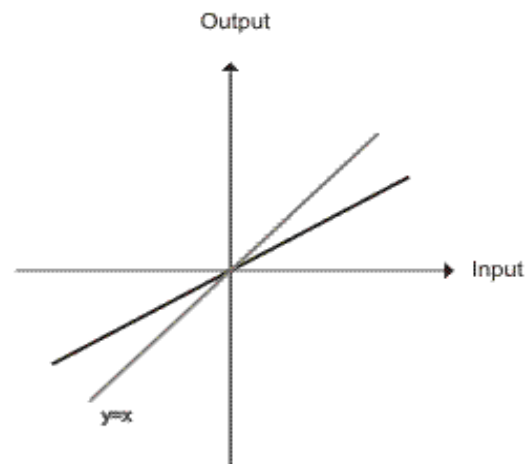
Polarizzazione (bias)



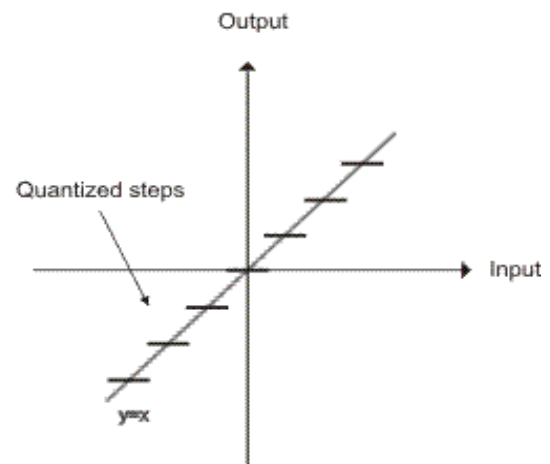
Zona morta (dead zone)



Non linearità



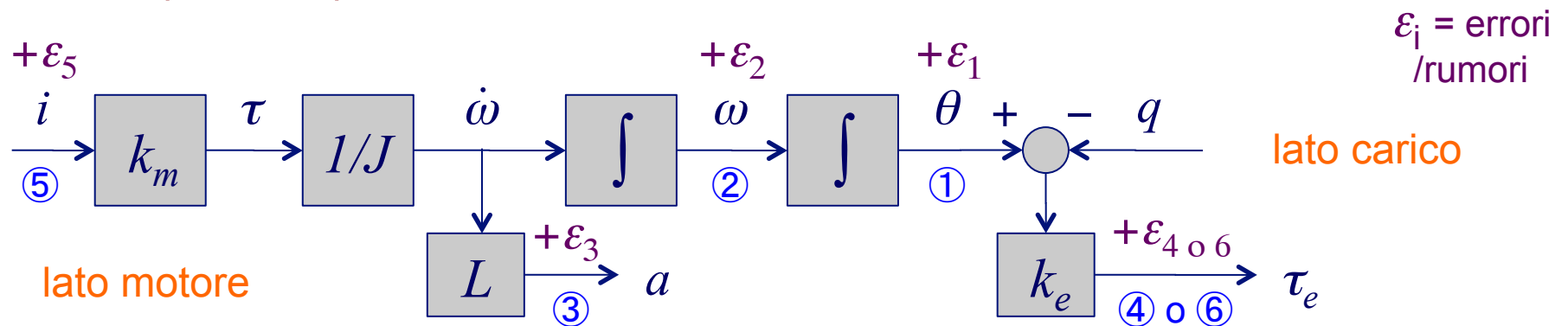
Fattore di scala  
(deriva di sensibilità)



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

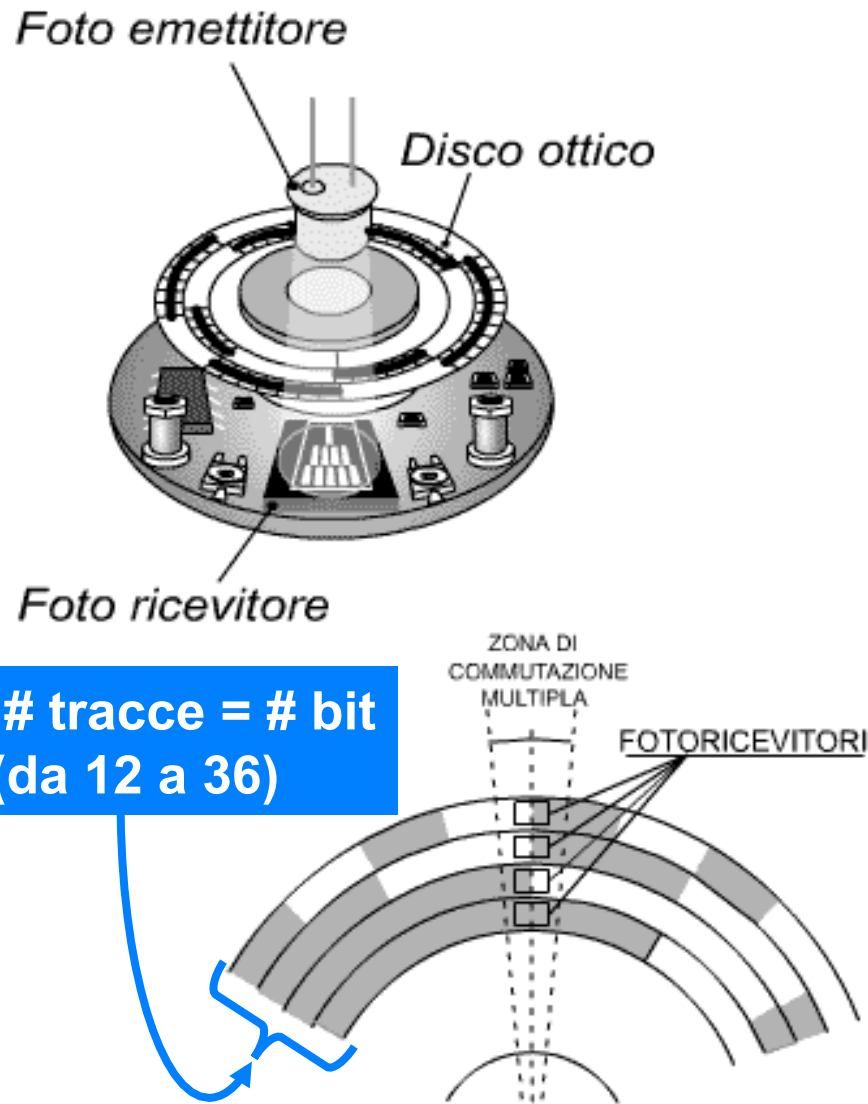
spostamenti **lineari**: potenziometri, trasduttori di spostamento induttivi (LVDT), inductosyn

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

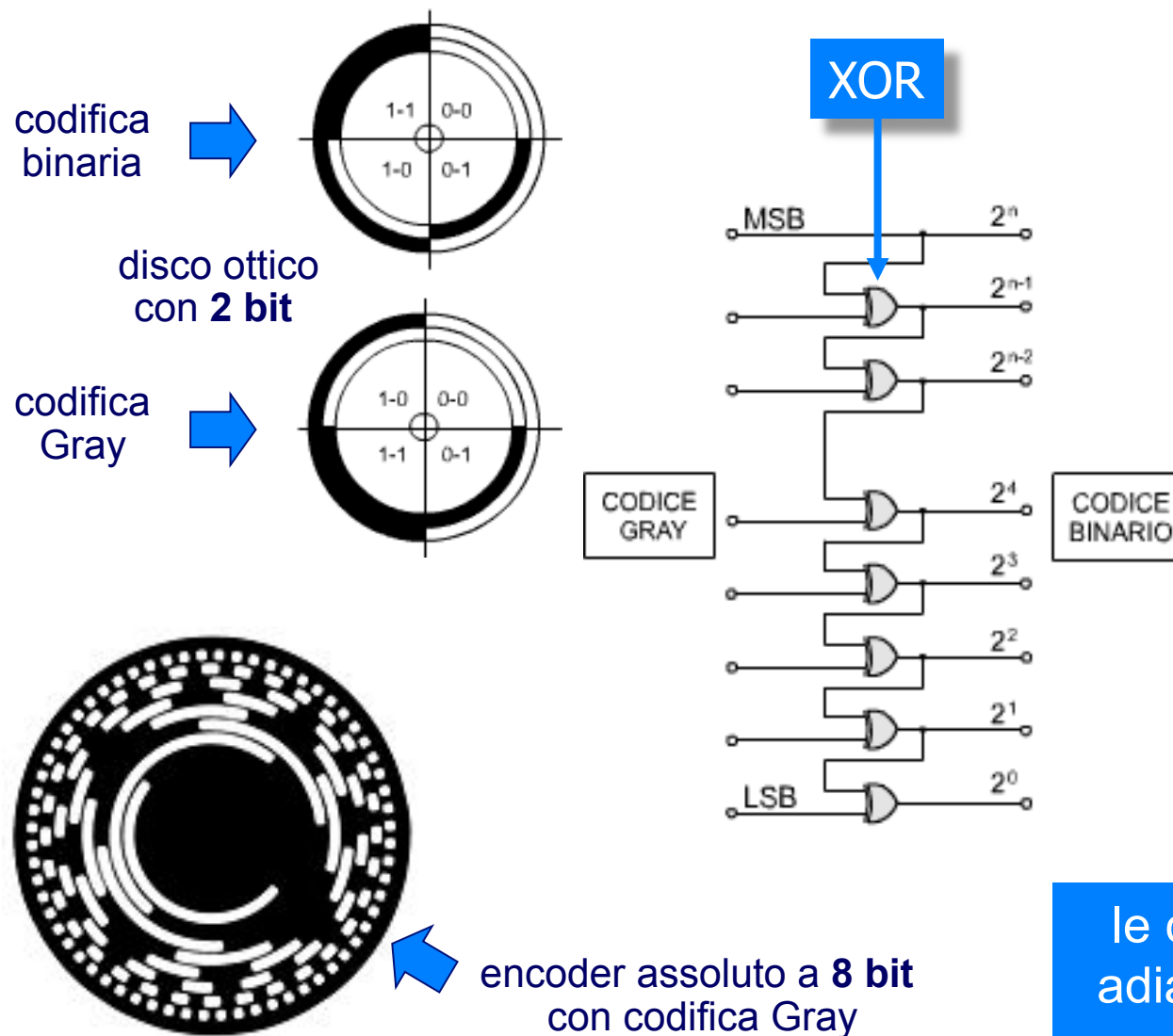


# Encoder assoluti



- 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 =  $360^\circ/2^{N_t}$**
- 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")

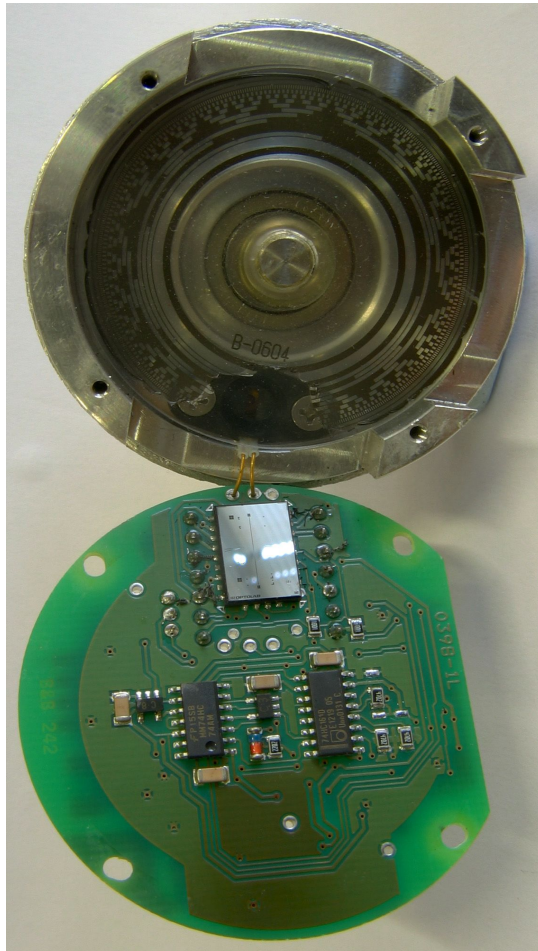
# Codifica assoluta



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** =  $0.044^\circ$ )
  - multi-turn a 29 bit con 8192 tacche/giro + conteggio fino a  $2^{16} = 65536$  giri
- corpo in alluminio con interfaccia disponibile per sistemi fieldbus (CANopen o PROFIBUS)
- alimentazione tipica 5/28V DC @1.2 W



ad albero cavo



con flangia



# Encoder incrementali

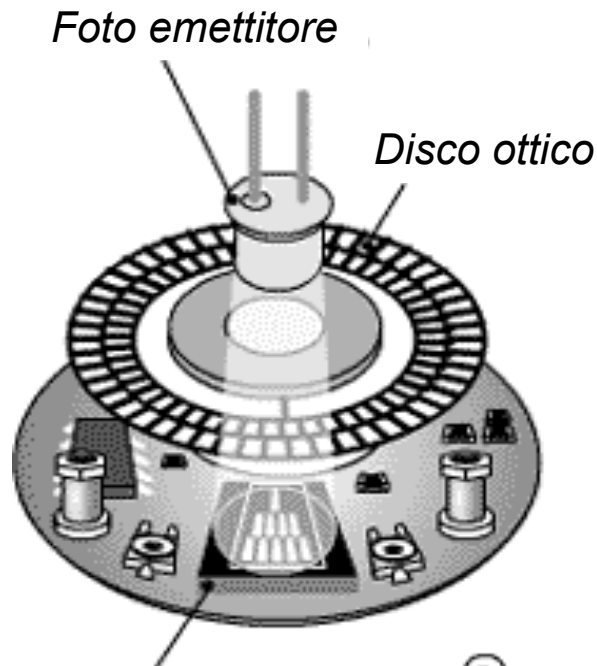
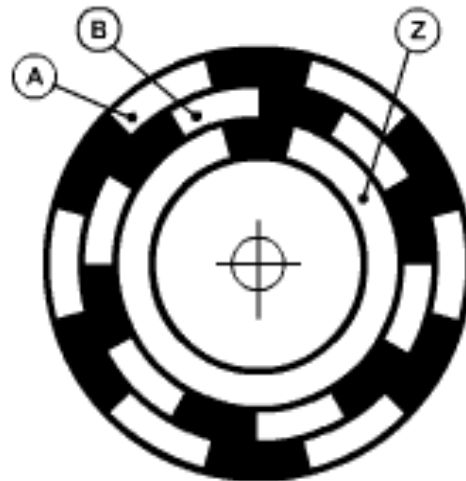


Foto ricevitore

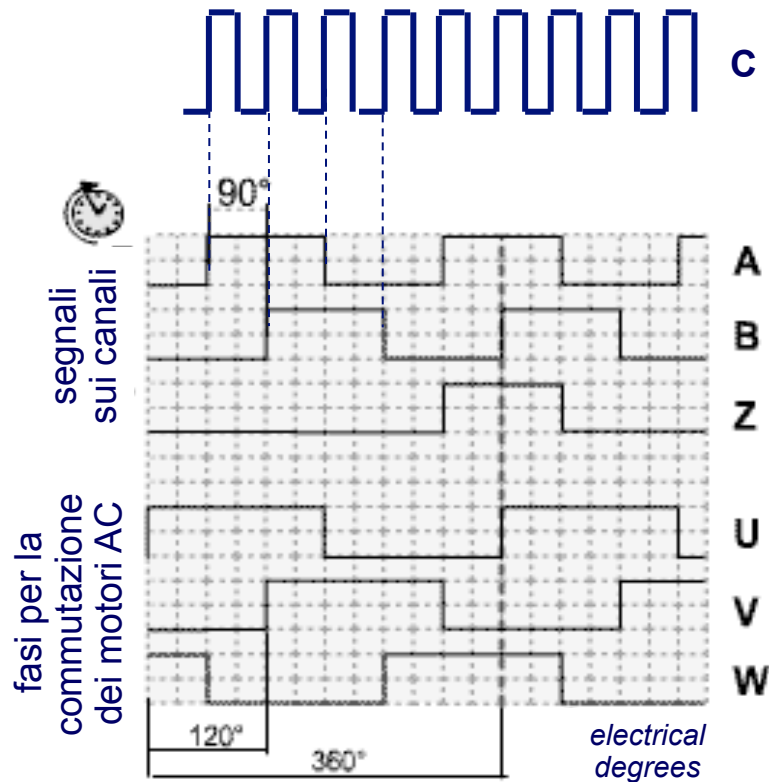
Le tre tracce  
sul disco ottico  
(qui  $N_e = 6$ )



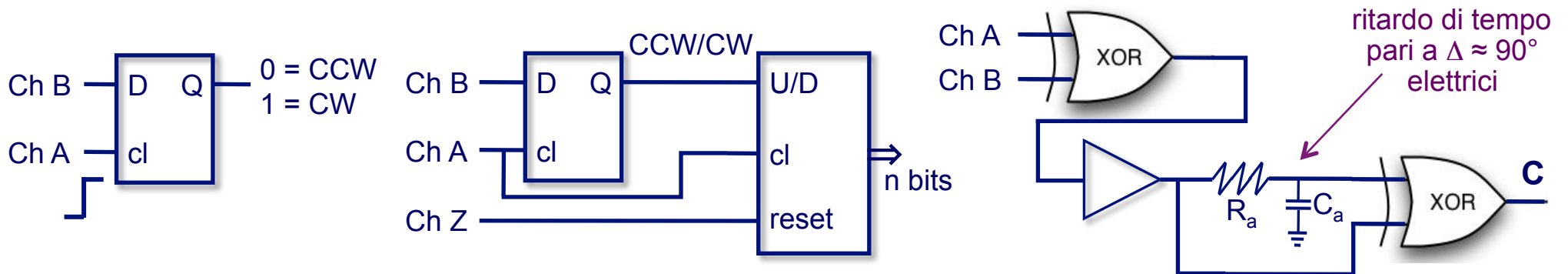
- disco ottico rotante con tre tracce, su cui si alternano aree trasparenti e opache: si misurano **incrementi** di spostamento angolare **contando** treni di impulsi ("tacche"),  $N_e$  per un giro ( $N_e = 100 \div 5000$ )
- le due tracce A e B (**canali**) sono in quadratura (sfasamento di  $90^\circ$  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  $120^\circ$ ) utili per il circuito di commutazione dei motori brushless



# Elaborazione del segnale

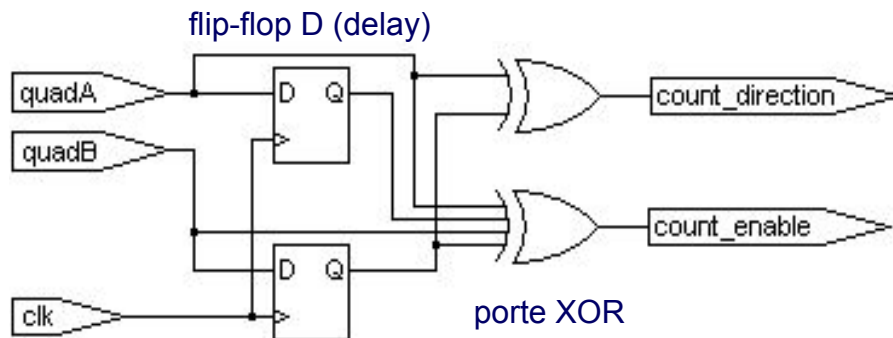


- le “frazioni di ciclo” di ogni treno di impulsi sono misurate in “gradi elettrici”
- $1^\circ \text{ elettrico} = 1^\circ \text{ meccanico} / N_e$ ,  
 $360^\circ \text{ meccanici} = 1 \text{ giro}$
- i segnali pilotano un **contatore** digitale, con un flip-flop di **tipo D** per riconoscere il verso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

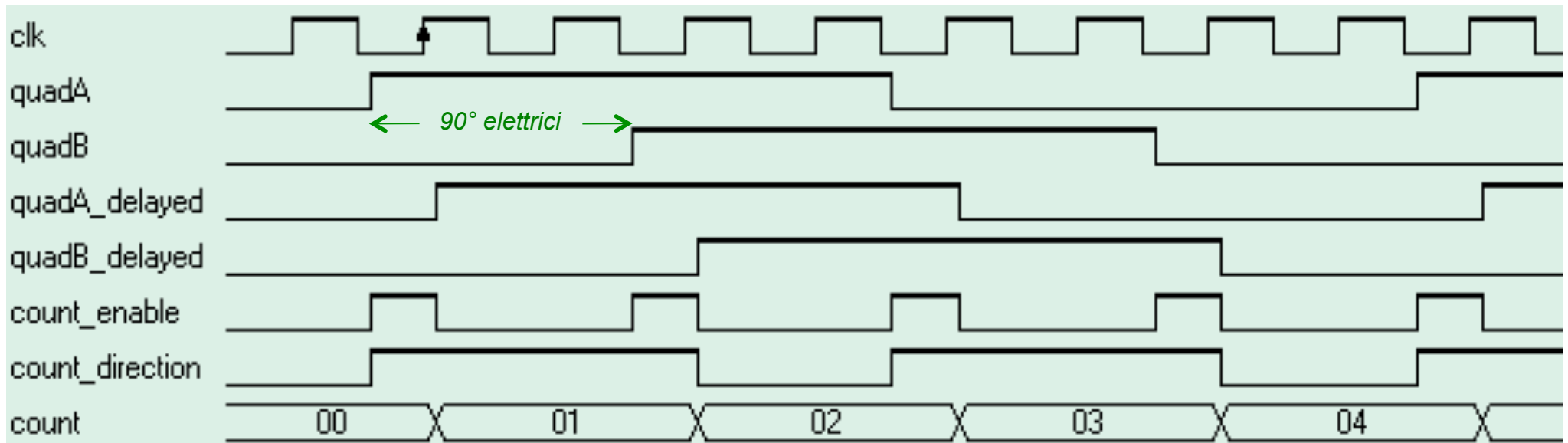


# Decodifica in quadratura

## un'implementazione più completa



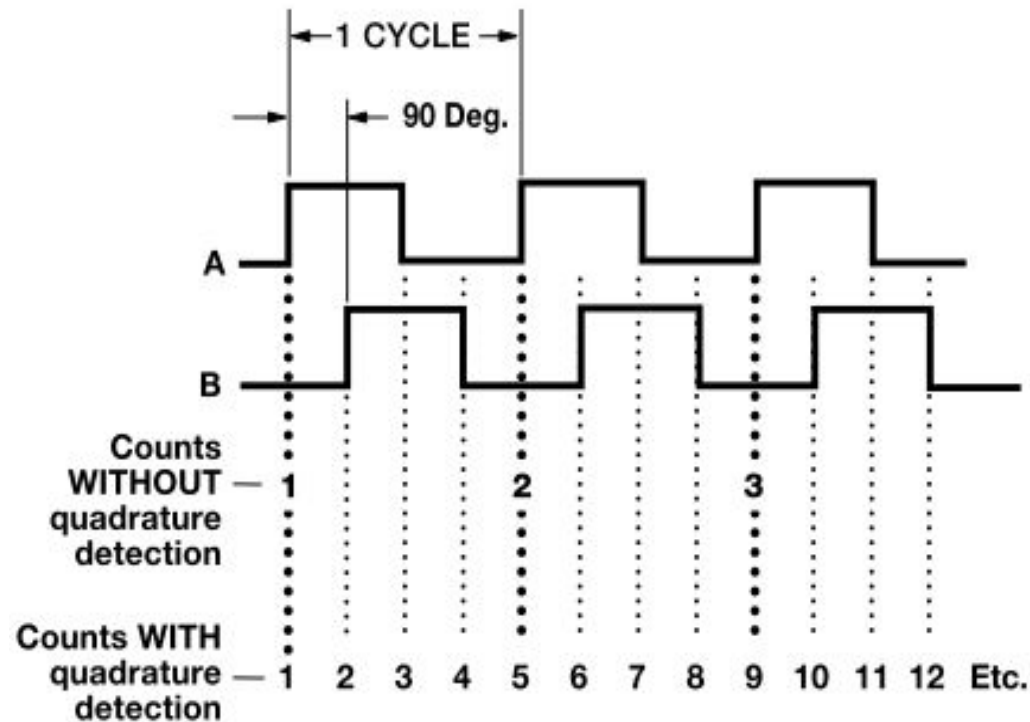
NOTA: poiché i segnali A e B potrebbero **non** essere sincronizzati al clock di sistema, si usano due flip-flop di tipo D aggiuntivi per ciascun ingresso in modo da evitare stati meta-stabili nel contatore



- 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")

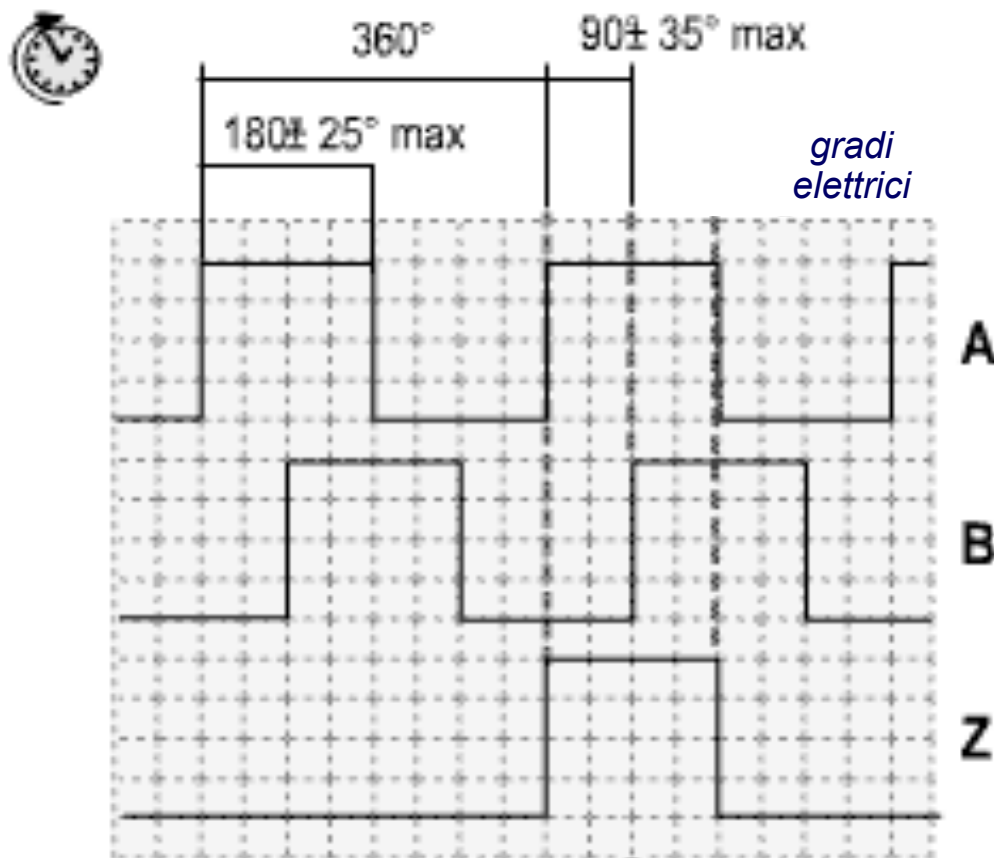
# Moltiplicazione del conteggio

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 ( $2^{13} = 8192$ )

# Accuratezza negli encoder incrementali



... a parte gli errori di quantizzazione

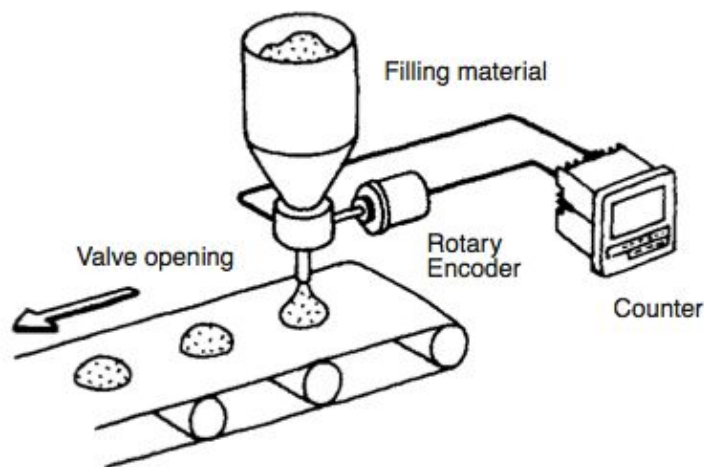
- **errore di divisione**: è il massimo ritardo tra due fronti d'onda (salita o discesa) consecutivi, in genere entro  $\pm 25^\circ$  elettrici
- lo **sfasamento** tra i due canali, pari a  $90^\circ$  elettrici nominali, può di fatto variare in un campo di  $\pm 35^\circ$  elettrici (**errore di quadratura**)

# Esempio di encoder incrementale



- Omron Rotary Encoder (incremental) 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 =  $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$
- temperatura di funzionamento:  $-10 \div 70^\circ\text{C}$
- 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

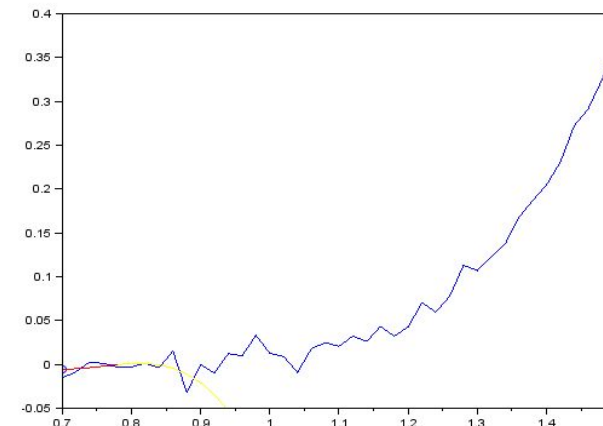
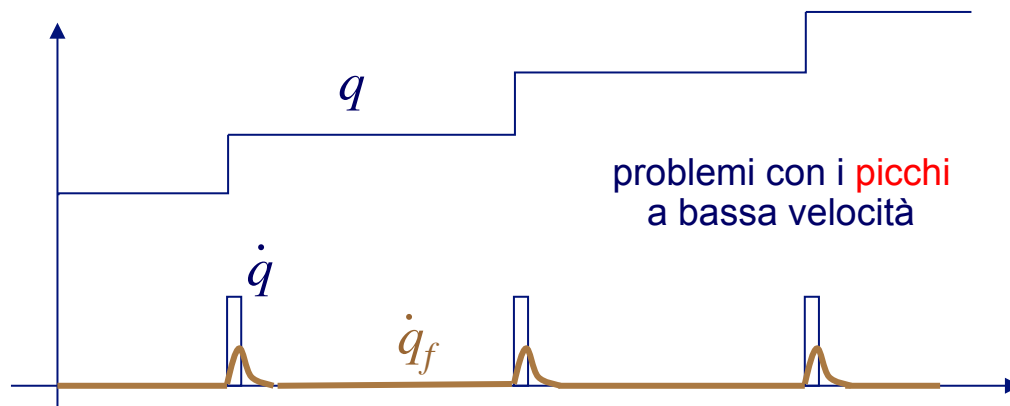
□ a 1 passo (metodo di Eulero):  $\dot{q}_k = \dot{q}(kT) = \frac{1}{T}(q_k - q_{k-1}) \Leftrightarrow \dot{q}_k = \Delta q_k / T \Leftarrow$  direttamente da **encoder incrementale**

□ 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

$$\xi(k) = (x(k) \dot{x}(k))^T$$

↑ stato attuale

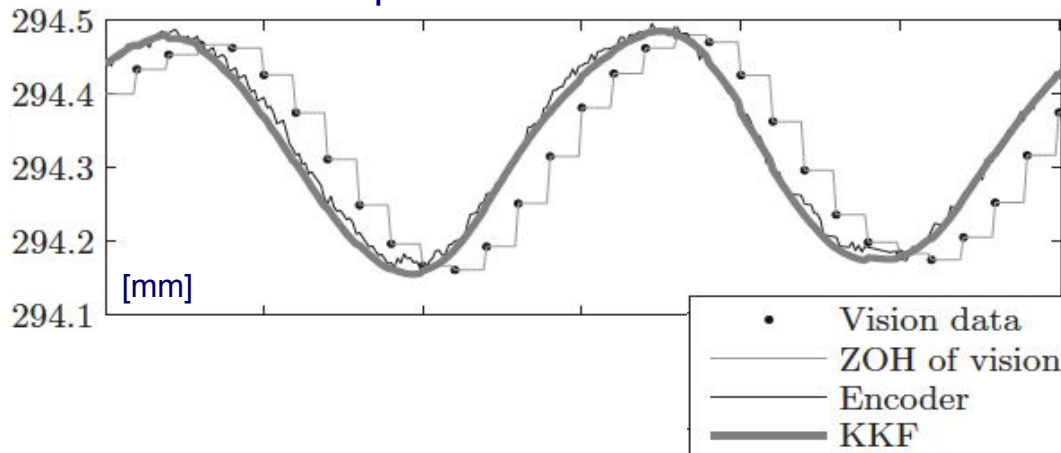
↓ velocità non misurata

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

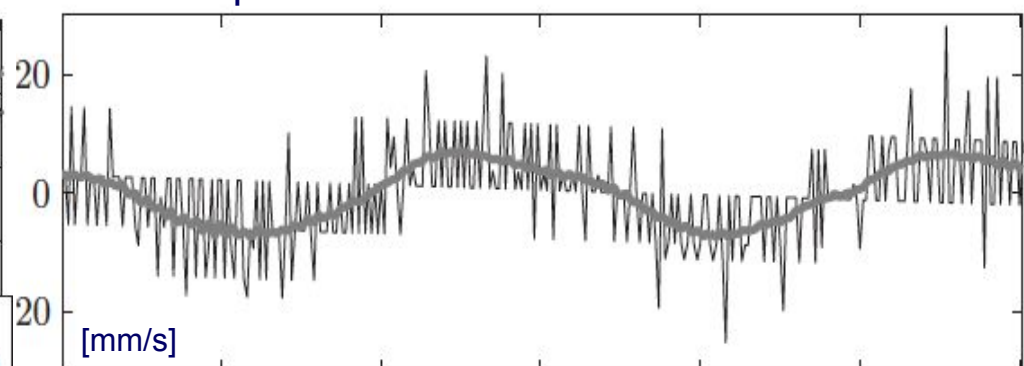
$$\hat{\xi}(k) = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{\xi}(k-1)}_{\text{predizione (a priori)}} + \underbrace{K_k \left( z(k) - \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{\xi}(k-1) \right)}_{\text{correzione (basata sull'uscita misurata)}}$$

usando il guadagno ottimo di Kalman  $K_k$

misura di posizione e sua stima filtrata



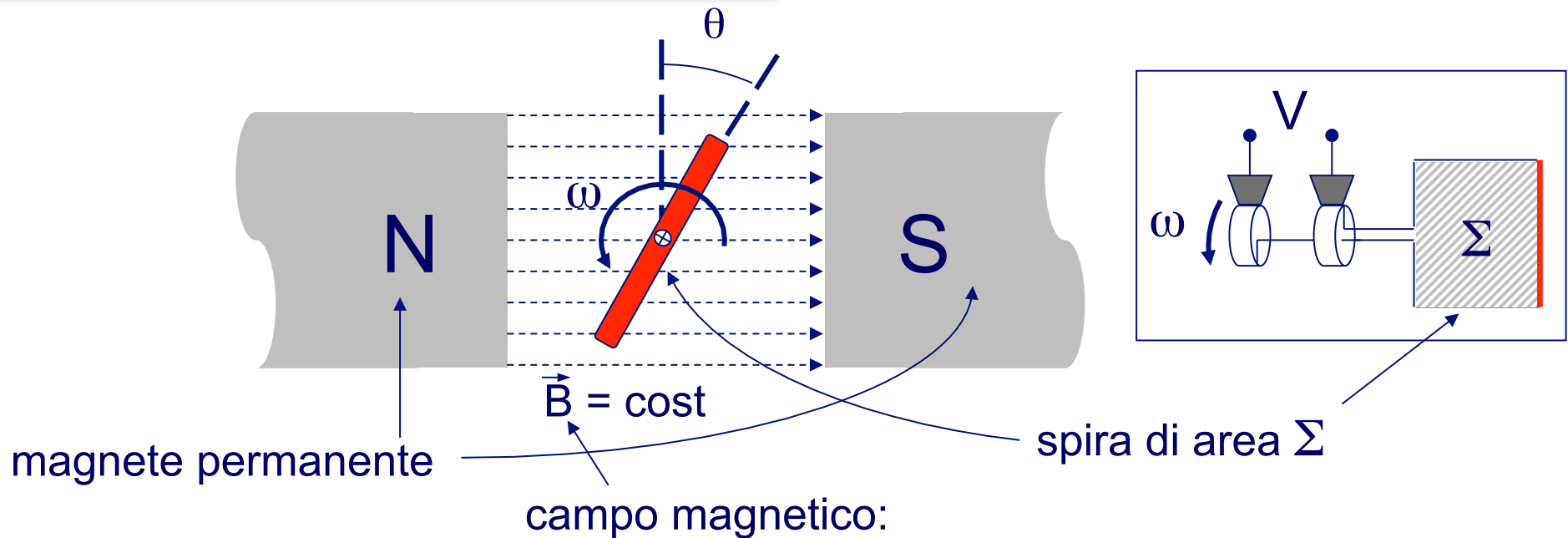
velocità per derivata numerica e sua stima filtrata



# 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  $\omega$  di misura

$\Rightarrow$  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 (B series)
- bi-direzionale
- tensione di uscita  $11 \div 24$  V @1000 RPM
- basso ripple: picco-picco  $< 3\%$  del valore della continua (con un filtro a 72 KHz)
- peso = 113 g, diametro = 2.9 cm
- errore di linearità  $< 0.1\%$  (a qualsiasi velocità)
- stabilità  $0.1\%$  (rispetto alla temperatura)

**B-Series Specifications**

Model Number	Mounting	Weight (approx)	Inertia (approx) oz-in.-sec <sup>2</sup>	V/1,000 RPM	RPM (max)	Driving Torque (max)	Arm R (ohms dynamic)	Arm Ind (h)
SA-740B-1*	Face	4.0 oz	$2.27 \times 10^{-6}$	20.8 V	8,000	0.25 oz-in.	1000	0.56
SB-740B-1*	Flange	4.0 oz	$2.27 \times 10^{-6}$	20.8 V	8,000	0.25 oz-in.	1000	0.56
SA-757B-1*	Face	4.0 oz	$2.27 \times 10^{-6}$	20.8 V	8,000	0.25 oz-in.	1000	0.56
SB-757B-1*	Flange	4.0 oz	$2.27 \times 10^{-6}$	20.8 V	8,000	0.25 oz-in.	1000	0.56

↑  
1.75 mNm (come carico)

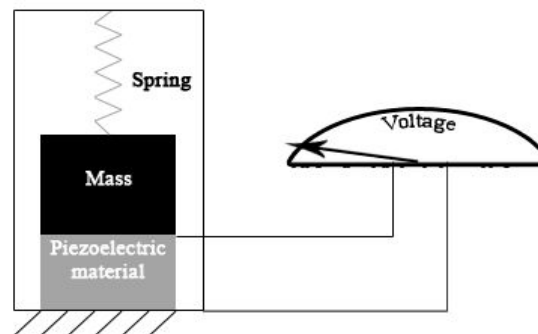
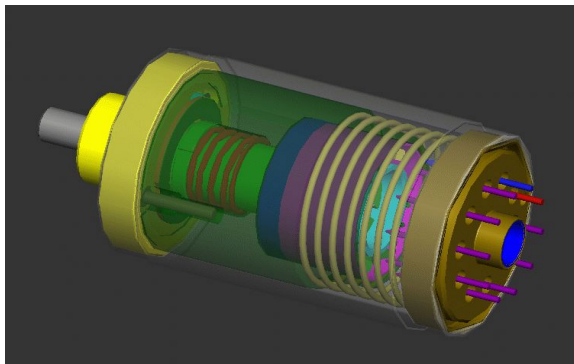
misura di accelerazione lineare basata sulle **forze inerziali** (senza “contatto”)

- 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)

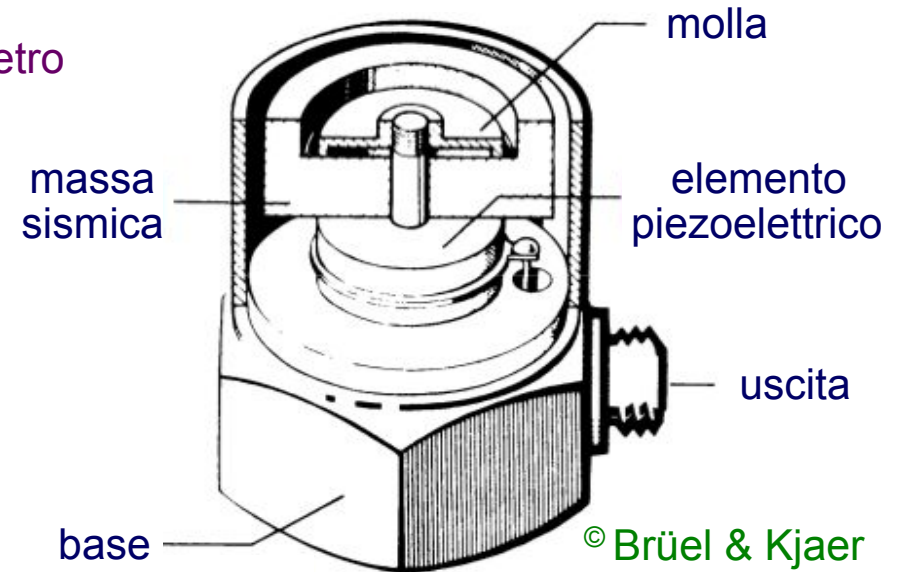
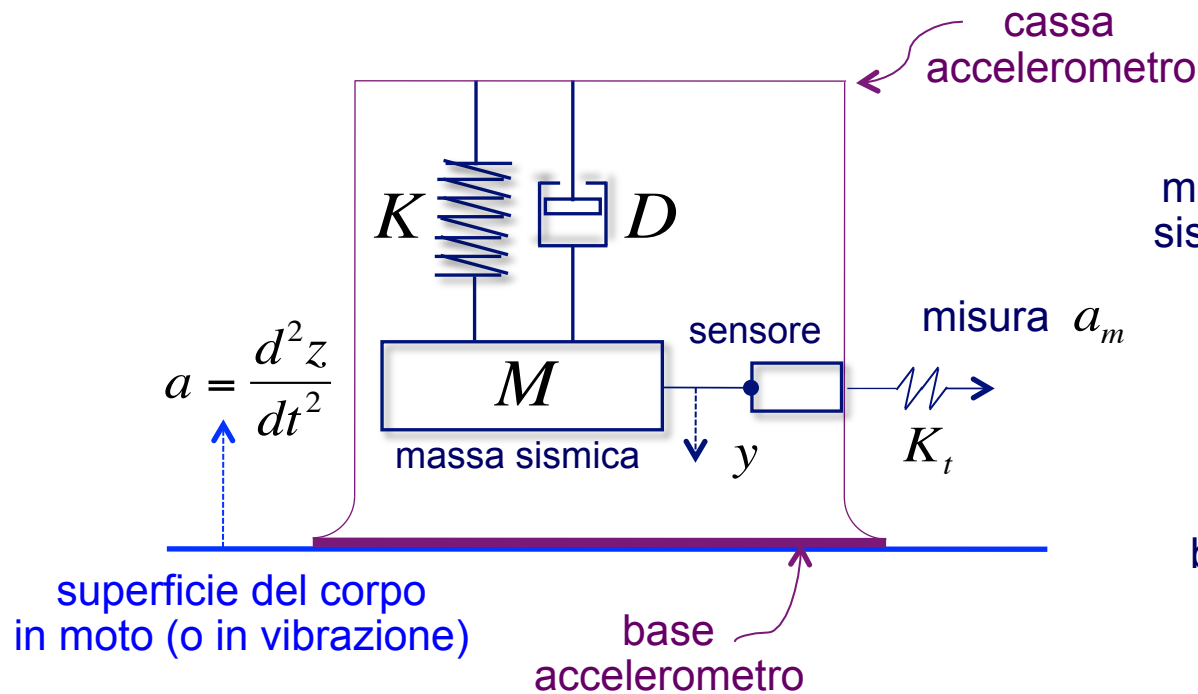
uso in molteplici applicazioni: dall'analisi di vibrazioni alla navigazione a lungo raggio



animazione del  
principio di misura  
in un accelerometro  
piezoelettrico

# Principio di funzionamento

## accelerometro sismico



$$M a = M \ddot{y} + D \dot{y} + K y$$

$$a_m = K_t y$$

trasformata  
di Laplace

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

# Caratteristica in frequenza

accelerometro piezoelettrico

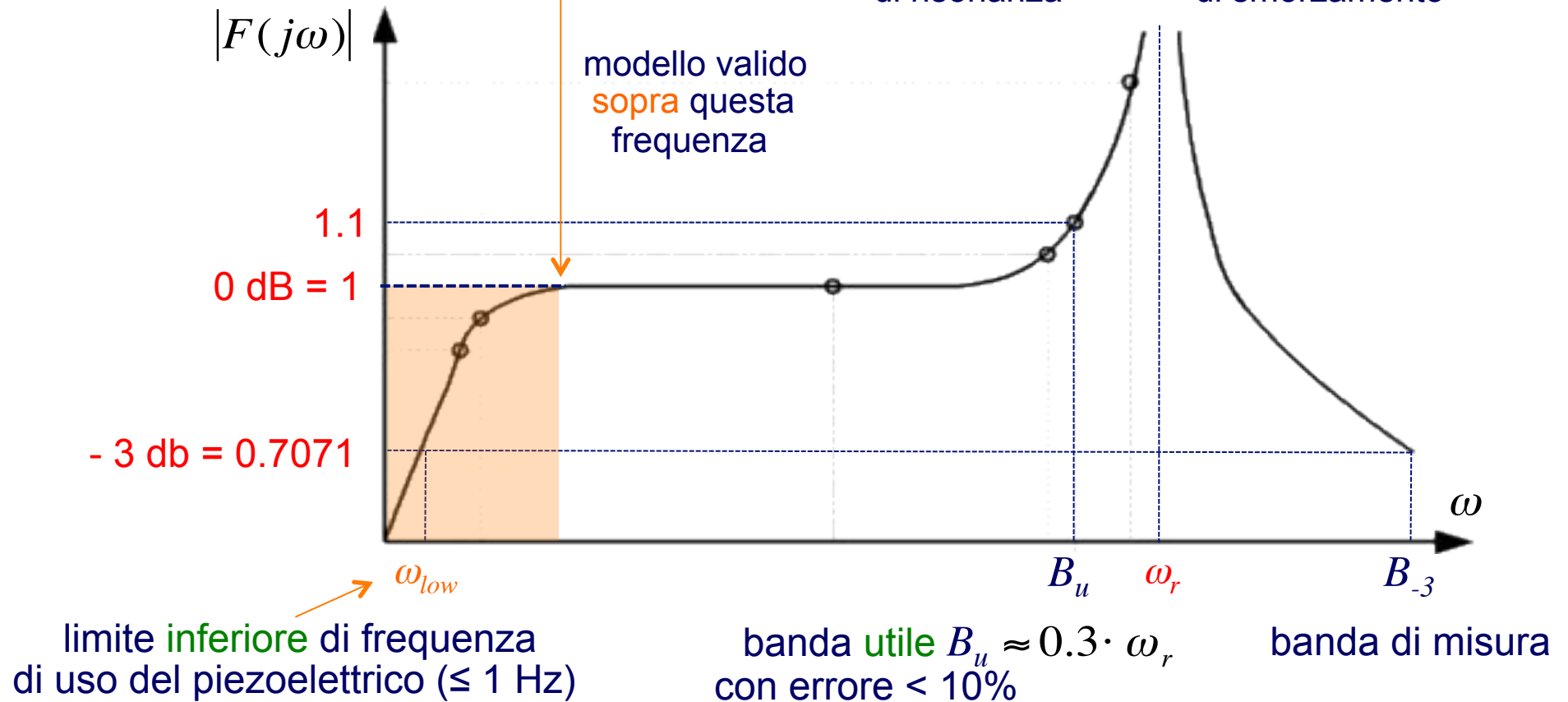
$$F(s) = \frac{A_m(s)}{A(s)} = \frac{K_t}{s^2 + (D/M)s + (K/M)}$$

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

frequenza  
di risonanza

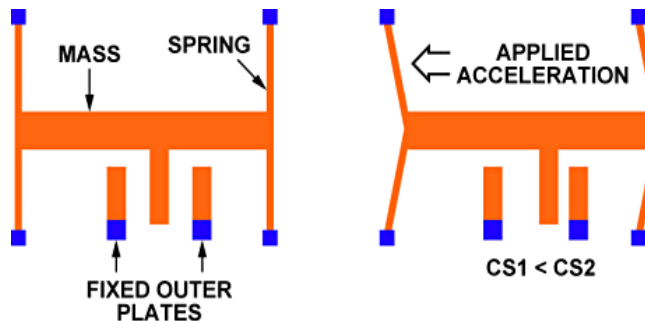
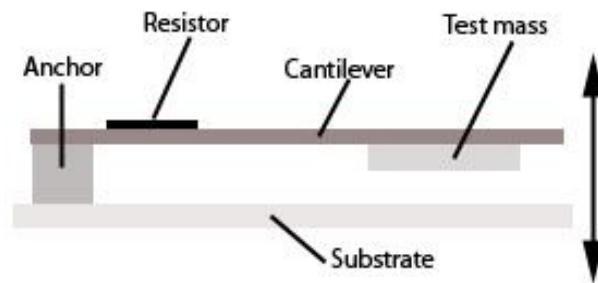
$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{KM}}$$

coefficiente  
di smorzamento

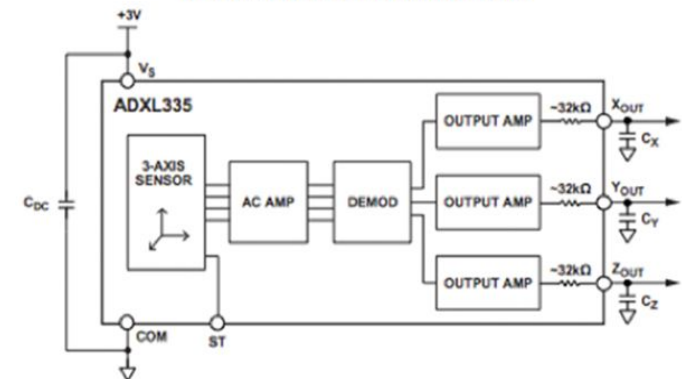
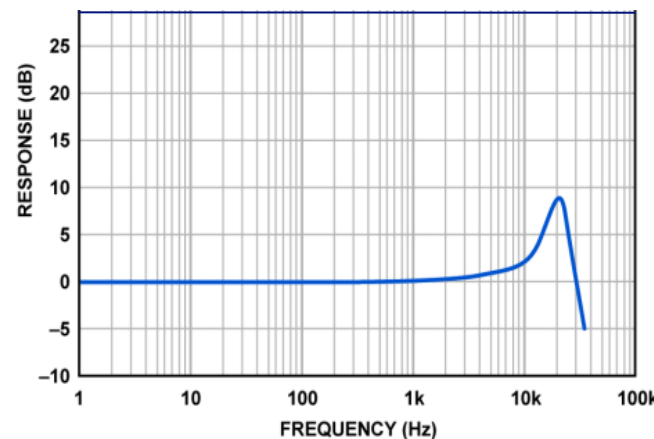
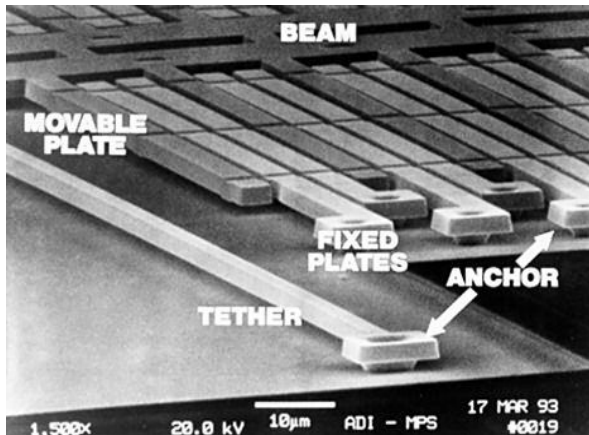


# Accelerometri MEMS

- 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,  $\pm 3$  g, con uscite pre-condizionate in tensione



# Altri sensori per l'automazione

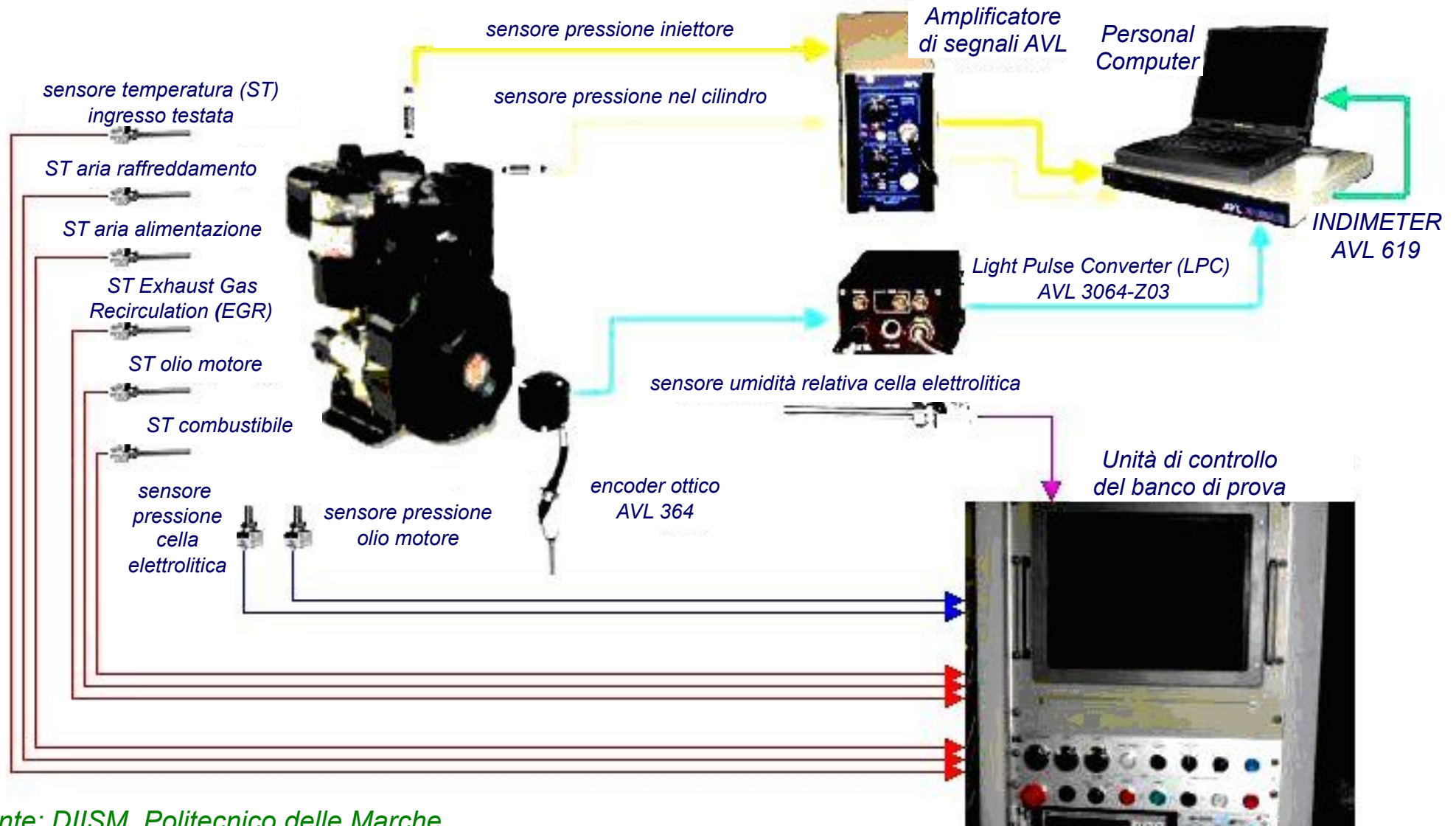
---

- ❑ bussole, GPS, giroscopi, piattaforme inerziali (IMU)
- ❑ celle di carico e sensori di forza/coppia
  - estensimetri (con ponte di Wheatstone), trasduttori piezoelettrici, torsionometri
- ❑ 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
  - 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 ...



# Esempio di suite sensoriali

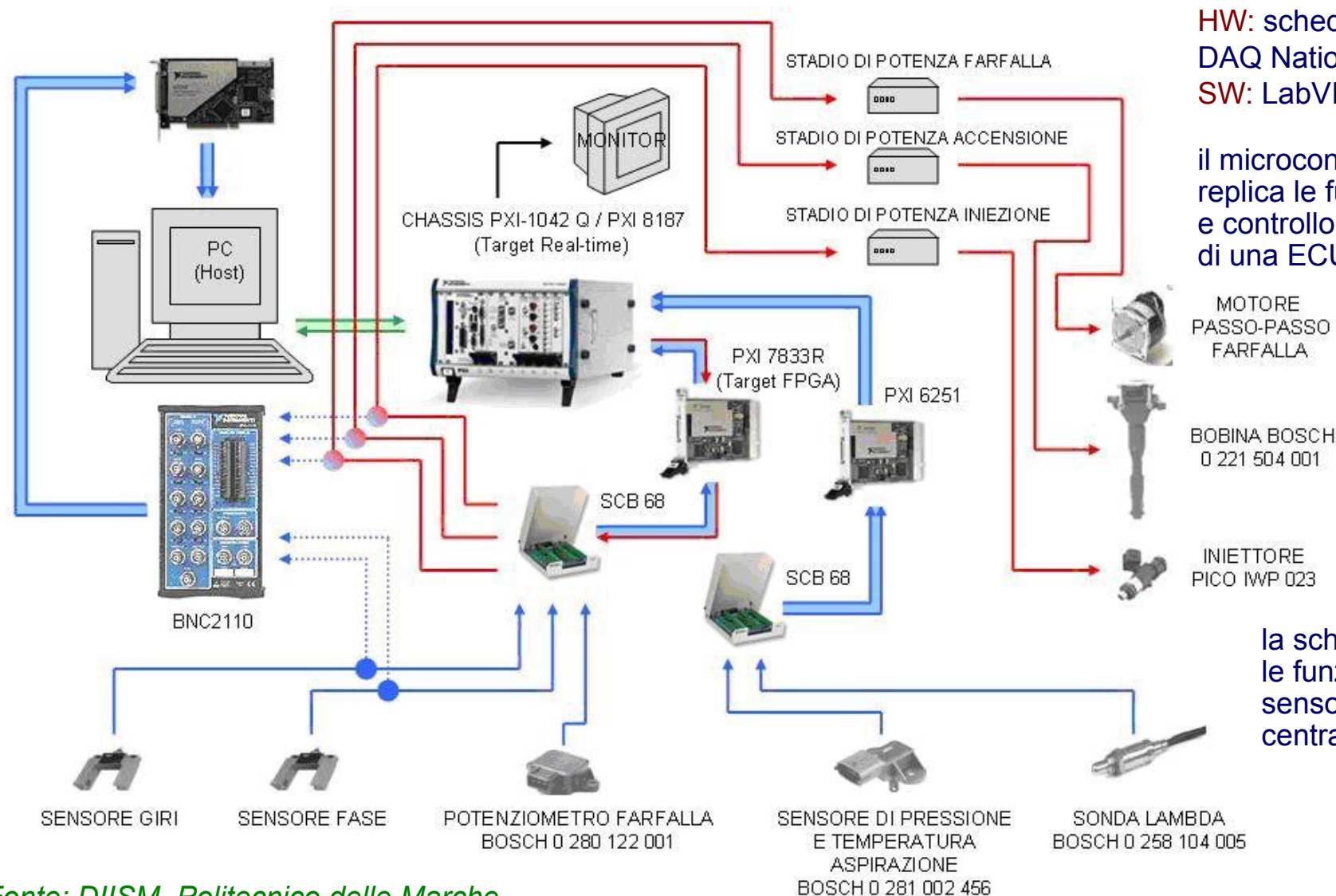
## Monitoraggio di motore diesel con miscele e analisi gas emessi ( $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{HC}$ , $\text{NO}_x$ )



Fonte: DIISM, Politecnico delle Marche

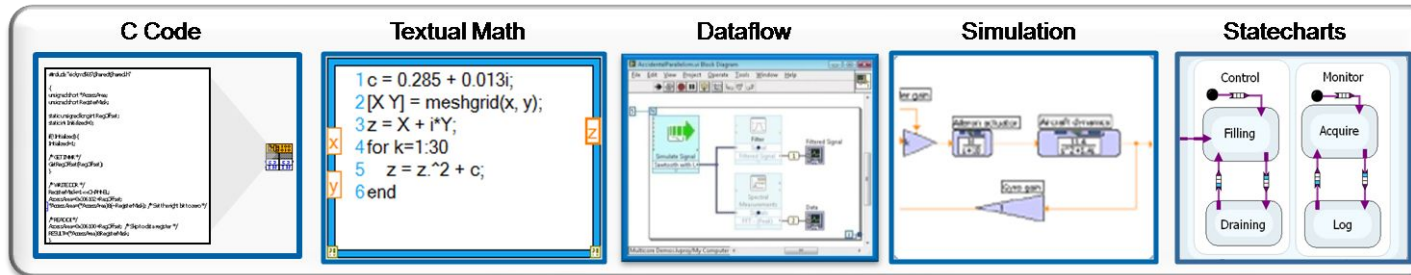
# Uso di sensori per automazione e controllo

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

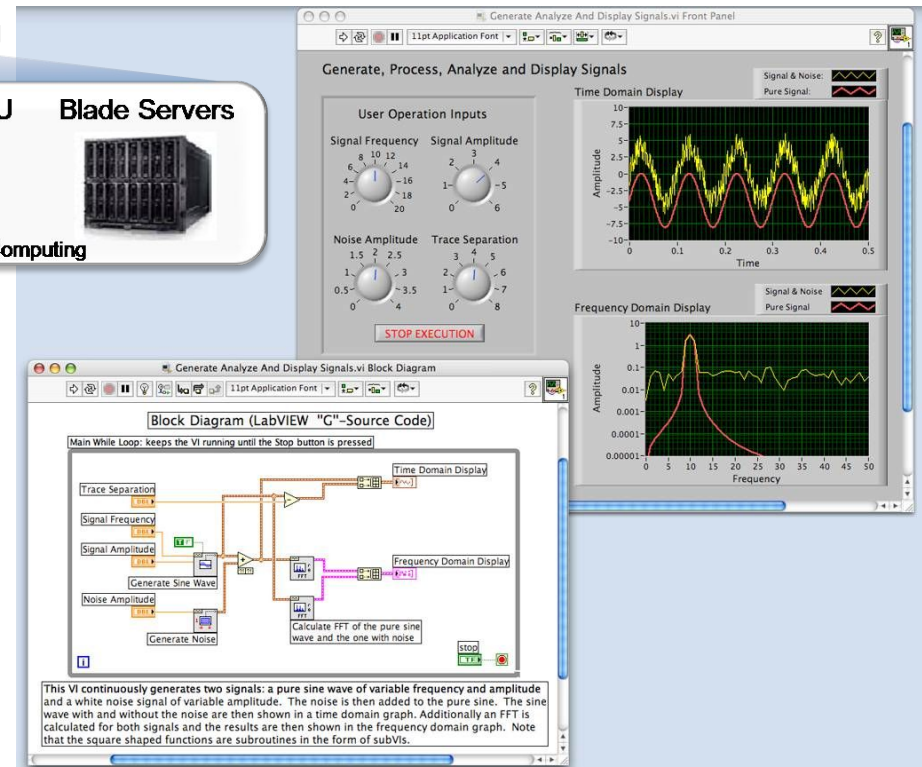
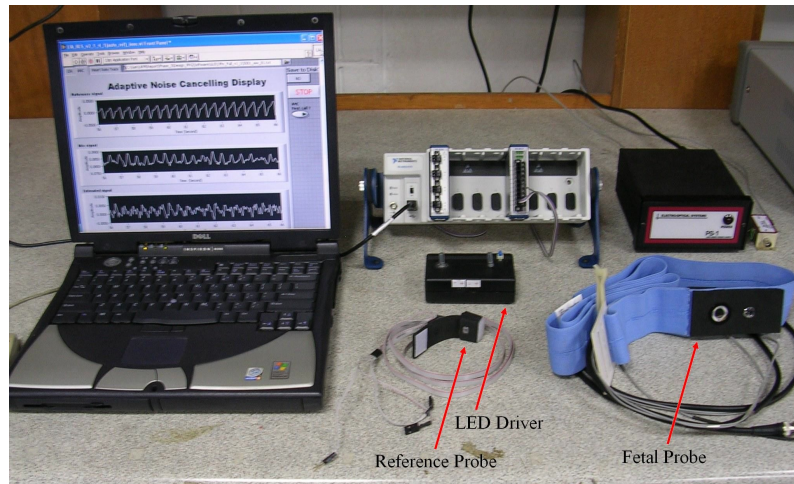


Fonte: DIISM, Politecnico delle Marche





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



- ❑ 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 proprietarie (CompactDAQ, CompactRIO) o di terze parti
- ❑ 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, Arduino, ...
- ❑ moduli dedicati alle applicazioni
  - visione, motion control, robotica (toolbox KUKA, ROS), monitoraggio e test automatizzati ...