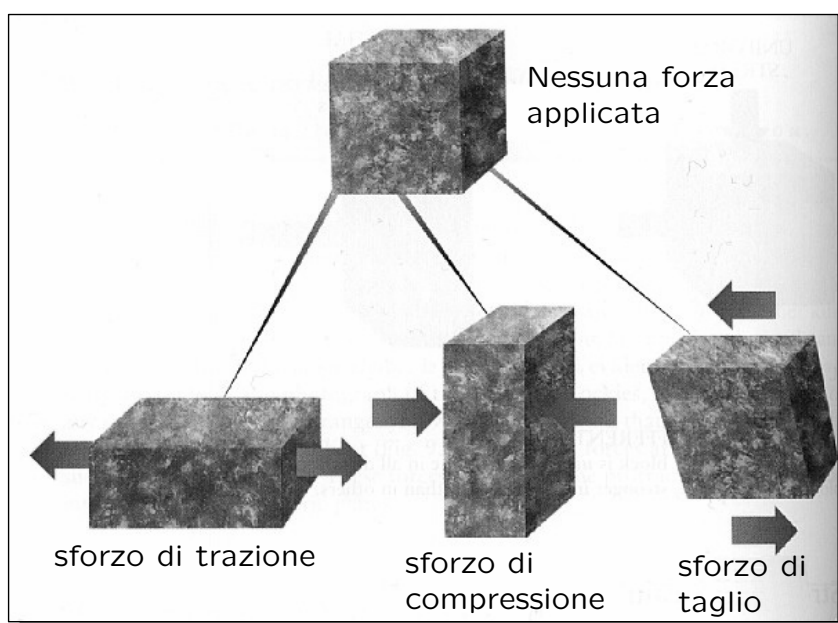


Sensori di deformazione (e forza)



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

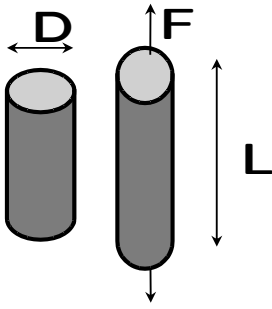
Sforzo e deformazione



- Sforzo (*stress*)
 - Si ha uno sforzo ogni qualvolta che si applica una forza ad un corpo [N/m^2].
- Deformazione (*strain*)
 - È il rapporto fra l'incremento di lunghezza di un corpo e la sua lunghezza originale [adimensionale]

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sforzo e deformazione



sforzo assiale: $\sigma_a = \frac{F_l}{A}$

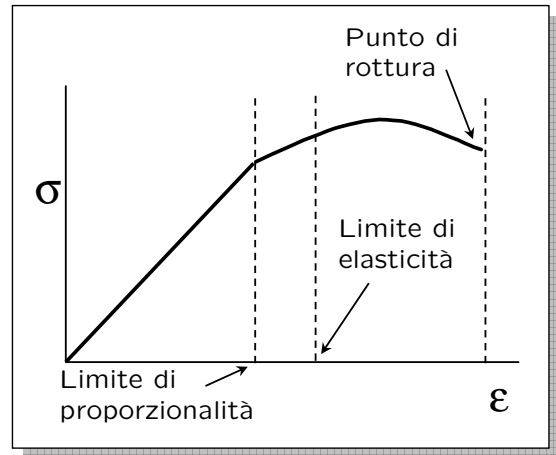
deformazione assiale: $\epsilon_a = \frac{\Delta L}{L}$

deformazione trasversale: $\epsilon_t = \frac{\Delta D}{D}$

modulo di Poisson: $\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} = -\frac{\Delta D/D}{\Delta L/L}$

(tipicamente = 0.3)

modulo di Young (o di elasticità): $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$



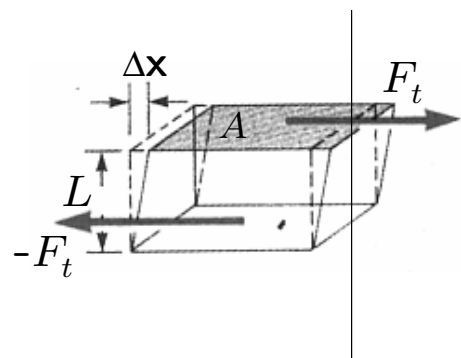
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sforzo di taglio

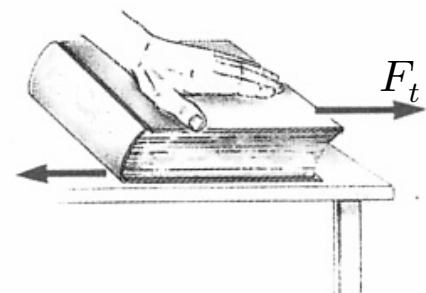
sforzo di taglio (*shear stress*): $\sigma_t = \frac{F_t}{A}$

scorrimento: $\epsilon_s = \frac{\Delta x}{L}$

modulo di scorrimento: $M_t = \frac{\sigma_t}{\epsilon_s}$



Esempio:



Materiale	E (N/m ²)	M _t (N/m ²)
Acciaio	20 × 10 ¹⁰	8.4 × 10 ¹⁰
Alluminio	7.0 × 10 ¹⁰	3.0 × 10 ¹⁰
Ferro	19 × 10 ¹⁰	7.0 × 10 ¹⁰
Ottone	9.1 × 10 ¹⁰	3.6 × 10 ¹⁰
Piombo	1.6 × 10 ¹⁰	0.56 × 10 ¹⁰
Rame	11 × 10 ¹⁰	4.2 × 10 ¹⁰
Vetro	(6.5÷7.8) × 10 ¹⁰	(2.6÷3.2) × 10 ¹⁰
Tungsteno	35 × 10 ¹⁰	14 × 10 ¹⁰

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Trasduttori di deformazione

- Estensimetri (*strain gages* o *gauges*)
 - Si basano sul principio per cui la resistenza elettrica di un materiale varia con la deformazione
 - Misurano deformazioni locali e in una direzione, oppure in più dimensioni qualora si usino estensimetri a rosetta (*rosette gages*)
 - Sono i sensori di deformazione più utilizzati
- Trasduttori piezoresistivi
 - Utilizzano come elemento deformabile un cristallo di silicio (chip) sul quale si realizzano resistenze estensimetriche mediante tecniche di diffusione.
- Risonatori su silicio
 - Realizzati su silicio, la frequenza di risonanza dipende dalla deformazione trasversale del risonatore
- Trasduttori induttivi (vedi trasformatore diff. lineare, LVDT)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Estensimetri (*strain gages*)

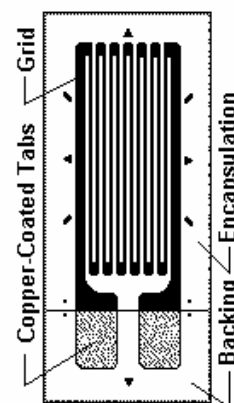
- Sono conduttori che se sottoposti a trazione elastica modificano la loro resistenza elettrica

$$R(L) = \rho \frac{L}{A}$$

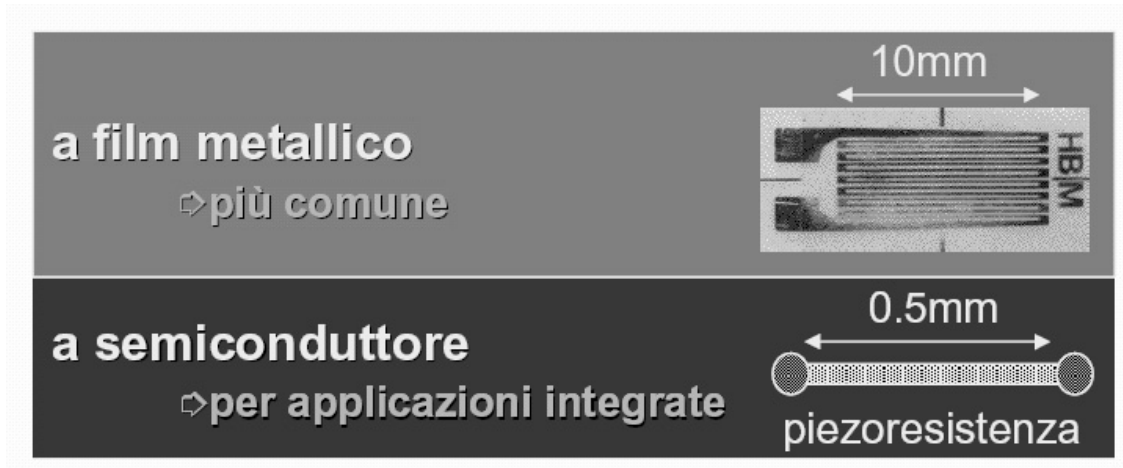
L = lunghezza del conduttore
 A = area della sezione trasv. del conduttore
 ρ = resistività

- All'aumentare della deformazione, L cresce, e quindi R cresce
- All'aumentare della deformazione, A decresce, e quindi R cresce
- Per la maggior parte dei materiali, all'aumentare della deformazione ρ cresce, e quindi R cresce ulteriormente

CEA-Series Strain Gage



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08



Gage factor

• Gage factor: $\lambda = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$

(indicato anche con GF o F in letteratura)
Dipende dal materiale con cui è fatto l'estensimetro)

• Proprietà: $\lambda = \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon_a} + 1 + 2\nu$

differenziale della funzione $R(\rho, L, A)$ rispetto a (ρ, L, A)

Infatti:

$$\Delta R = \Delta \left(\frac{\rho L}{A} \right) = \frac{L}{A} \Delta \rho + \frac{\rho}{A} \Delta L - \frac{\rho L}{A^2} \Delta A$$

$$A = CD^2,$$

$$C = 1 \text{ (quadrato)}, C = \pi/4 \text{ (cerchio)}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{2\Delta D}{D}$$

$$\lambda = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L} + 1 - 2 \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L} = \frac{\Delta \rho/\rho}{\epsilon_a} + 1 + 2\nu$$

spesso trascurabile

• Trasduzione: $\frac{\Delta R}{R} = \lambda \epsilon_a$

Strain gage: Valori tipici

- Per avere alta sensitività, si useranno materiali con gage factor elevato
- Il gage factor di solito è compreso fra 1.6 e 4 (es: 2 per la costantana), ma per alcuni semiconduttori arriva fino a 200
- Se la resistività ρ non cambia con la deformazione: $\lambda = 1 + 2\nu$ (per $\nu=0.3$, $\lambda=1.6$)
- Resistenza elettrica R:
 - 120÷350 Ω
 - 1000 Ω per materiali plastici
- La deformazione assiale ϵ_a di solito varia fra 10^{-6} a 10^{-3} , il che vuol dire che per $R = 240 \Omega$, $\Delta R = \lambda(0.00024 \div 0.24) \Omega$ (molto piccola !)

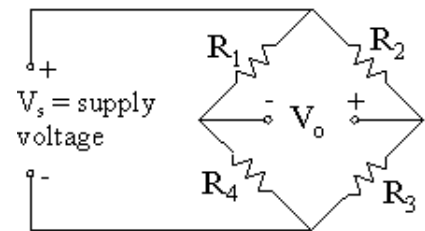
$$\Delta R = \lambda \epsilon_a R$$

ΔR di solito si misura mediante ponte di Wheatstone

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Ponte di Wheatstone (*Wheatstone Bridge*)

- Circuito costituito da quattro resistori (R_1, R_2, R_3, R_4), alimentato da una tensione V_s
- Ipotesi: lo strumento che misura V_0 ha impedenza infinita



- Dalla legge di Ohm:
$$V_0 = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$
- Il ponte si dice bilanciato se $V_0=0$
 - a. I resistori sono identici: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$
 - b. Risulta $R_3 R_1 = R_4 R_2$, ossia $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

In questo caso è facile dimostrare che

$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

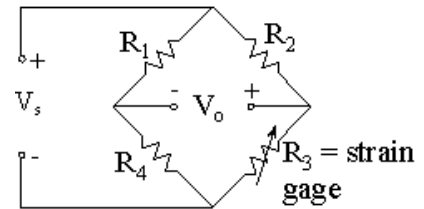
Quarter Bridge Circuit

- $R_3(\epsilon_a)$ = resistenza dello strain gage
- Ipotesi: $V_0=0$ a deformazione nulla, e

$$R_2 = R_3, R_1 = R_4$$

Es:

- $R_3(0) = 120 \Omega$
- $R_1=R_2=R_4=120 \Omega$



$$V_0 = V_s \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

- In queste ipotesi, con facili manipolazioni algebriche si ottiene

$$V_0 = \frac{1}{4} V_s \lambda \epsilon_a$$

Nota: se $R_1 = K R_4$ dove $K = R_2 / R_3$, si ottiene $V_0 = \frac{K}{(K+1)^2} V_s \lambda \epsilon_a$, che è massima per $K=1$, ovvero per $R_2 = R_3$ e $R_1 = R_4$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

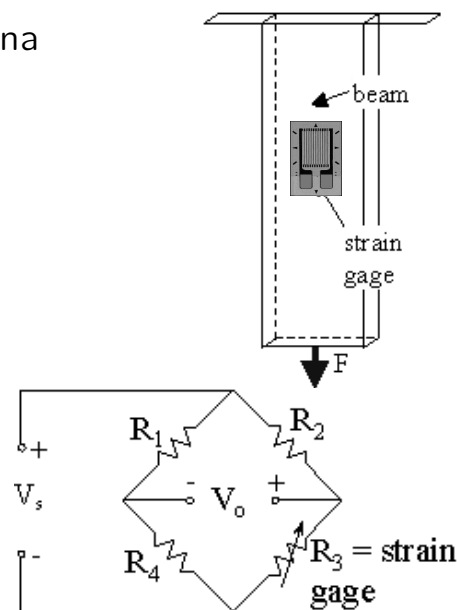
Quarter Bridge Example

- Esempio: determinare la deformazione di una barra sottoposta a trazione
 - $V_s = 5 \text{ V}$
 - $\lambda = 1.8$
 - Ponte bilanciato in assenza di carico F

Applicando il carico F , si misura $V_0 = 2.1 \text{ mV}$

$$\epsilon_a = 4 \frac{V_0}{V_s} \frac{1}{\lambda} = 4 \frac{2.1 \text{ mV}}{5000 \text{ mV}} \frac{1}{1.8}$$

... 0.000930 strain = 930 microstrain

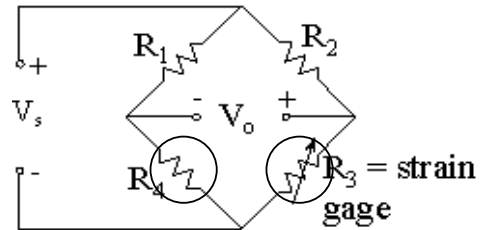
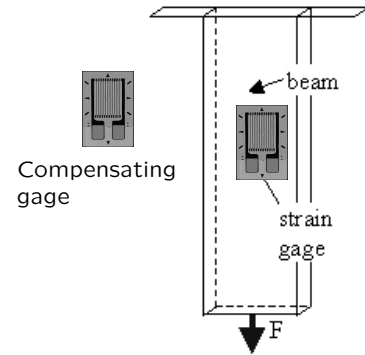


Problema: le variazioni di R dovute alla deformazione sono dello stesso ordine di quelle dovute alla variazione della temperatura

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Compensazione della temperatura

- Soluzione 1: Estensimetri autocompensati. Hanno un λ tale da compensare gli effetti della dilatazione termica del corpo a cui sono applicati
- Soluzione 2: Agire a livello di ponte di Wheatstone, applicando un secondo estensimetro (al posto di R_2 o R_4), che però non viene sollecitato
- Esempio: $R_1 = R_2 = R$
 $R_4 = R + \Delta R(T)$
 $R_3 = R + \Delta R(T) + \Delta R(L)$



Si ottiene ancora V_0 per ogni T

$$V_0 \approx \frac{1}{4} V_s \lambda \epsilon_a$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

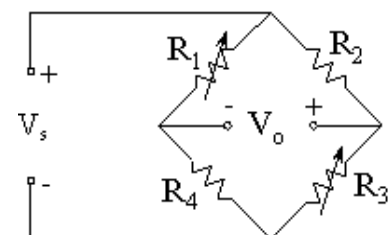
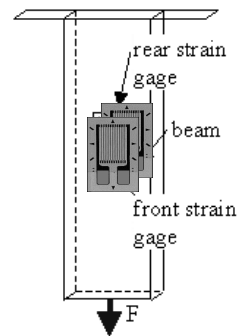
Half Bridge Circuit

- Usiamo adesso due strain gage (entrambe attivi)
- Ipotesi: ponte inizialmente bilanciato
- Ricordando che

si ottiene
$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

$$V_0 = \frac{1}{2} V_s \lambda \epsilon_a$$

- Il circuito half bridge produce una tensione doppia rispetto al quarter bridge (sensibilità raddoppiata)



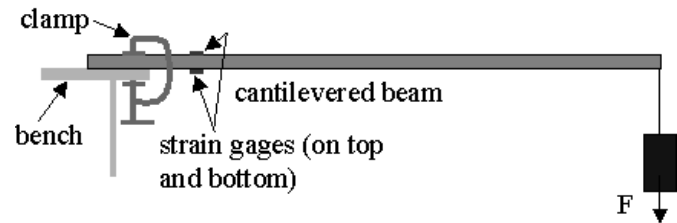
NB: se avessimo messo lo strain gage su R_2 avremmo avuto $V_0 = 0$!

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Esempio con due gage attivi

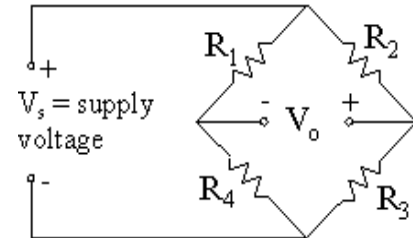
- Avendo un gage in tensione ed uno in compressione, si ha

$$\Delta R_{\text{compressione}} = -\Delta R_{\text{tensione}}$$



- Dove dobbiamo posizionare gli strain gage nel ponte di Wheatstone ?

$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\underbrace{\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2}}_{\text{Scelta 1}} + \underbrace{\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}}_{\text{Scelta 2}} \right]$$

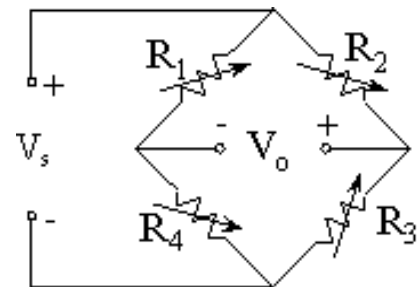


- Le uniche scelte possibili sono le posizioni 1 e 2 oppure 3 e 4 (altrimenti $V_0=0$)

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Full Bridge Circuit (4 gage attivi)

- Tutti i resistori sono sostituiti dagli strain gage
- Attenzione a come collegare gli strain gage:



- ad esempio R_1 e R_3 devono avere deformazione positiva, mentre R_2 e R_4 negativa

$$V_0 \approx V_s \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

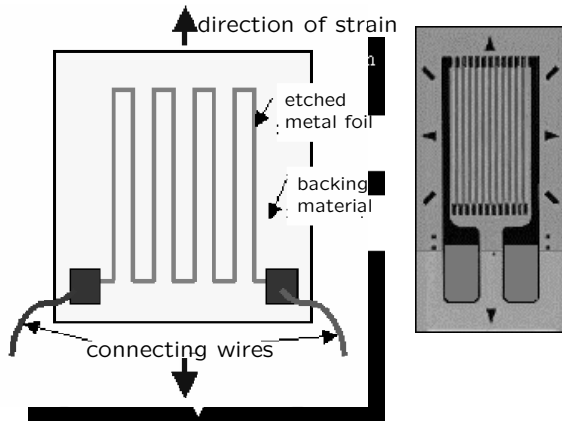
- La sensibilità è 4 volte maggiore rispetto alla configurazione quarter bridge

$$V_0 = V_s \lambda \epsilon_a$$

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Tipi di strain gage

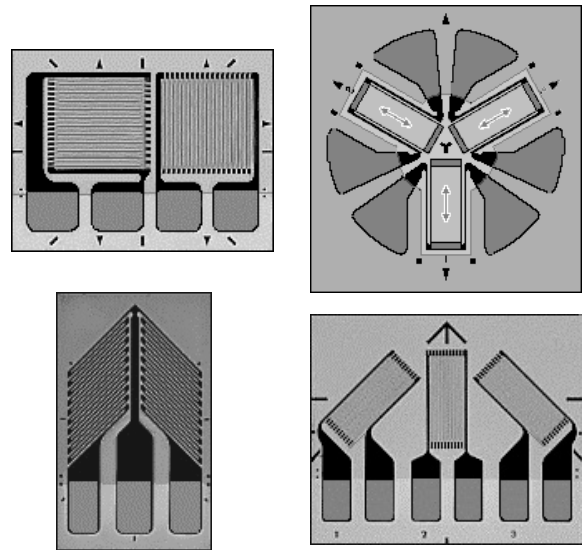
A elemento singolo



Viene misurato lo sforzo medio sull'area occupata dal gage

La dimensione del gage è importante !

A rosetta

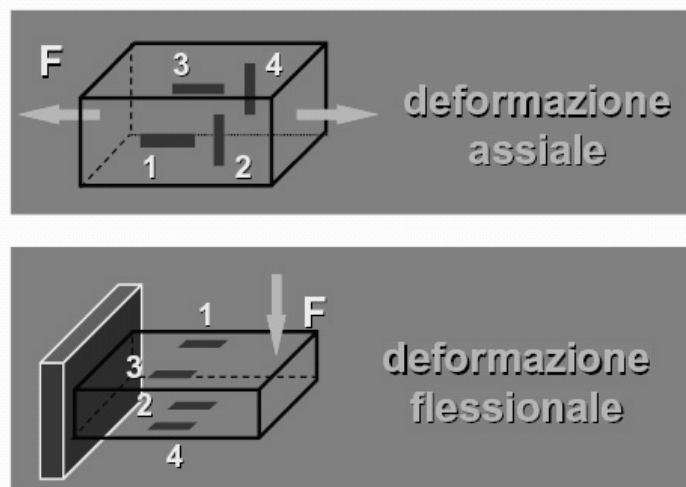


*Le componenti dello sforzo si ricavano dalle tensioni misurate risolvendo un set di equazioni

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Misura di forza

Estensimetri incollati su una struttura metallica che si deforma con l'applicazione della forza



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

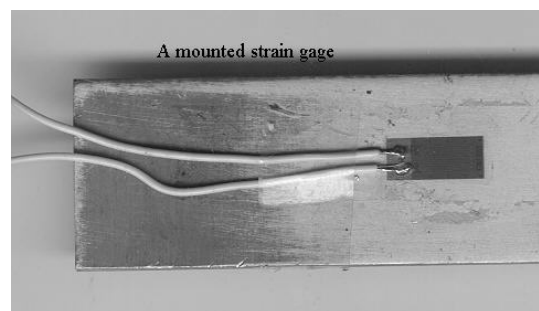
Caratteristiche tecniche essenziali

parametro	film metallico	semiconduttore
GF	$\approx 2 \pm 1\%$	$\approx 100 \pm 3\%$
Rnom(Ω)	120, 350	molti valori
$\Delta R / \Delta T$ (p.p.m / $^{\circ}\text{C}$)	5÷50	100÷500
linearità	dipende dall'allestimento meccanico	

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Strain Gages

- Normally strain gages are accurate to $\pm 1\%$. However, mounting (**orientation and bonding**) and environmental errors introduce additional uncertainty, $\pm 1\%$ to 3% .
 - Or much worse!!
- Measure strains from 1×10^{-6} to 0.2 inch/inch. Can be applied to nearly any surface.
- Frequency response is on the order of 50 kHz.
- Gage selections based on:
 - Gage alloy selection, number of gages, gage length, gage width, solder tab type, gage pattern, temperature compensation, grid resistance, accuracy, stability, cyclic endurance, operating environment, and installation requirements.



** \$65 to \$100/hr to install

(i.e. approximately 1 hour per gage) to install a strain gage which includes surface prep, attachment (bonding) and wiring

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Potential Error Sources with Strain Gages

- Applications Errors
 - Gage may be damaged during installation.
 - Need to verify resistance before stress.
- Electrical noise - Electrical and Magnetic fields
 - Utilizing shielded lead wires and insulated coatings.
 - Utilize twisted lead wires.
- Thermally induced voltages caused by thermocouple effects at the junction of dissimilar metals in strain gage circuit.
- Temperature effects
 - Thermal expansion of materials affects measured strain.
 - Self heating of strain gages!

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Strain Measurements

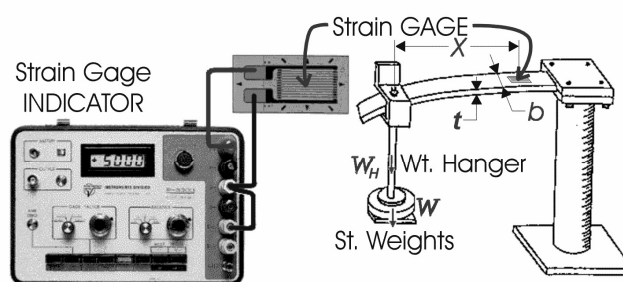
- Strain measurements are made over a finite length of material.
 - Smaller the length the more closely the measurement will approximate the strain at a particular point.
 - The length over which strain measurement is taken is called the base length.

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

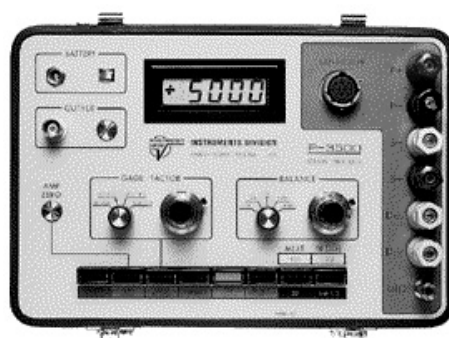
www.measurementsgroup.com

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Strain Gage Indicator



CANTILEVER BEAM STRAIN MEASUREMENT

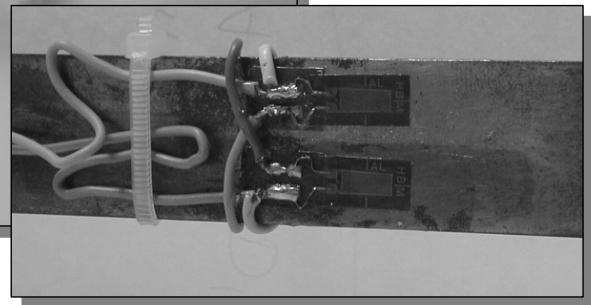


Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



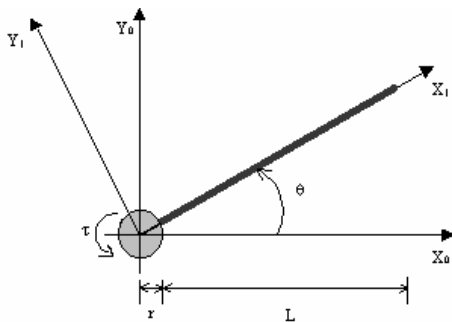
Departamento de Engenharia Mecânica
Grupo de Controlo, Automação e Robótica



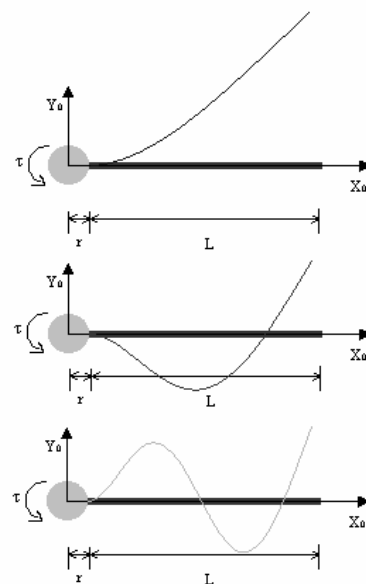
Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile

Movimento corpo rigido

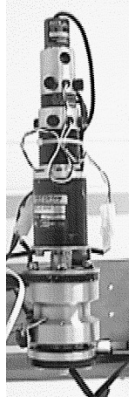


Modi di vibrazione



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

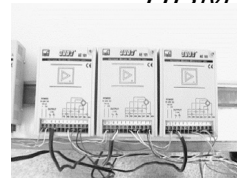
Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



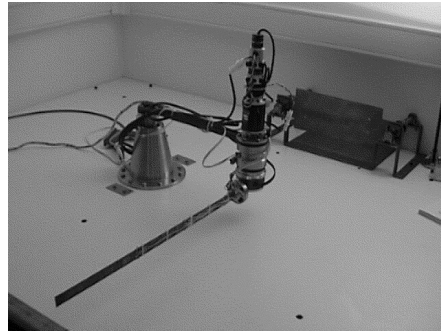
RH-14 Harmonic Drive

Servo Motor Dc
Tachimetro
Encoder

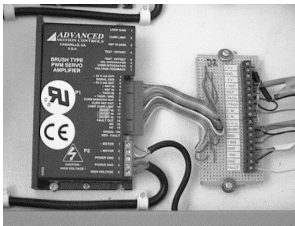
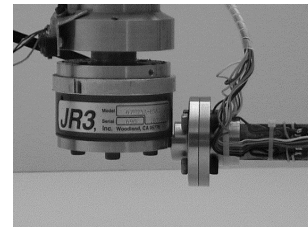
3 Ponte di estensimetri *AE101* della
HRM



- ext1 = 0.045 m
- ext2 = 0.18 m
- ext3 = 0.32 m

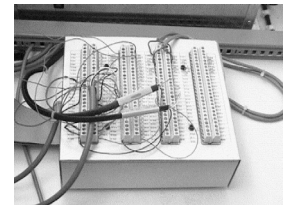


Sensore di Coppia JR3



Amplificatore di corrente:
12A8 *Advanced Motion Controls*

Scheda I/O *Servo to Go*, ISA Bus Servo



Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



controllo con/senza feedback
da estensimetri



controllo con/senza feedback
da estensimetri

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Applicazione: Controllo di un braccio flessibile



controllo ad anello chiuso

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08

Sensori di deformazione

Fine

Tecnologie dei Sistemi di Controllo - A. Bemporad - A.a. 2007/08