

Sensori meccanici

Caratterizzazione dei sensori meccanici:

- principio di funzionamento e grandezza misurata
 1. I segnali meccanici di maggior interesse
 2. Pressione ed accelerazione (le unità di misura del S.I.)
 3. Definizione del tensore degli sforzi e del tensore delle deformazioni elastiche
 4. Gli elementi strutturali utilizzati nei sensori
 5. Tecniche di fabbricazione di strutture micromeccaniche integrate (MEMS)

Sensori meccanici

Caratterizzazione dei sensori meccanici:

- tipi di dispositivi, circuito di lettura (read-out) e modello del sensore (sensibilità)

1. Sensori piezoelettrici:

1.1 sensore di accelerazione PI-FET (Chen et al., 1980)

2. Sensori piezoresistivi:

2.1 sensore di pressione ad alta precisione per applicazioni biomediche (Samaun et al., 1973)

2.2 sensore MAP (MOTOROLA)

Sensori meccanici

2.3 sensore di accelerazione per
applicazioni biomediche
(Roylance&Angell, 1978)

2.4 sensore di accelerazione a 3 assi
(FUJIKURA)

3. Sensori capacitivi:

3.1 sensore di accelerazione verticale
(Petersen et al., 1982)

3.2 sensore di accelerazione laterale
ADXL (ANALOG DEVICES)

I segnali meccanici di maggior interesse

- pressione/stress
- accelerazione/decelerazione
- spostamento
- torsione
- posizione
- angolo
- forza
- ...

Principali applicazioni dei sensori di pressione

Applicazione	Range di valori
Pressione nel manicotto del collettore	15 - 250 kPa
Pressione nel condotto del carburante	15 - 400 kPa
Pressione degli pneumatici	1,8 –2,5 bar
Pressione del sangue (max 120 – 130 mmHg; min 70 – 80 mmHg)	30 - 300 mmHg
Pressione barometrica	in hectopascal = mbar o in mmHg

Principali applicazioni dei sensori di pressione

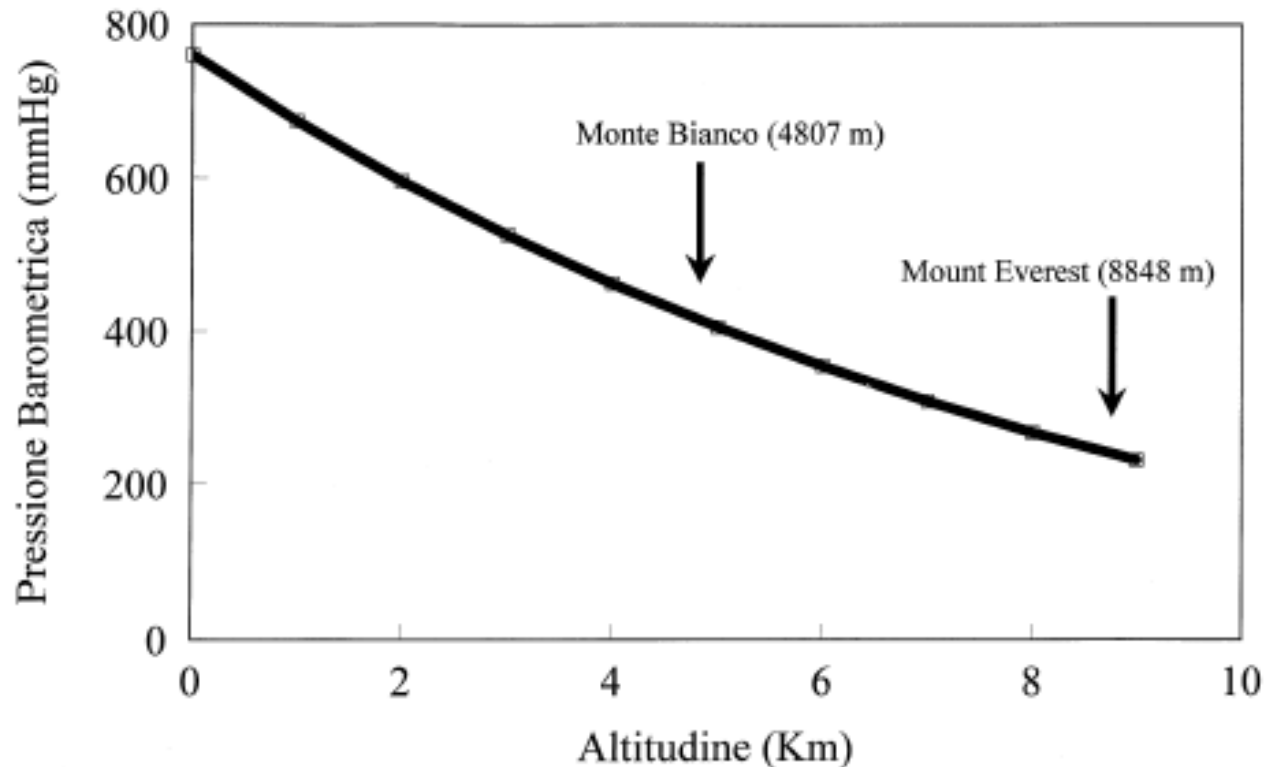


Figura 1. *Modificazione della pressione barometrica in relazione all'altitudine secondo le tabelle dell'Organizzazione dell'Aviazione Civile Internazionale.*

Unità di misura della pressione

1 Pa	Sistema Internazionale
1 KPa	1e3 Pa
1 kgf/m ²	9,8 Pa (g = 9,8 m/s ²)
1 psi (pound-force per square inch)	6,89e3 Pa (1inch = 25.4mm; 1Kg = 2,2046p)
1 mmHg (= 1 Torr)	1,33e2 Pa (p _{Hg} = 13,59 g/cm ³)
1 atm	760 Torr = 1,01e5 Pa
1 bar	1e5 Pa

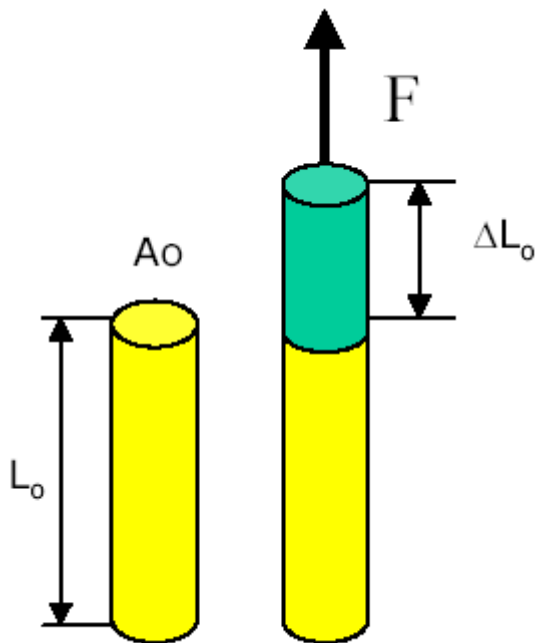
Principali applicazioni dei sensori di accelerazione

Applicazione	Range di valori
Sistema di esplosione airbag frontale	+/- 50 g
Sistema di esplosione airbag laterale	+/- 100 – 250 g
Sistema di controllo delle sospensioni	+/- 2 g
Sistema ABS (Antilock Braking System)	+/- 1 g

Unità di misura: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Definizione del tensore degli sforzi e del tensore delle deformazioni

La forza e la deformazione dei solidi



sforzo (stress): $\sigma = F/A_0$ [Pa = N/m²]

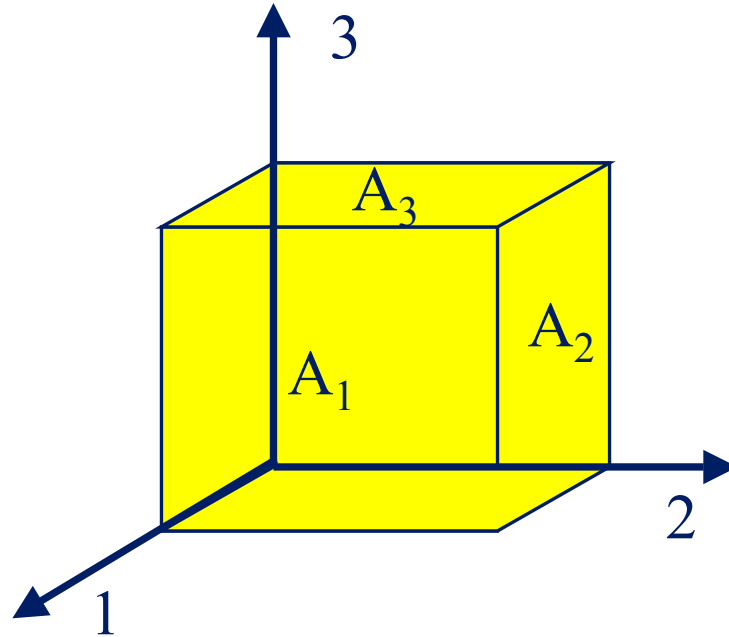
deformazione (strain): $\varepsilon = \Delta L_0/L_0$

LEGGE DI HOOKE:

$E = \sigma / \varepsilon$ modulo di Young [Pa]

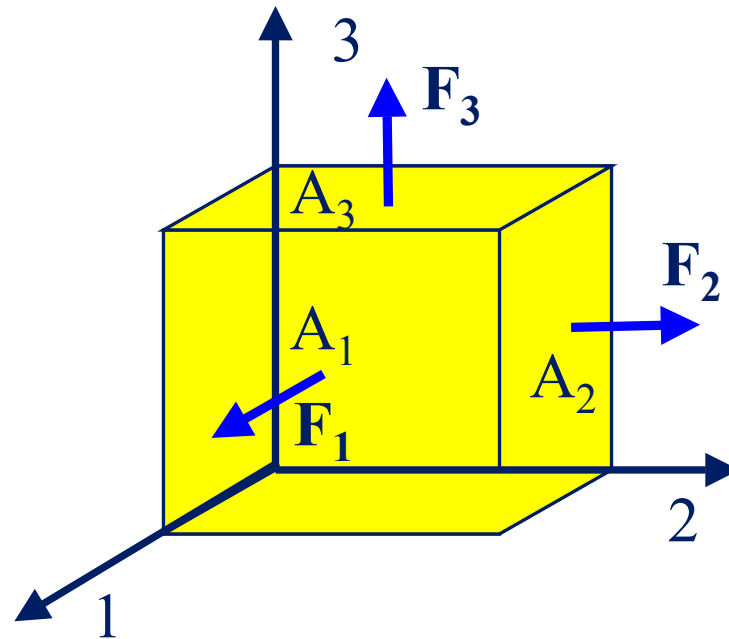
Definizione del tensore degli sforzi e del tensore delle deformazioni

- Forze volumetriche (es. forza di gravità)
- Forze superficiali (es. pressione, trazione, flessione)



Forze superficiali

- Forze normali (o assiali)



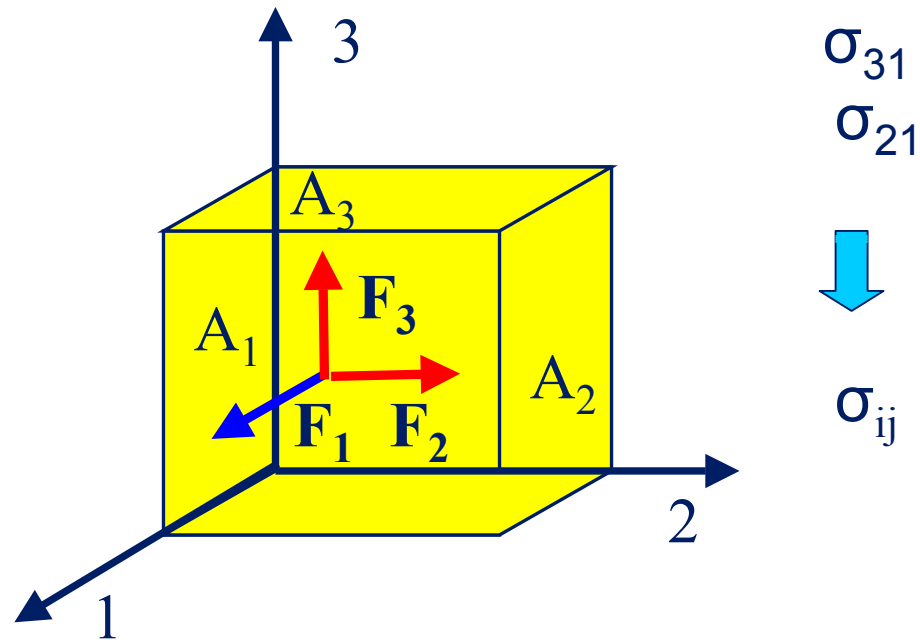
$$\sigma_{11} = F_1/A_1$$

$$\sigma_{22} = F_2/A_2$$

$$\sigma_{33} = F_3/A_3$$

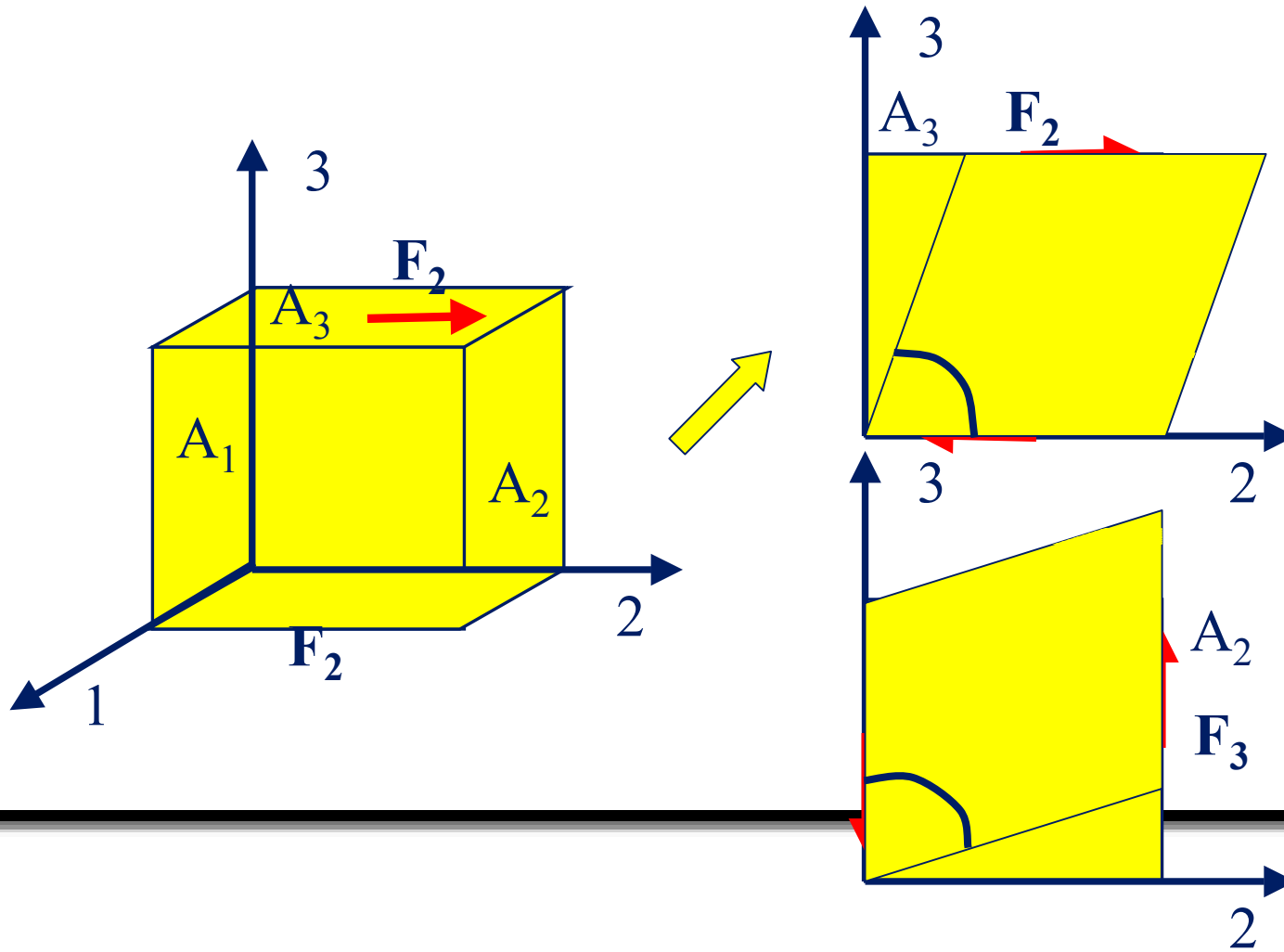
Forze superficiali

- Forze di taglio



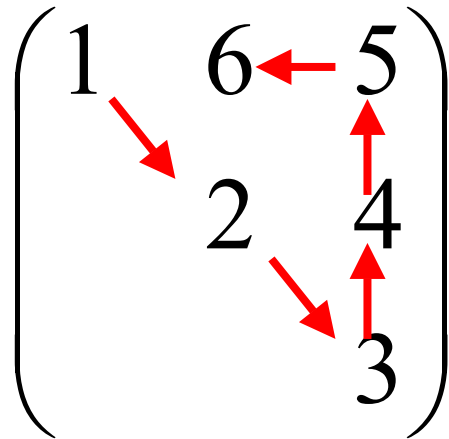
Forze superficiali

- Effetto della forza di taglio e simmetria del tensore σ_{ij}



Definizione del tensore degli sforzi

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

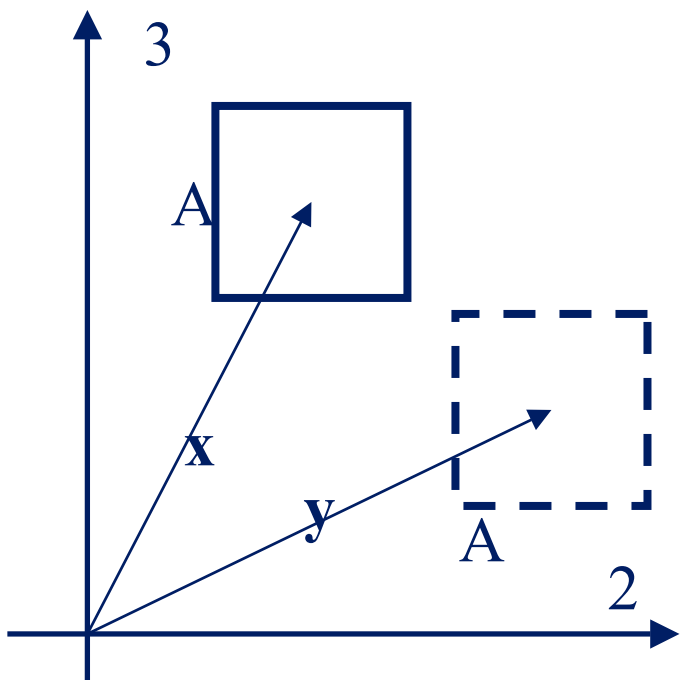


$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

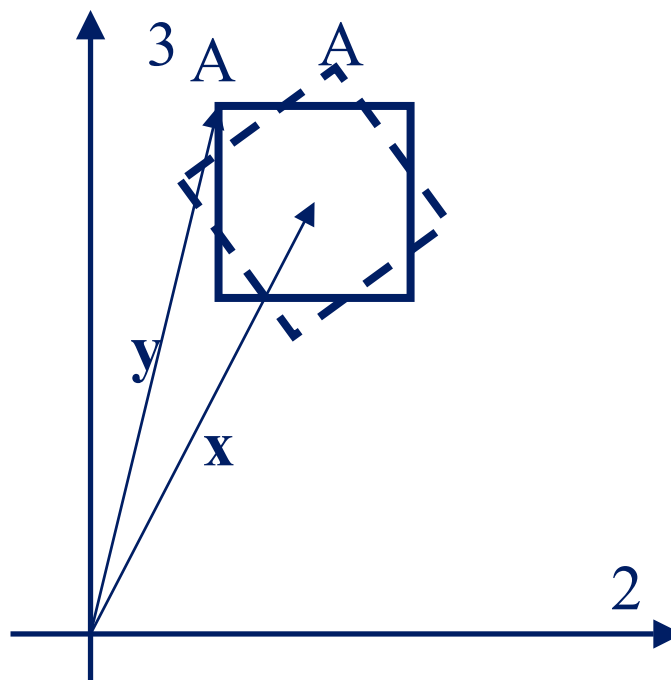
Ipotesi di mezzo continuo

- le dimensioni fisiche dei solidi devono essere molto più grandi delle strutture microscopiche che li costituiscono. Es. il silicio ha una struttura cristallina cubica a facce centrate con spigolo $a=5,431 \text{ \AA}$ (passo reticolare)
→ le microstrutture devono essere almeno 100 volte più grandi in ogni direzione: $L_{\min} \approx 50 \text{ nm}$.
- le forze volumetriche diventano meno importanti delle forze superficiali se consideriamo microstrutture:
con $l = 1 \text{ m}$ è $S/V = 6 \text{ m}^{-1}$;
con $l = 1 \text{ cm}$ è $S/V = 6 \text{ cm}^{-1} = 600 \text{ m}^{-1}$

Definizione del tensore delle deformazioni



$$\mathbf{t} = (\mathbf{y} - \mathbf{x})$$



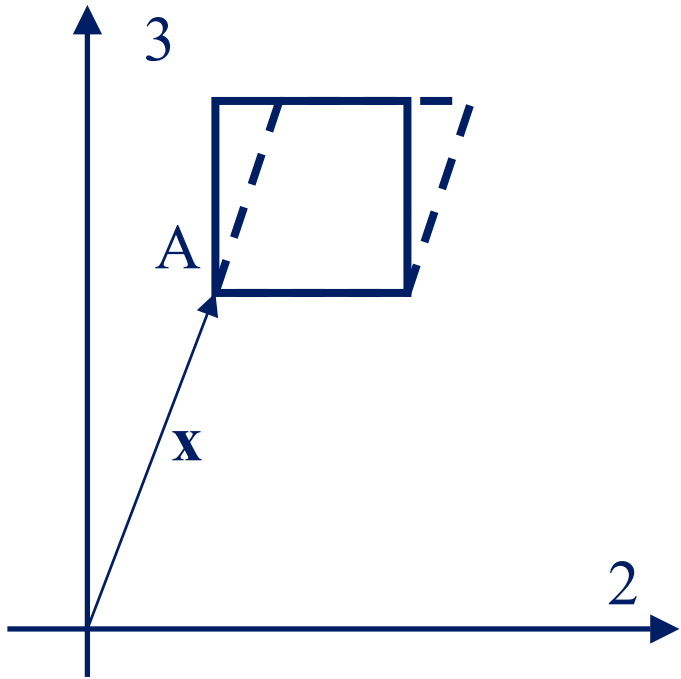
$$\mathbf{r} = \boldsymbol{\omega} \wedge (\mathbf{y} - \mathbf{x})$$

Definizione del tensore delle deformazioni

$$\overline{\omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$u = dx + \overline{\omega} dx$$

Definizione del tensore delle deformazioni



$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + (\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{u}) d\mathbf{x}$$

$$(\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{u})_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

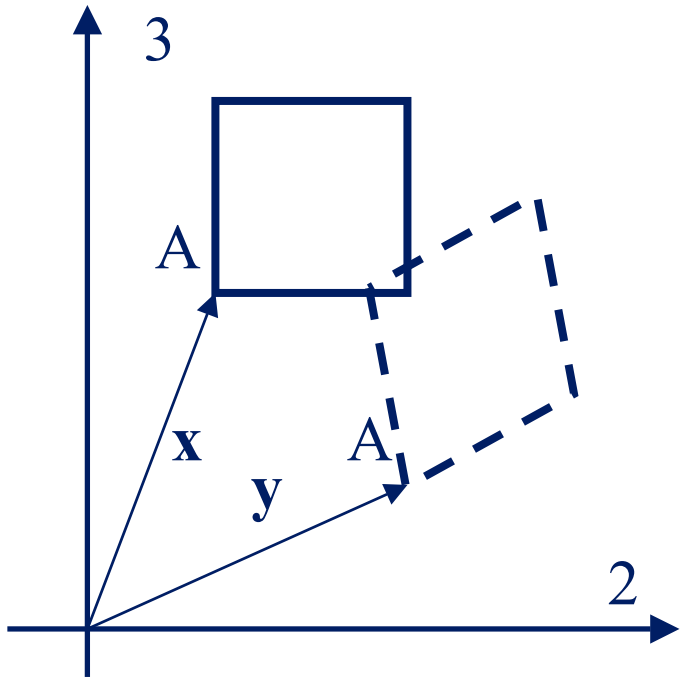
Definizione del tensore delle deformazioni

$$(\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{u})_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$(\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{u})_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

Definizione del tensore delle deformazioni



$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \overline{\overline{\boldsymbol{\omega}}} d\mathbf{x} + \overline{\overline{\boldsymbol{\varepsilon}}} d\mathbf{x}$$

La legge di Hooke (relazioni costitutive del mezzo)

$$\varepsilon_{hk} = \sum_{ij} b_{hk,ij} \sigma_{ij} \quad \text{mezzo isotropo}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{12} & b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

La legge di Hooke (relazioni costitutive del mezzo)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{12} & b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

I coefficienti di un mezzo isotropo sono:

$$b_{11} = 1/E, \quad b_{12} = -\nu/E, \quad b_{44} = 1/G$$

Equazione della dinamica per un mezzo sottoposto a deformazione elastica

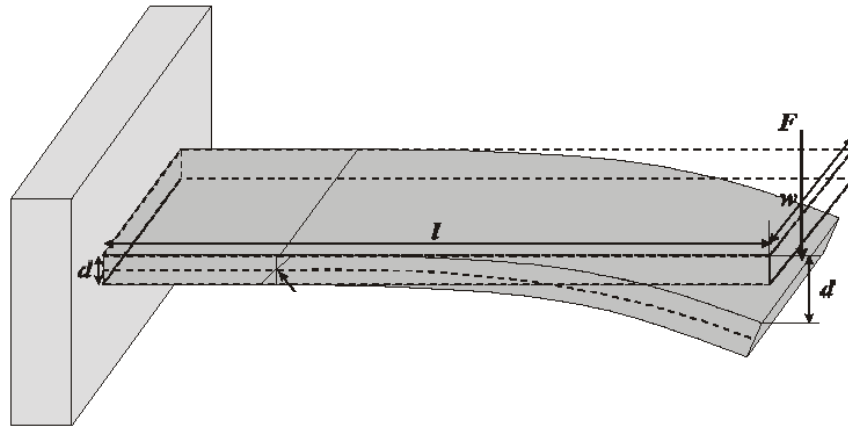
•Forze volumetriche $F_i^b = \int_V f_i^b dV$

•Forze superficiali $F_i^s = \int_S \sigma_{ij} n_j dS = \int_V \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV$

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i^b = \rho \dot{v}_i$$

Gli elementi strutturali utilizzati nei sensori

- Travi a sbalzo



- Membrane

