

# Corso di Robotica (ROB)

## Modulo Robotica Bioispirata

### Il tatto in robotica

Cecilia Laschi

Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna

[cecilia.laschi@sssup.it](mailto:cecilia.laschi@sssup.it)

050-883486



# Sommario della lezione

- Principali tecnologie per la realizzazione di sensori tattili artificiali:
  - principi di funzionamento e relazioni matematiche
  - esempi di realizzazione di sensori tattili
- Esempi di progettazione di sensori tattili bioispirati

# Sensori di contatto e sensori tattili

- Sensori di contatto:  
forniscono informazione binaria sul contatto rilevato sulla superficie del sensore
- Sensori tattili:  
forniscono informazione sulla forza applicata sulla superficie del sensore
  - solo intensità, lungo direzione normale
  - intensità e direzione (2 o 3 componenti del vettore forza)
- Entrambi i tipi possono essere organizzati in array (o matrici) per fornire immagini del contatto o immagini tattili

# Proprietà fondamentali di un sensore artificiale



- FUNZIONE DI TRASFERIMENTO
- CALIBRAZIONE (TARATURA)
- LINEARITÀ
- ISTERESI
- ACCURATEZZA
- RIPETIBILITÀ
- RISOLUZIONE
- SENSIBILITÀ
- SENSIBILITÀ AL RUMORE
- VITA UTILE
- STABILITÀ

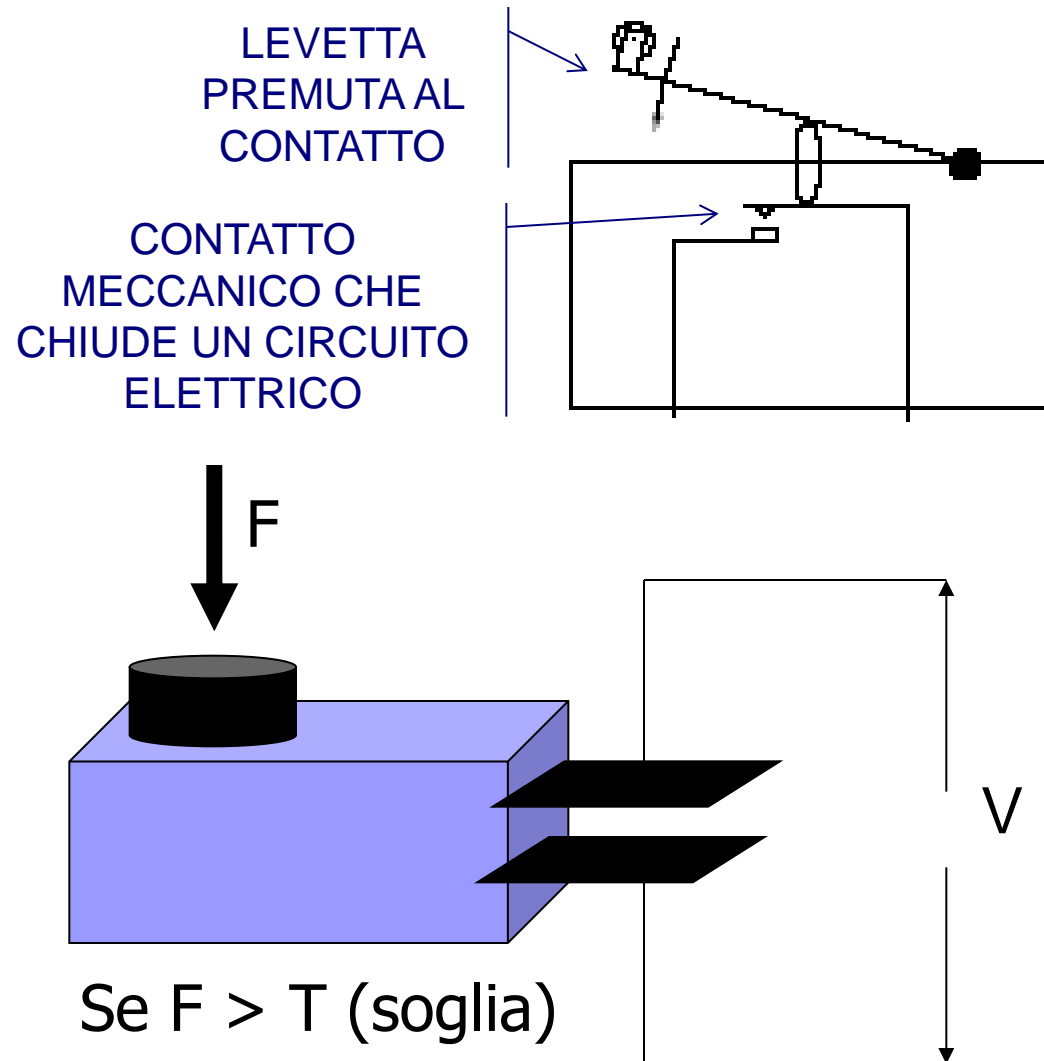


# Principali tecnologie

- Sensori meccanici: switch come sensori tattili
- Sensori piezoresistivi
- Sensori piezoelettrici
- Sensori ottici
- Sensori FSR
- Sensori QTC

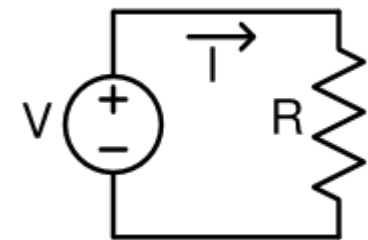
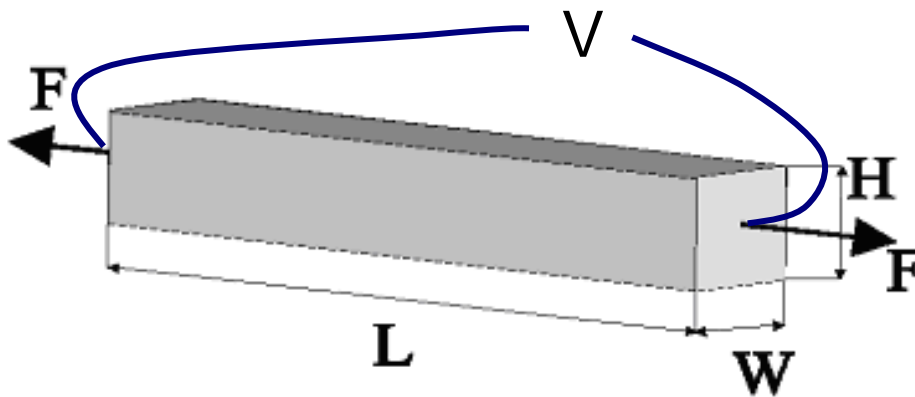
# Switch meccanici

- Sensori di contatto più semplici
- Forniscono un solo dato binario: contatto / non contatto
- Applicazioni come sensori tattili:
  - sensori di impatto su robot mobili
  - whisker
  - sensori di fine corsa per i giunti di un manipolatore



# Effetto piezoresistivo

Ogni materiale varia la propria resistenza elettrica in funzione della **deformazione**



$$V=RI$$

In un parallelepipedo metallico:  $R = \rho \frac{L}{WH}$

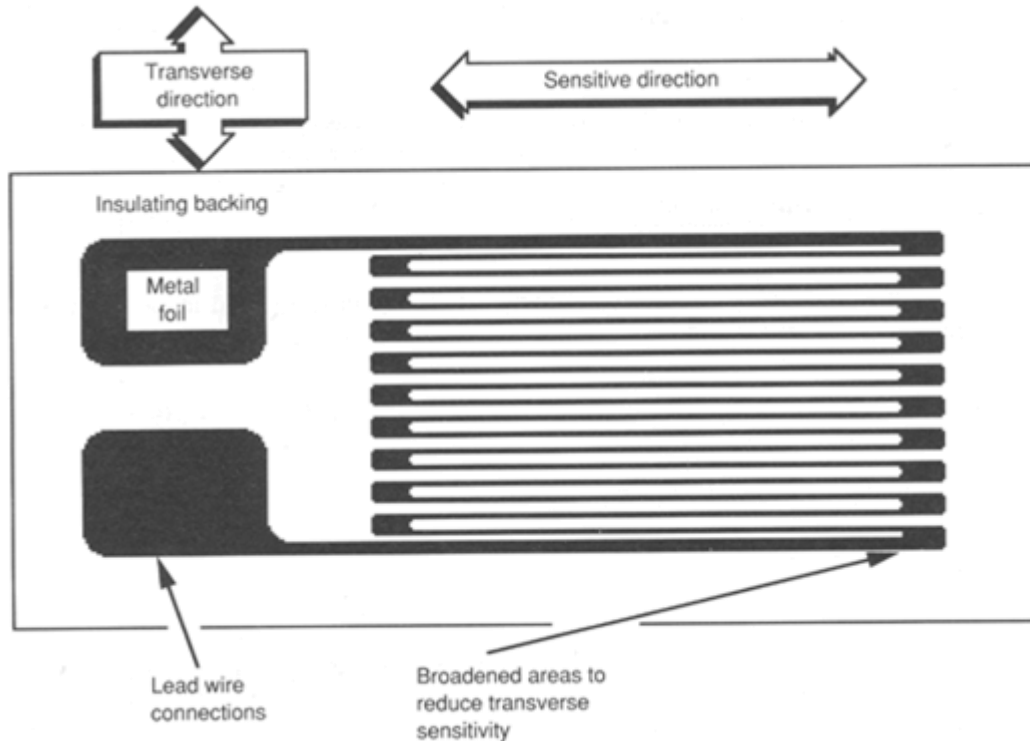
con  $\rho$  = resistività del materiale,

$L, W, H$  = dimensioni del parallelepipedo

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

$\nu$  = rapporto di Poisson del materiale

# Strain gauge



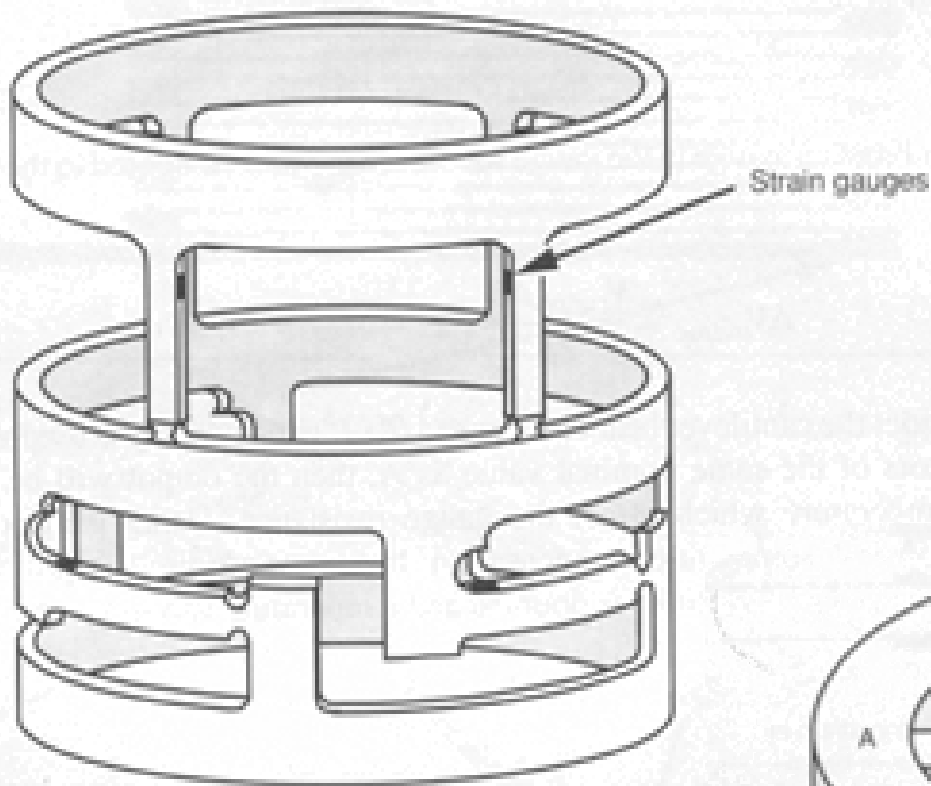
La forma del sensore serve a renderlo più sensibile in una direzione che nell'altra

Fattore di Gauge: 
$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$

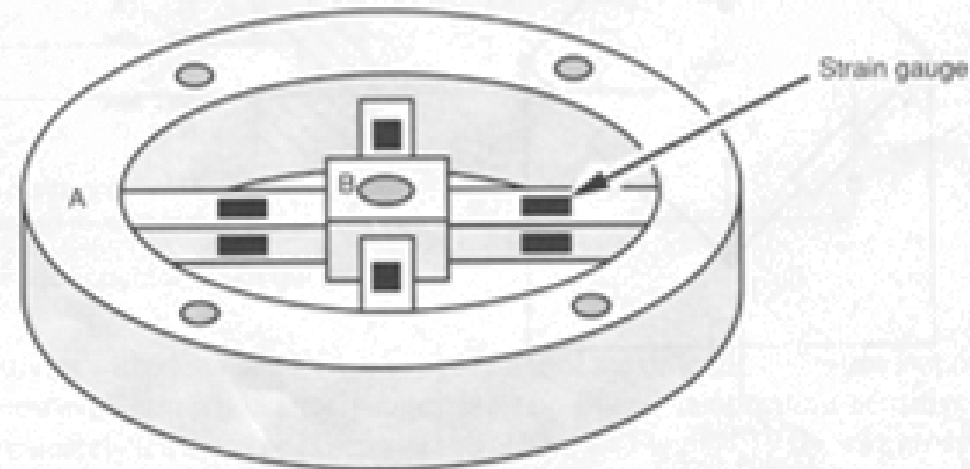
$\nu$  = rapporto di Poisson del materiale



# Sensori di forza/coppia a 3 componenti



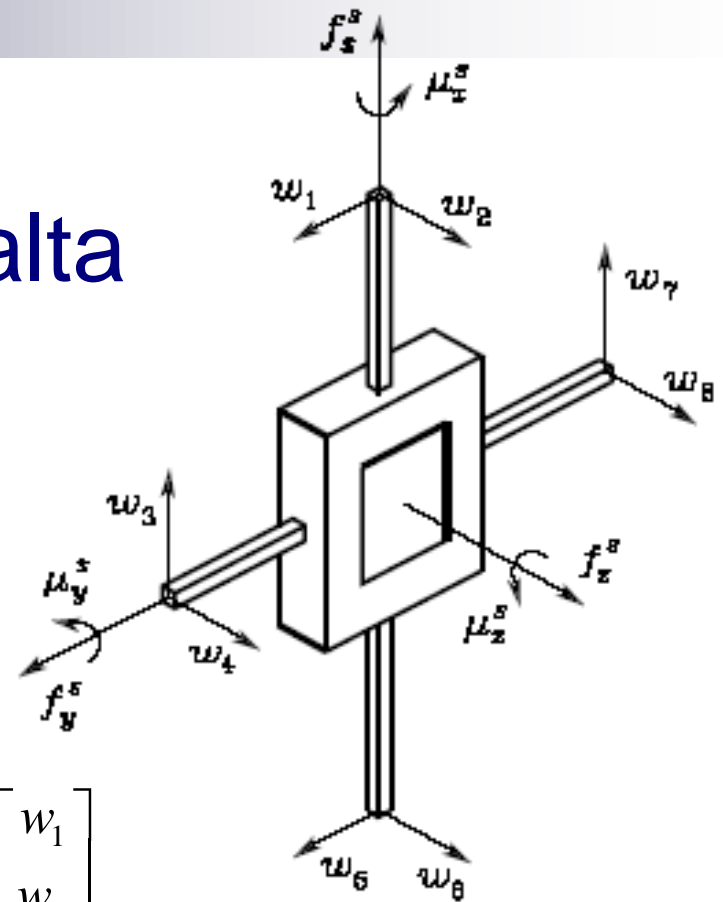
- Strutture meccaniche con direzioni di deformazione preferenziali, date da indebolimenti, su 3 assi
- Strain gauge disposti sugli indebolimenti



# Sensore triassiale di forza/coppia a croce di Malta

- Le forze e le coppie vengono misurate a partire dalle misure delle variazioni di resistenza degli strain gauge, moltiplicandole per una matrice di coefficienti tipica del sensore
- La matrice dei coefficienti si costruisce con una procedura di calibrazione in cui si applicano forze note

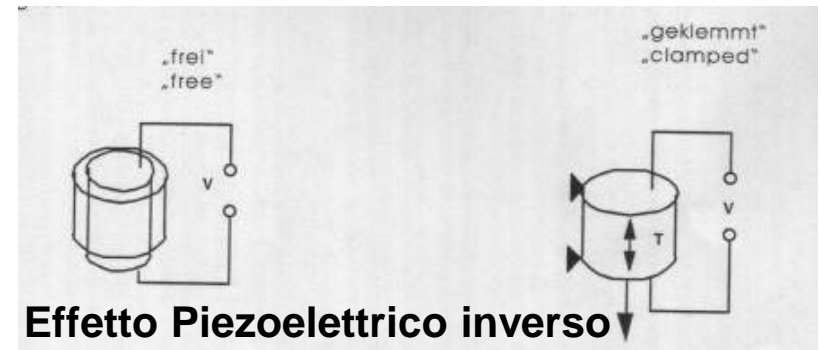
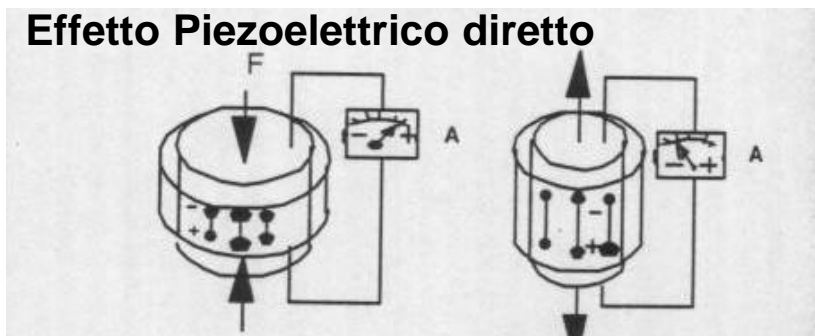
$$\begin{bmatrix} f_x^s \\ f_y^s \\ f_z^s \\ \mu_x^s \\ \mu_y^s \\ \mu_z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 & c_{17} & 0 \\ c_{21} & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & c_{34} & 0 & c_{36} & 0 & c_{38} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & c_{48} \\ 0 & c_{52} & 0 & 0 & 0 & c_{56} & 0 & 0 \\ c_{61} & 0 & c_{63} & 0 & c_{65} & 0 & c_{67} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \end{bmatrix}$$



# Sensori Piezoelettrici

## Effetto Piezoelettrico (Pierre & Jacques Curie, 1880)

- Fenomeno fisico per cui, sottoponendo a sollecitazioni meccaniche una certa categoria di cristalli (quarzo, piezoceramici, silicio...), si manifesta una differenza di potenziale tra le sue due facce.
- L'effetto si verifica anche in forma opposta: l'applicazione di un campo elettrico a due facce opposte di un cristallo ne produce una deformazione meccanica.



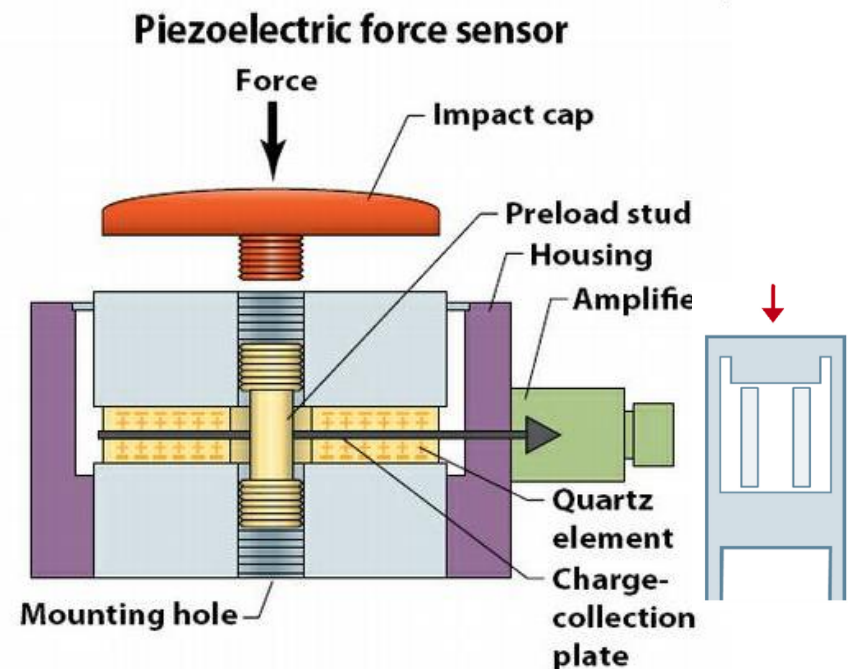
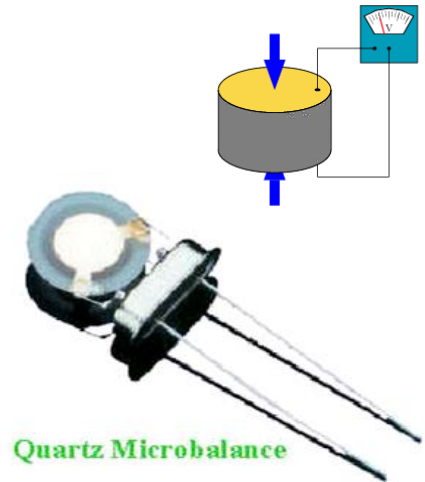
- È sfruttato per misure di Pressione, Forza o Accelerazione

# Sensori Piezoelettrici al quarzo

## Caratteristiche del Quarzo

- Alta Resistenza a stress meccanici
- Resistenza a temperature fino a 500°C
- Alta rigidità
- Linearità (carica generata  $\propto$  Forza applicata)
- Isteresi trascurabile
- Sensibilità costante per un alto range di temperature
- Bassissima conducibilità

Sensori di Pressione al quarzo: sottile membrana di dimensioni note posizionata su una base in modo che la pressione applicata sull'elemento sia uniassiale.



# Sensori ottici (riflessione interna)

Indice di rifrazione di un materiale:

$$n=c/v$$

con

$c$ =velocità della luce nel vuoto

$v$ =velocità della luce nel materiale

**Angolo critico  $\theta_c$ :**

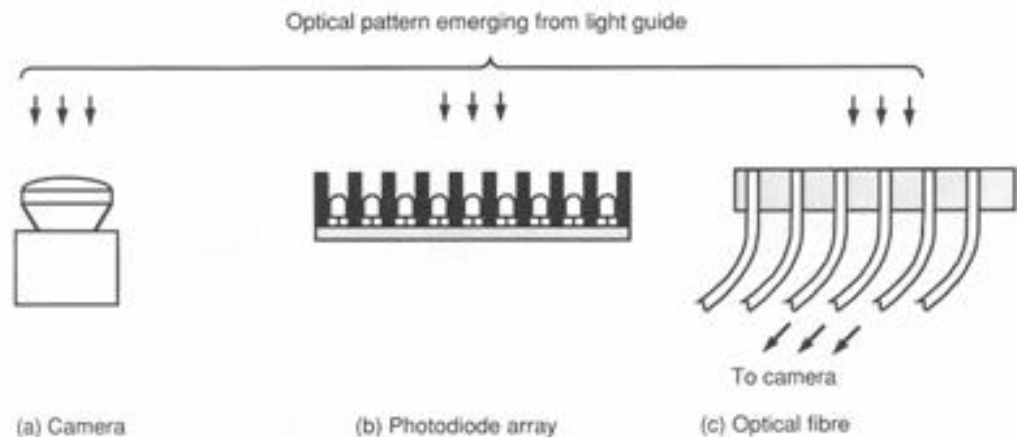
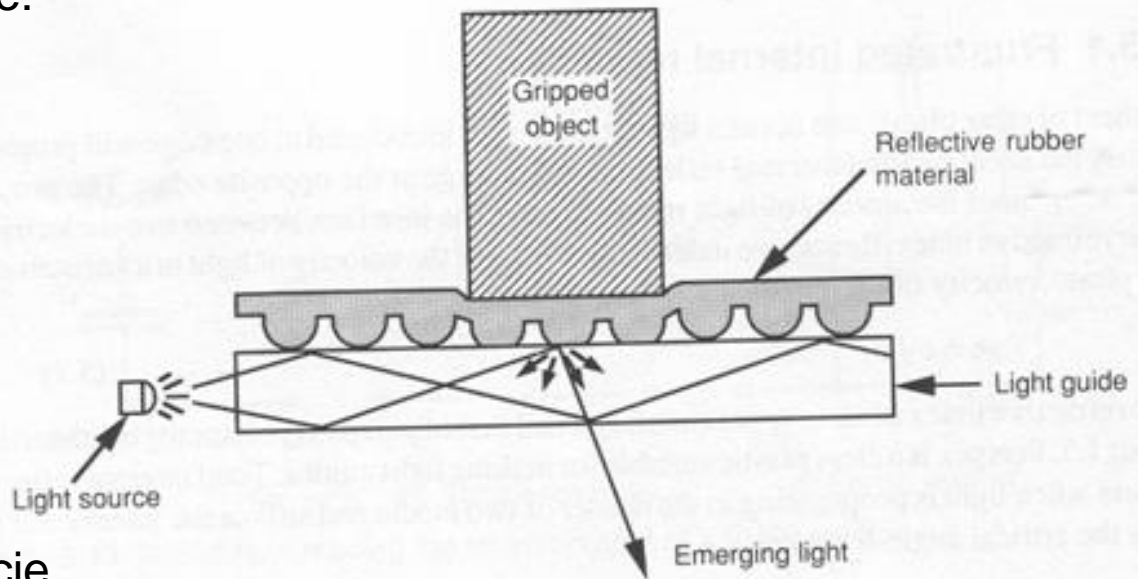
$$\sin \theta_c = n_2/n_1 \quad \text{con } n_1 > n_2$$

**Riflessione interna totale:**

quando la luce incide sulla superficie dell'interfaccia tra due materiali con un angolo di incidenza superiore a  $\theta_c$  (angolo misurato dalla normale alla superficie)

All'interno di una guida ottica la luce si propaga se incide sulla superficie dell'interfaccia tra la guida ottica e l'aria con un angolo superiore a  $\theta_c$

Il contatto di un oggetto esterno sulla superficie della guida ottica impedisce la riflessione interna totale e la luce emerge dal lato opposto della guida



# Sensori ottici (riflessione interna)

Se una fibra ottica è soggetta ad una significativa curvatura l'angolo d'incidenza alla parete della fibra si può ridurre a sufficienza per permettere alla luce di lasciare la fibra.

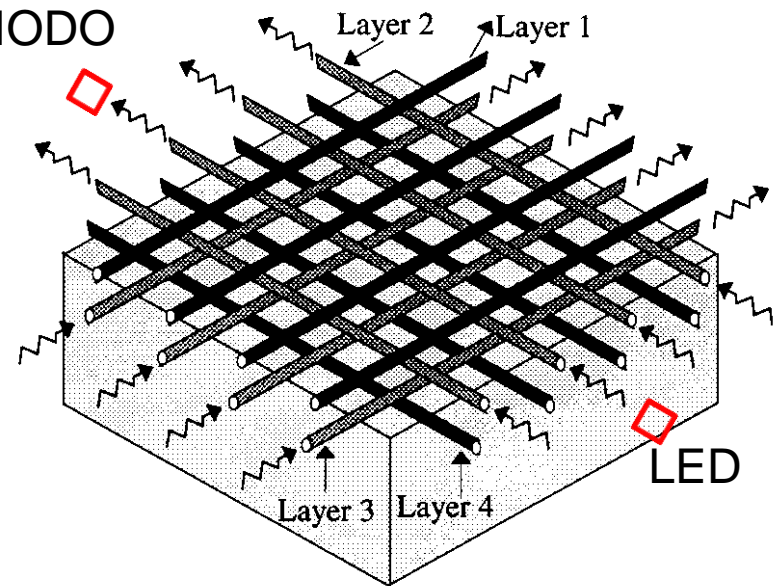
Esempio:

Trasduttore bidimensionale a 4 strati formato da **fibre ottiche** in struttura corrugata.

L'applicazione di una forza ortogonale determina micro curvature che permettono l'uscita dalla fibra della luce prodotta da LED (emettitori) con conseguente riduzione di luce rilevata dal fotodiode corrispondente.

Quando un oggetto viene a contatto con l'array, una diversa distribuzione di luce viene rilevata e usando complessi algoritmi si possono ottenere informazioni sulla posizione, sull'orientamento, sulle dimensioni e sul contorno dell'oggetto.

FOTO-  
DIODO

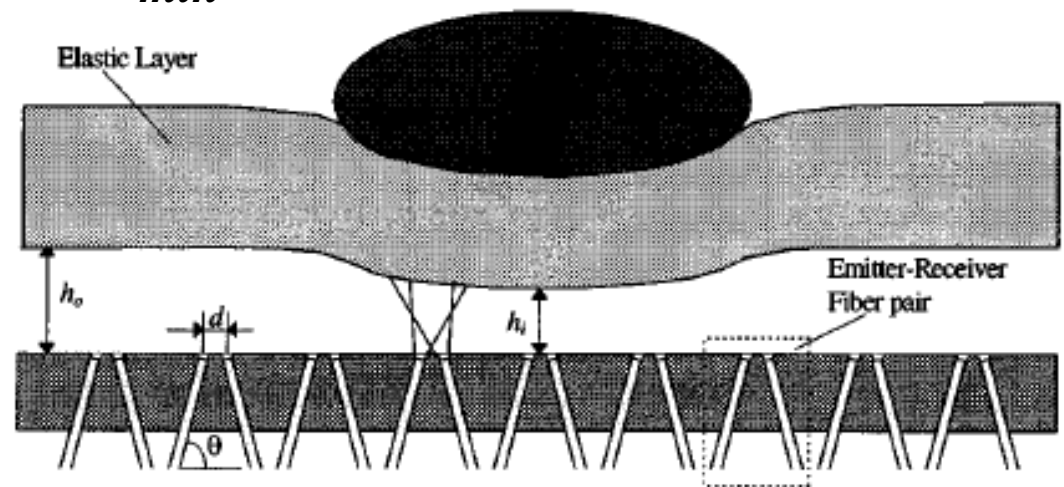
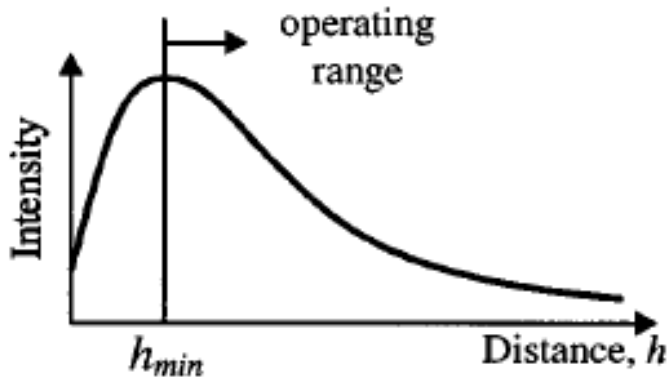


# Sensori ottici (modulazione di intensità)

Composti da membrane flessibili con superficie inferiore riflettente. Quando il cono di luce introdotto attraverso fibre ottiche colpisce la superficie, viene riflessa e recuperata da una seconda fibra ottica. Quando viene esercitata una forza sulla membrana, la distanza tra la superficie riflettente e le fibre ottiche si riduce e di conseguenza la luce rilevata diminuisce in funzione della forza.

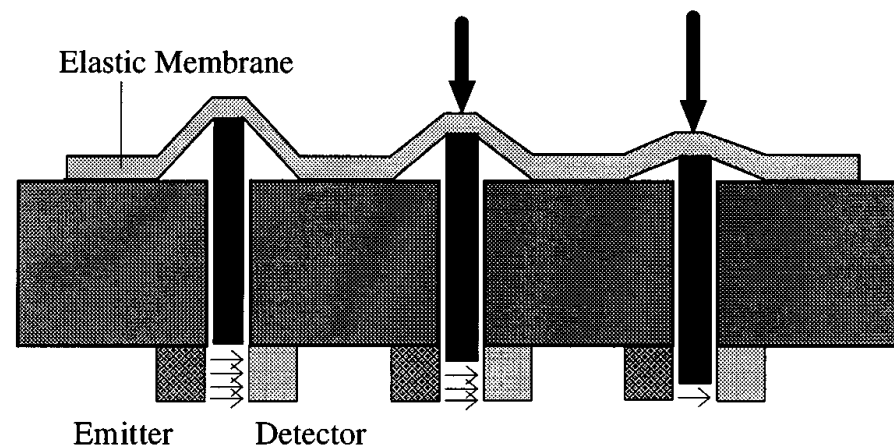
Per avere una misura univoca della distanza (e quindi della forza) occorre una funzione monotona che leghi distanza e intensità luminosa. Per questo il trasduttore è progettato in modo tale da lavorare nel range:

$$h > h_{min}$$



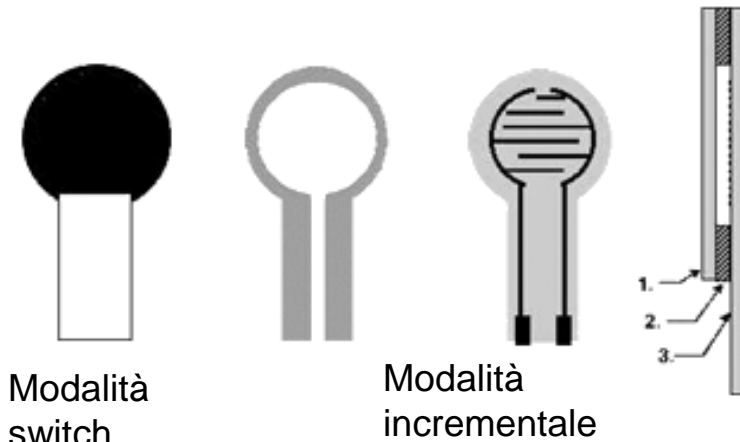
# Sensori ottici (ad occlusione)

La superficie del trasduttore è composta di materiale flessibile sotto la quale sono disposte delle piccole aste. Quando viene applicata una forza normale, le aste vengono spinte in basso ad occludere il campo visivo tra la coppia fotoemettitore-ricevitore. La quantità di luce residua rilevata è funzione dello spostamento dell'asta e quindi della forza esercitata.



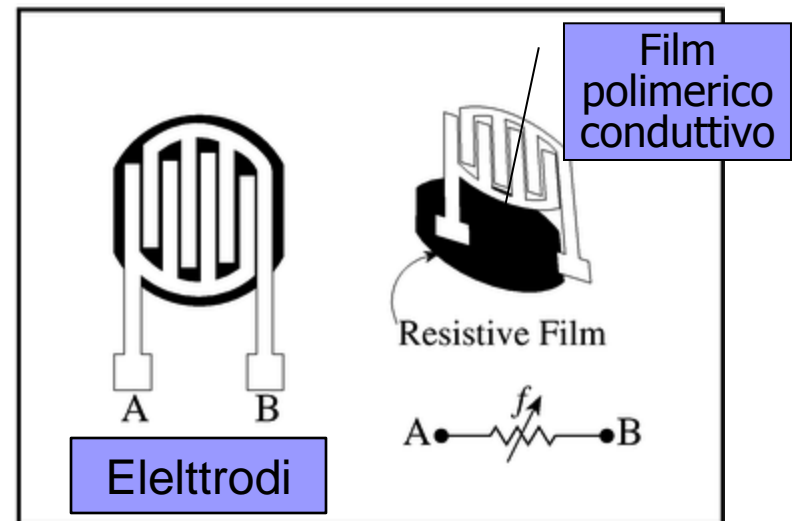
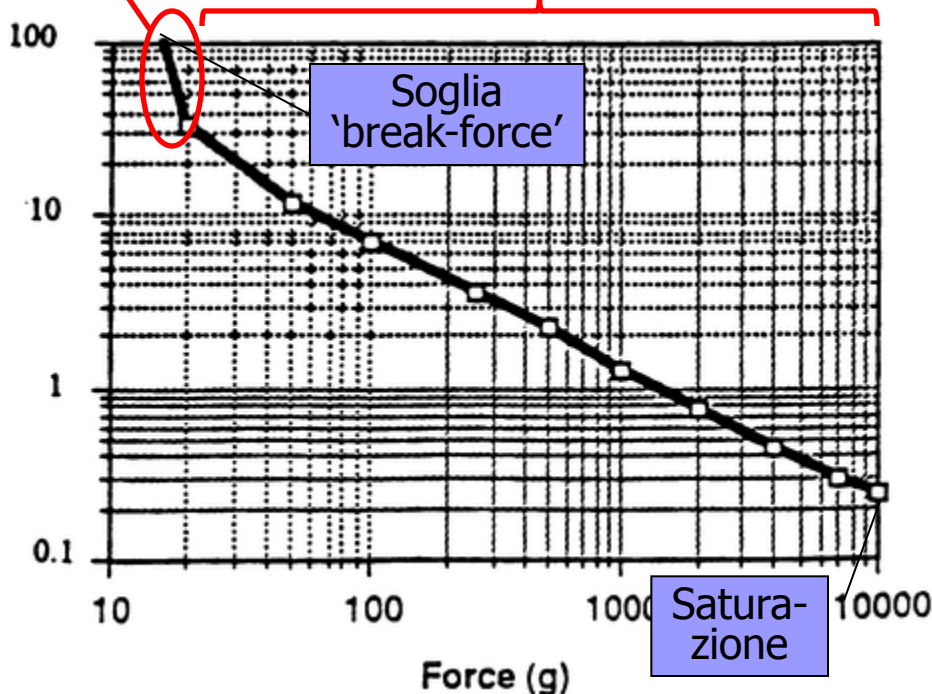


# FSR – Force Sensing Resistors



Dispositivo a film polimerico che presenta resistenza decrescente per forze applicate crescenti

- Bassa accuratezza
- Bassa sensibilità
- Bassa isteresi
- Economici

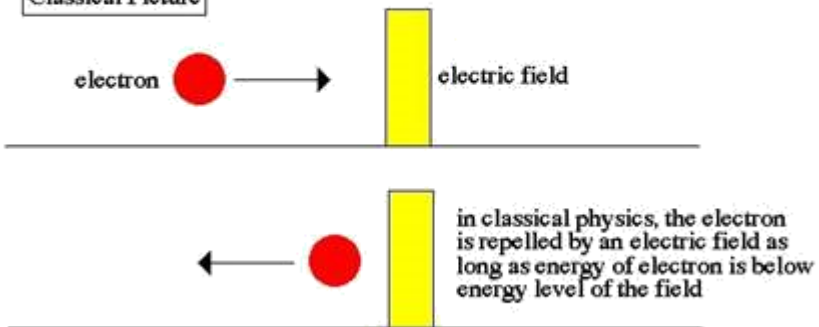


# Sensori QTC (Quantum Tunneling Composites)

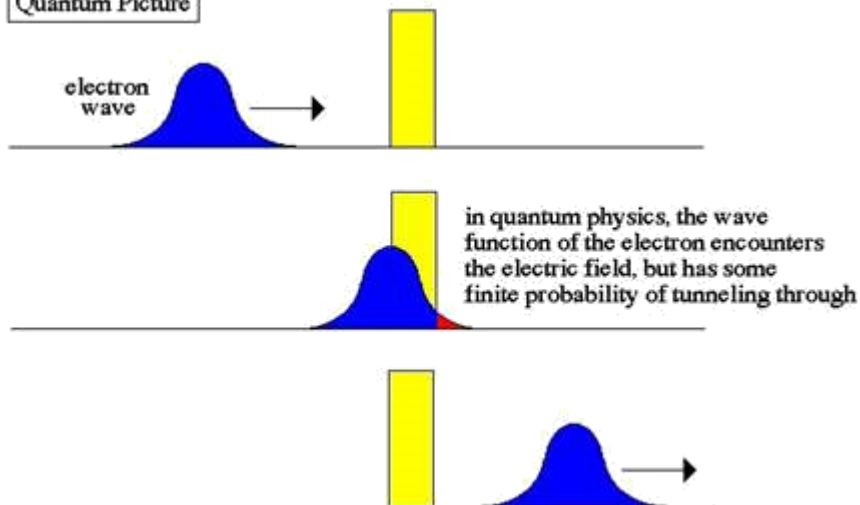
- I QTC possono trasformarsi da perfetti isolanti a conduttori simili ai metalli quando deformati
- La deformazione può risultare da compressione, taglio o stiramento
- La risposta dei QTC può essere modulata sullo spettro delle forze applicate
- La transizione da isolante a conduttore segue una curva ripetibile, con la resistenza che decresce esponenzialmente

## Quantum Tunneling

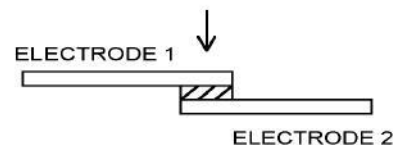
### Classical Picture



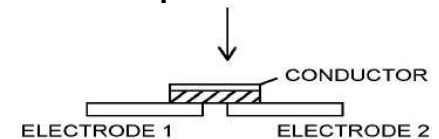
### Quantum Picture




### Configurazione sandwich



### Configurazione ponte



 = QTC

 = FORCE

# Sensori QTC

## Dimensioni

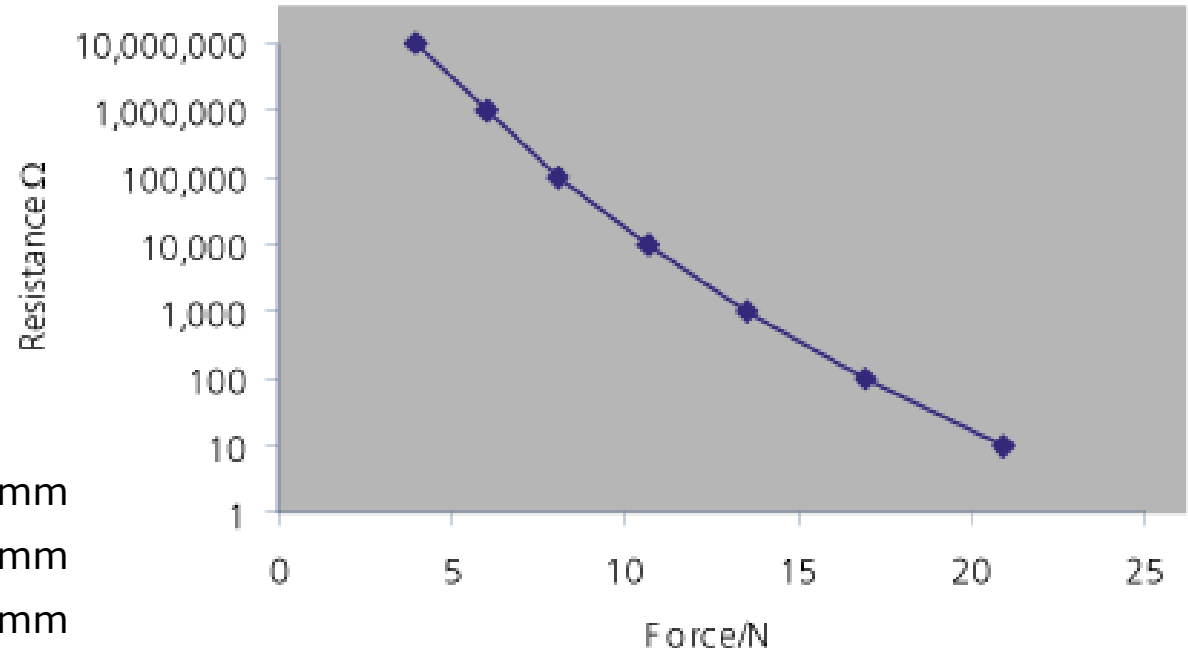
Larghezza	3.6 mm
Lunghezza	3.6 mm
Spessore	1.0 mm

## Caratteristiche meccaniche

Peso	0.04g
Densità	4.0 g/cm <sup>3</sup>
Range di forza	0 - 100 N
Vita utile	>1,000,000 compressions

## Caratteristiche elettriche

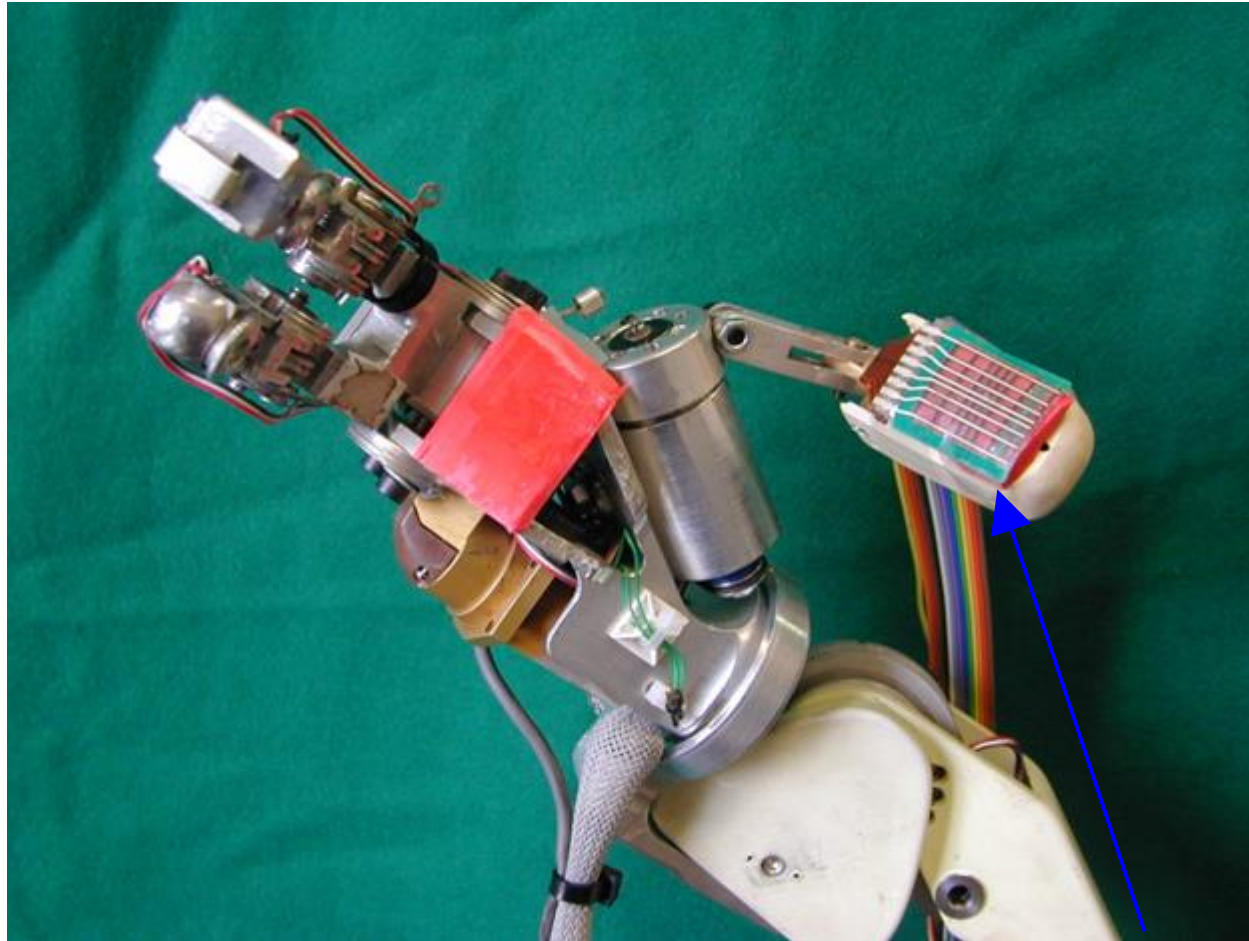
Resistività a riposo	> $7 \times 10^{12}$ Ohm cm
Range di resistenza tipico	> $10^{12}$ Ohms to < 1 Ohm
Potenziale operativo	0 to 40 V
Corrente massima	10 A



# Sommario della lezione

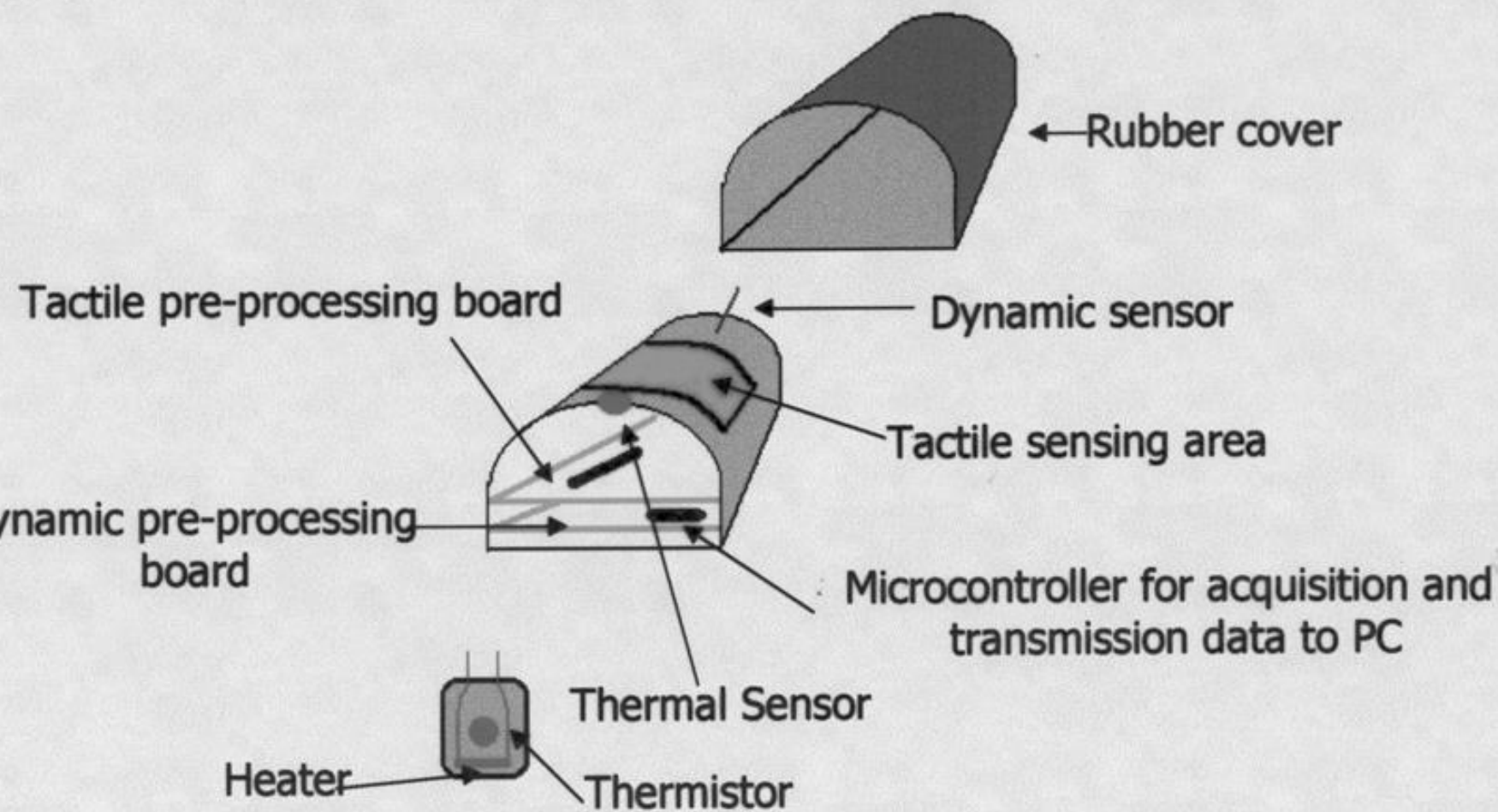
- Principali tecnologie per la realizzazione di sensori tattili artificiali:
  - principi di funzionamento e relazioni matematiche
  - esempi di realizzazione di sensori tattili
- **Esempi di progettazione di sensori tattili bioispirati**

# Sensori Tattili: ARTS Tactile Sensor

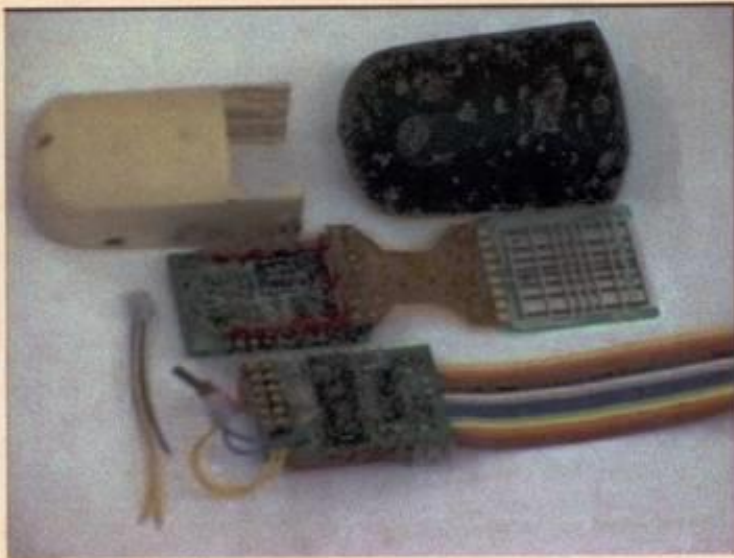


ARTS Tactile Sensor

# Scheme of the ARTS integrated fingertip

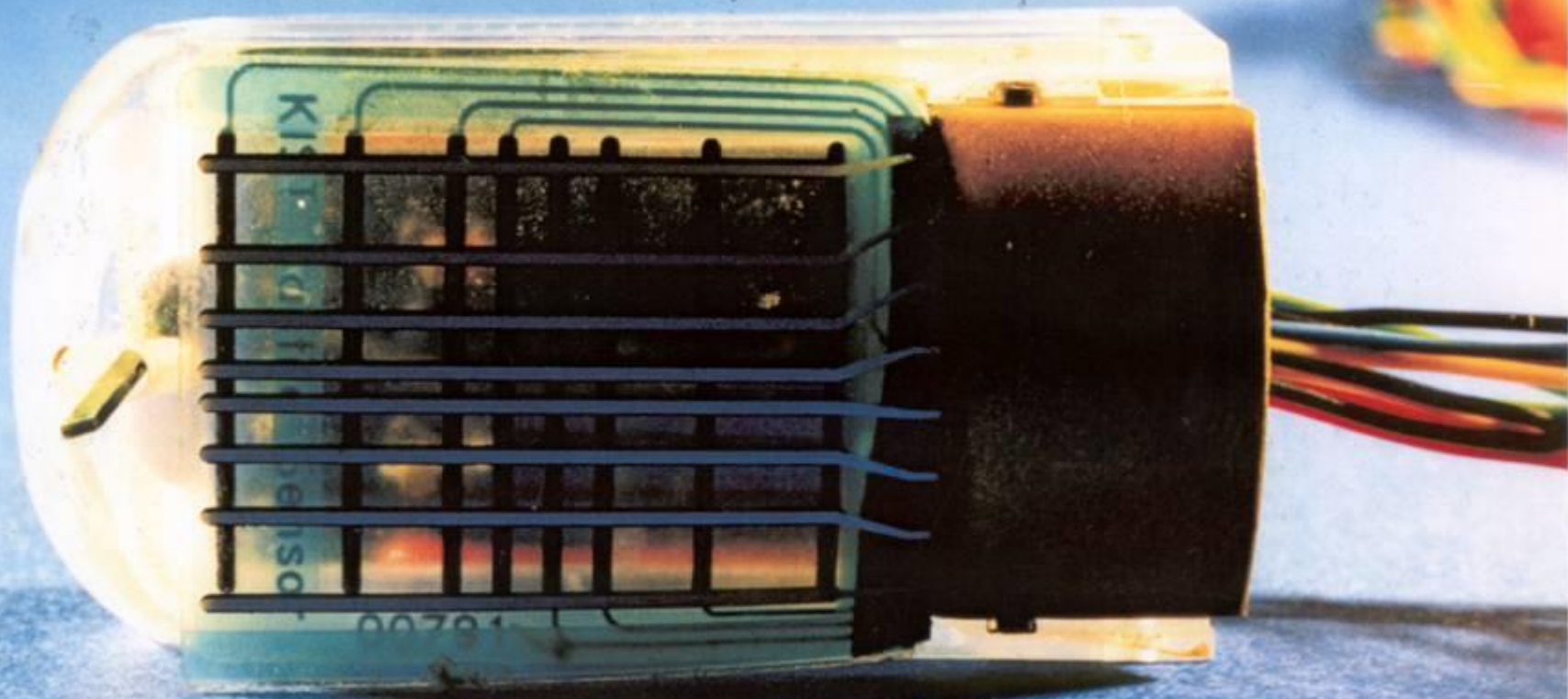


# The ARTS integrated fingertip



<b>Tactile Sensor Performance</b>	
Force resolution	0.1 N (approx.)
Linearity & Hysteresis	$\pm 12\%$ Fs
Uniformity	$\pm 15\%$ Fs @ 3N

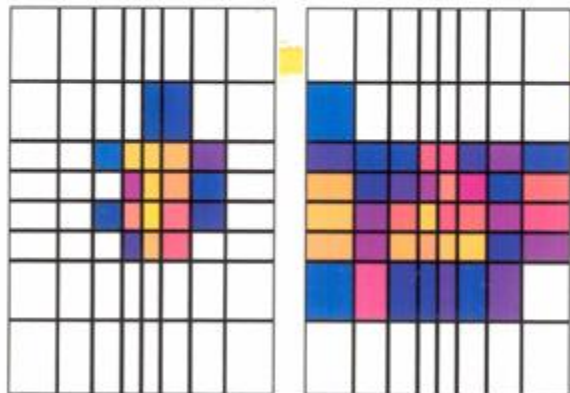
<b>Tactile Array Sensor Physical Characteristics</b>	
External Dimensions	24.36mm x 34.9 mm.
Overall Area	850 mm <sup>2</sup>
Sensitive Area	432 mm <sup>2</sup>
Number of sensitive sites	64
Maximum resolution (in the centre)	1 mm.
Minimum resolution (at the periphery)	5 mm.
Number of wires	16
Signal Pad Area	2.25 mm <sup>2</sup> (each)





# Polpastrello sensorizzato

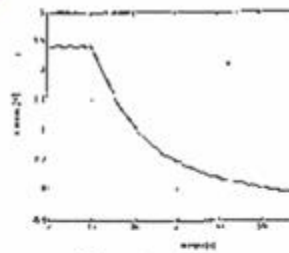
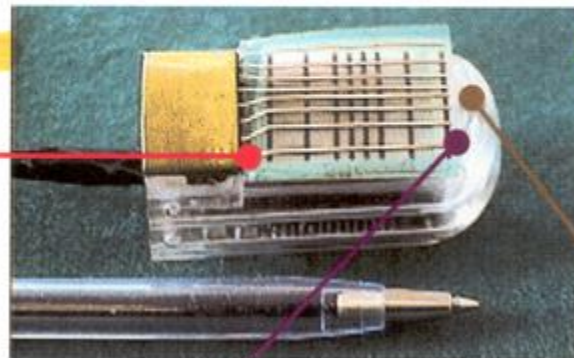
ARTS Lab, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa



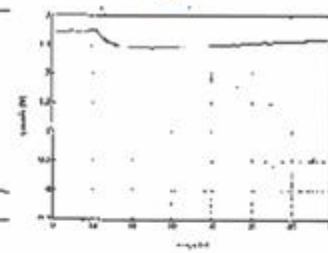
(a)

(b)

Immagine tattile acquisita durante la presa di oggetti (a) sferici e (b) cilindrici

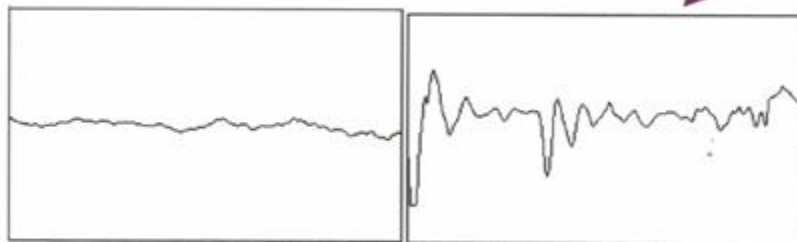


(a)



(b)

Risposta del sensore termico per un oggetto (a) metallico e (b) plastico



(a)

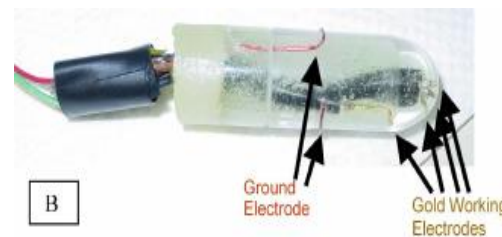
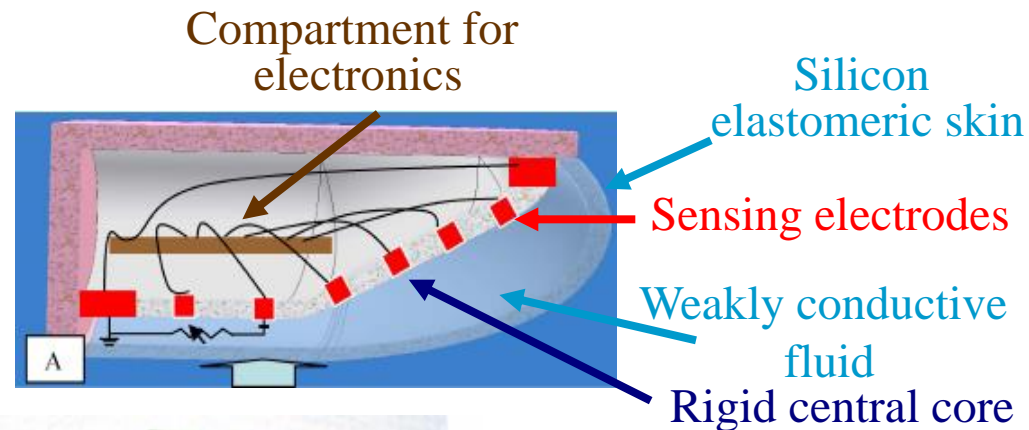
(b)

Segnale del sensore dinamico durante l'esplorazione di una superficie (a) liscia e (b) rugosa

# Biomimetic Tactile Sensor Array

- Rigid core surrounded by a weakly conductive fluid contained within an elastomeric skin
- The sensor uses the deformable properties of the finger pad as part of the transduction process
- Multiple electrodes are mounted on the surface of the rigid core and connected to impedance-measuring circuitry safely embedded within the core.
- External forces deform the fluid path around the electrodes, resulting in a distributed pattern of impedance changes containing information about those forces and the objects that applied them

- Shaped human finger like
- Simple and robust
- Easy to manufacture and repair
- Good spatial and temporal resolution

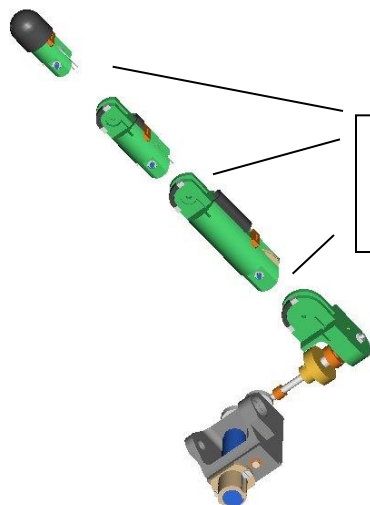


# Polpastrello tattile per una mano robotica

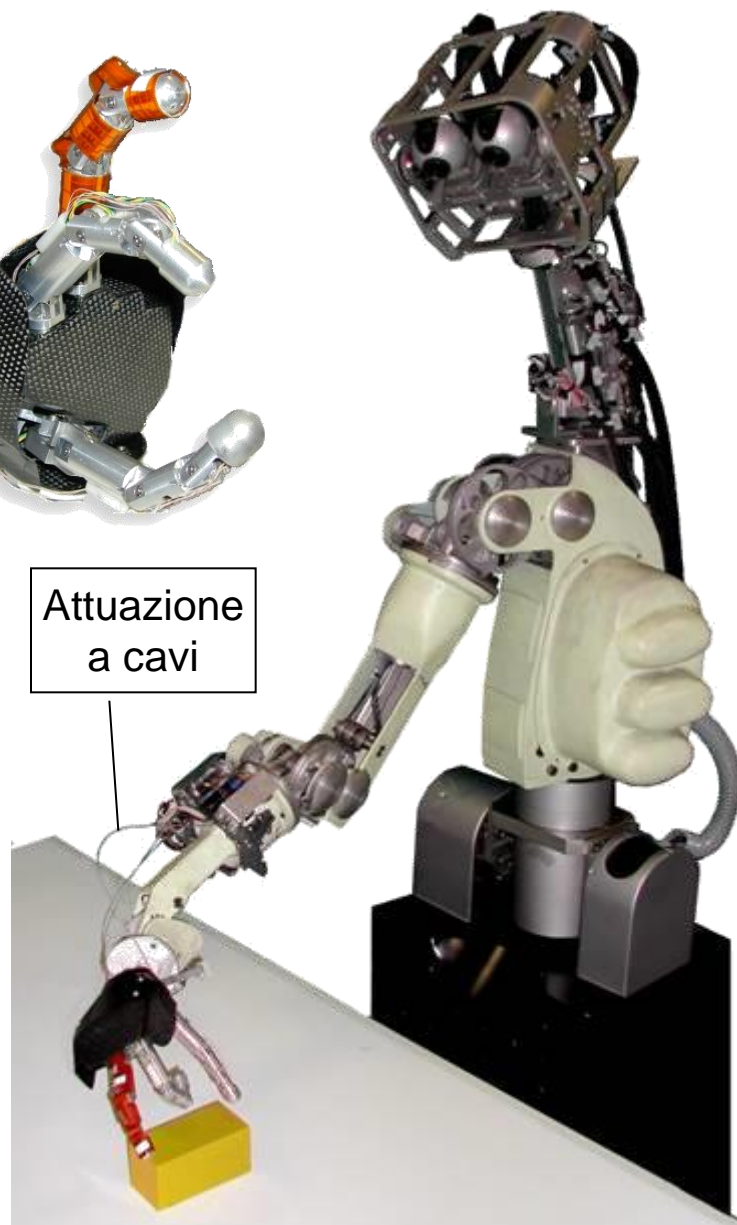
1 giunto per l'adduzione/abduzione del pollice



3 giunti per dito



Attuazione a cavi



Gradi di libertà

10, di cui:  
4 attuati,  
6 sottoattuati

Ampiezza adduzione/abduzione pollice

0°-120°

Ampiezza flessione giunti delle dita

0°-90°

Carico massimo

450 gr

Forza di presa

40N

Forza tip-to-tip

15N

Tempo di chiusura

2 s

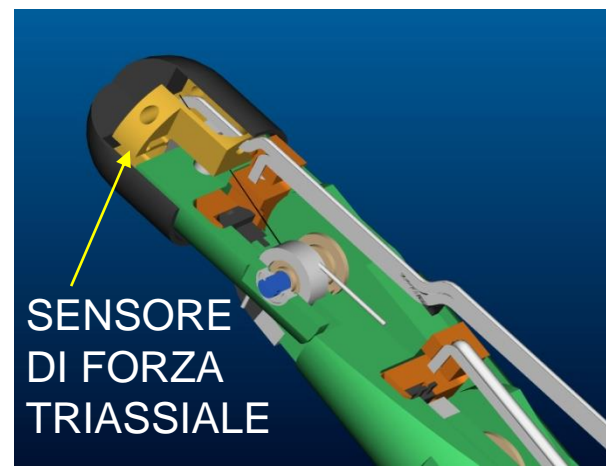
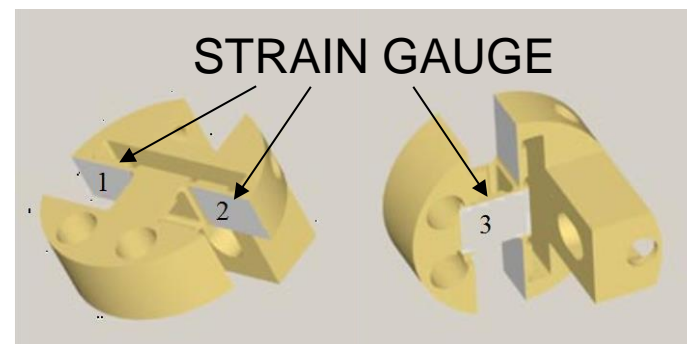
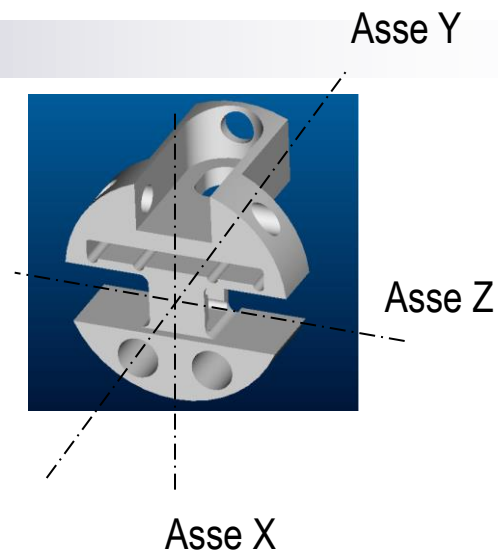
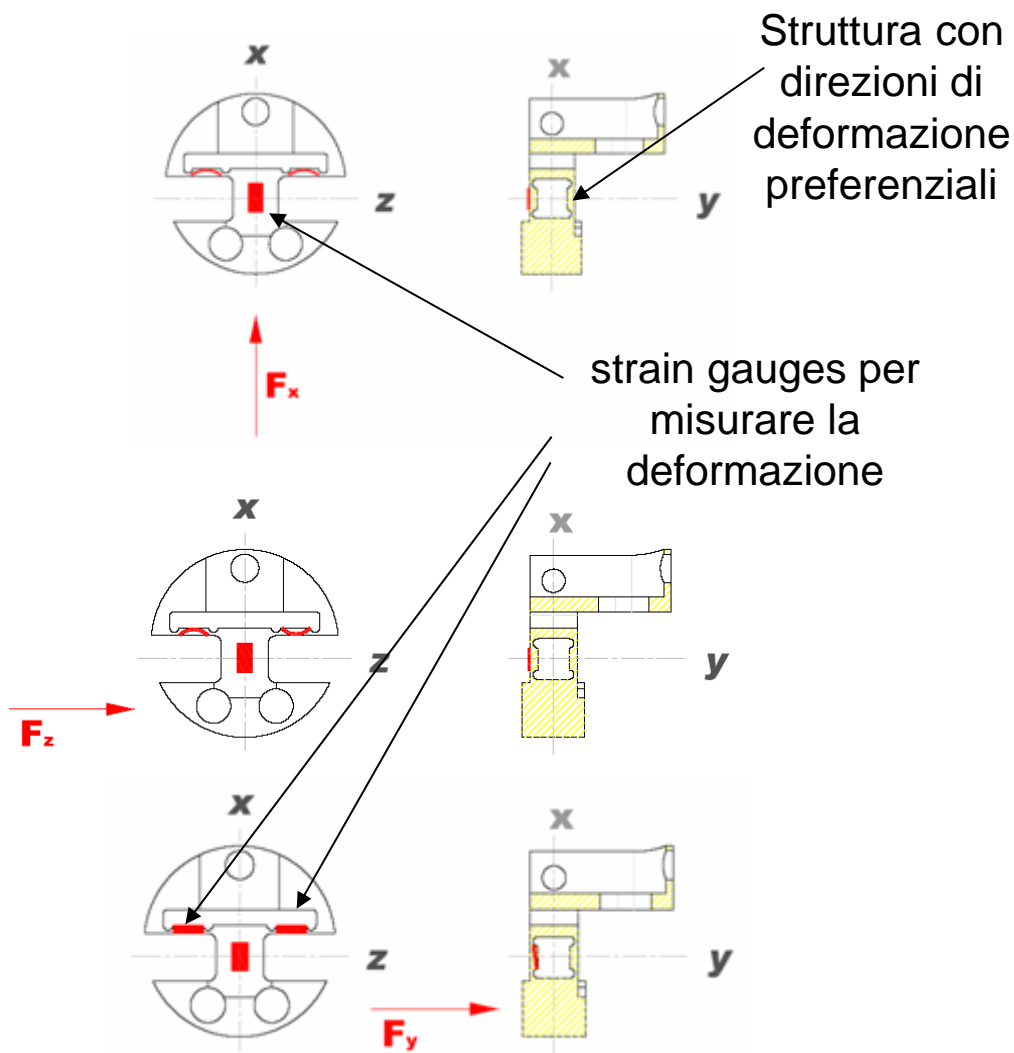
Peso

400 gr

Dimensioni

Antropomorfe

# Sensore di forza triassiale nel polpastrello

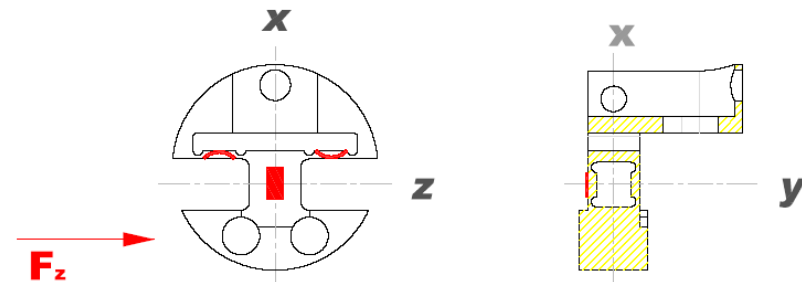
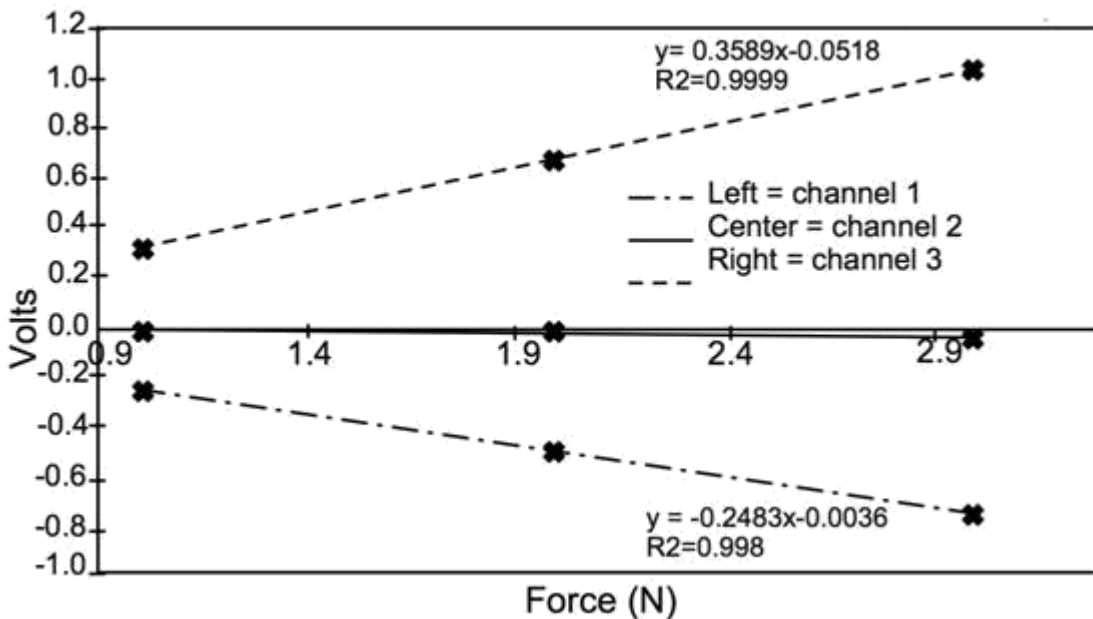
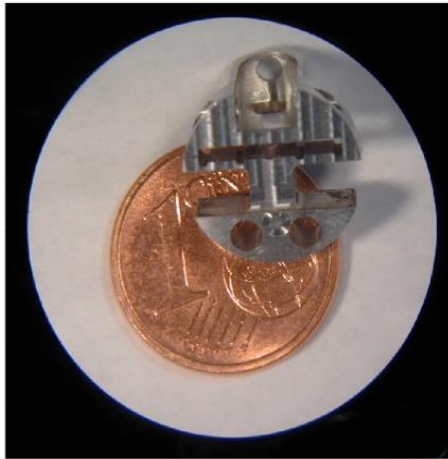


# Sensore di forza triassiale nel polpastrello

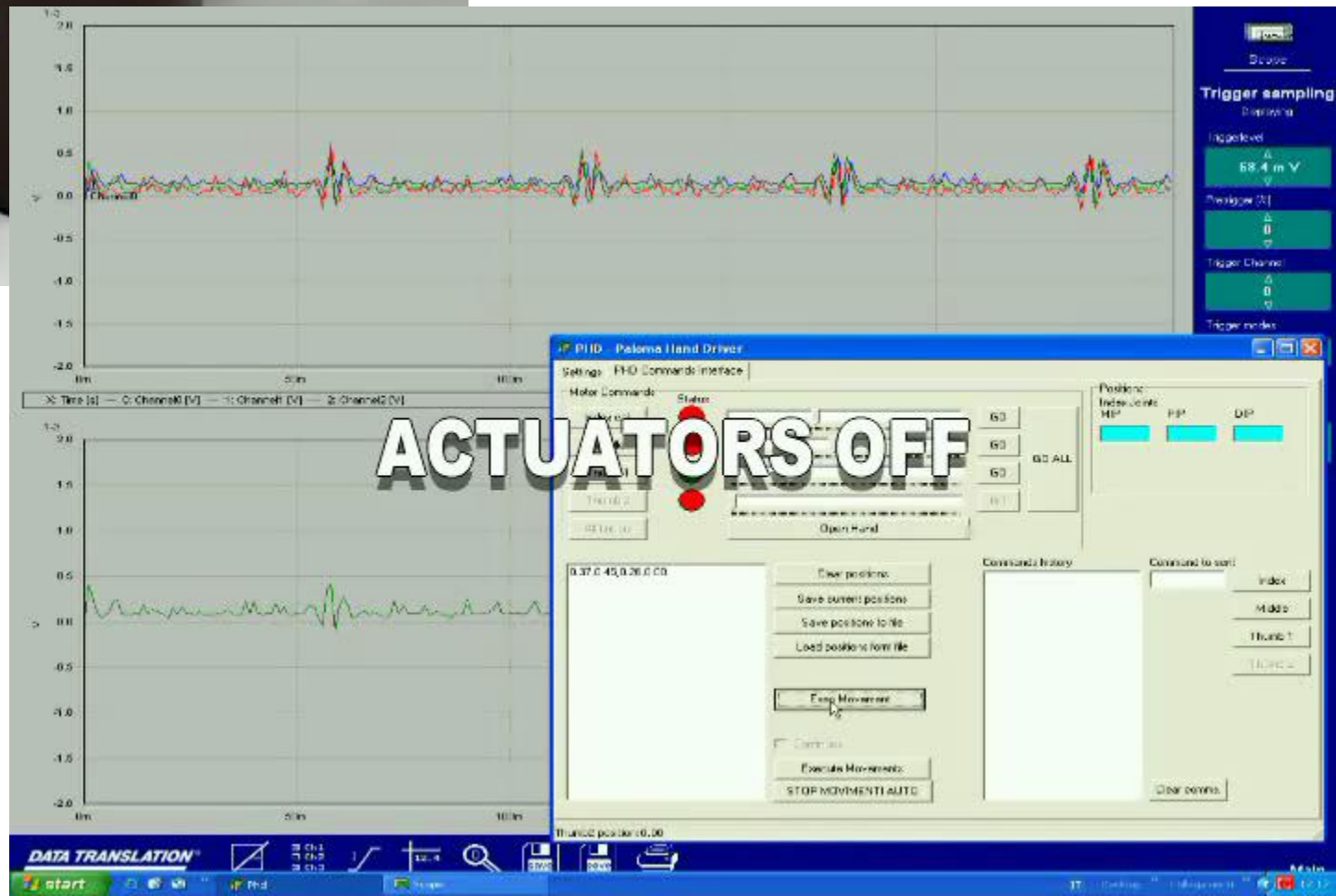
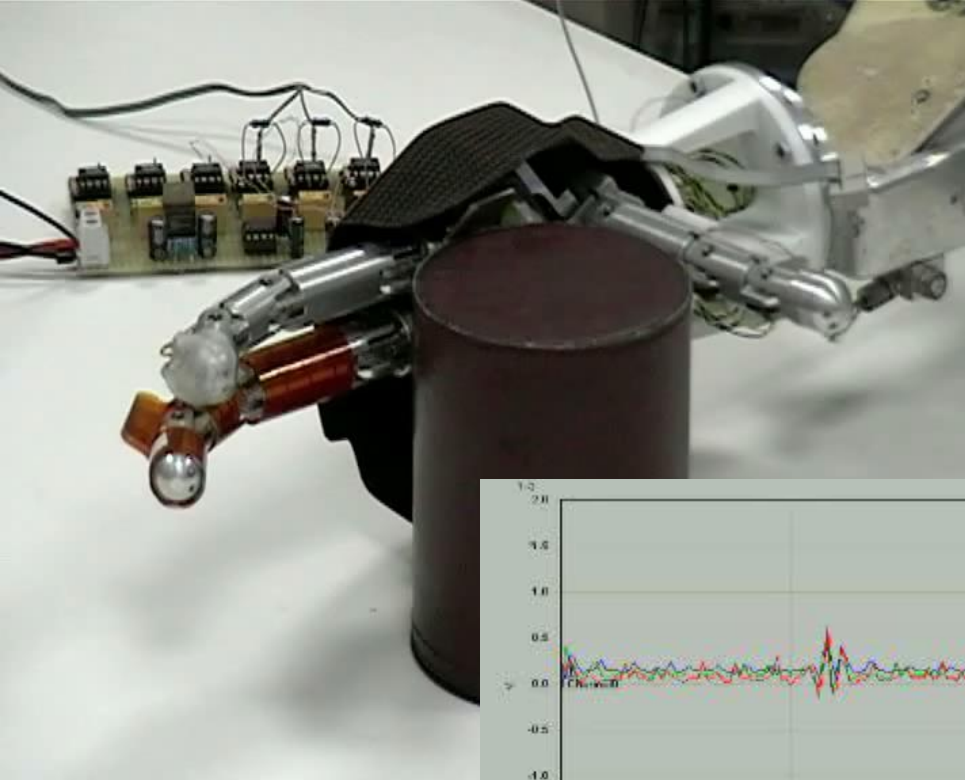
materiale: alluminio

dimensioni:  $\phi=12$  mm

$h=9,5$  mm

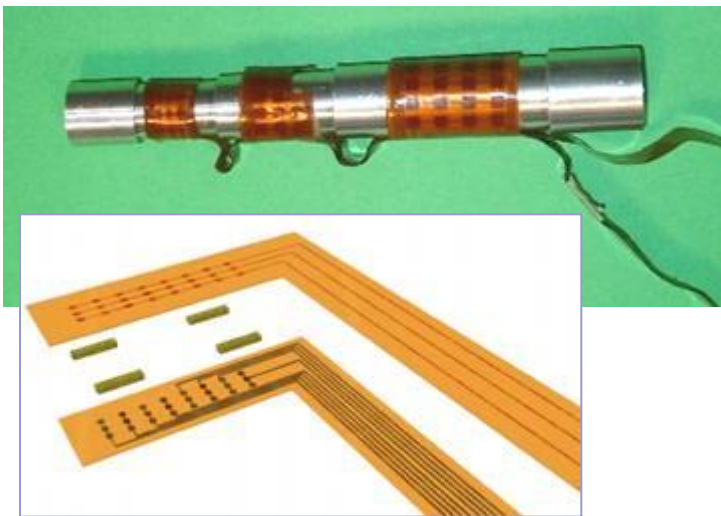


# 3D Force Sensor output



# Contact making and breaking between object and fingertips

## New On/Off Contact Sensors



## Distribution on anthropomorphic hand (Total of 80 taxels)

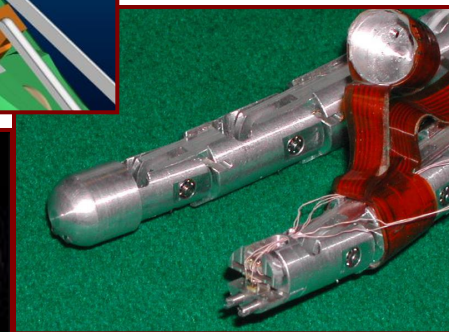
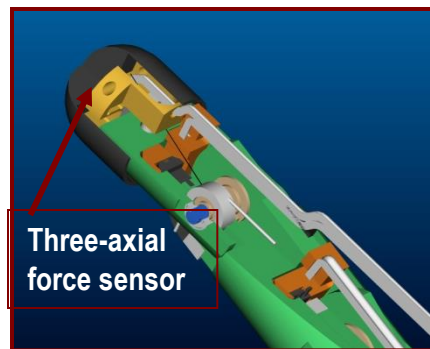
- Matrix 8 x 3 for fingertip
- Matrix 8 x 3 for middle phalange
- Matrix 8 x 4 for proximal phalange

### • **Threshold value: 20 mN**

- Spatial resolution = 2mm

- The on-off contact sensors can duplicate the static response of the SA-I, during contact with an object
- From preliminary experiments the measured minimal threshold is of 20 mN close to the approximately 5 mN contact threshold observed in humans

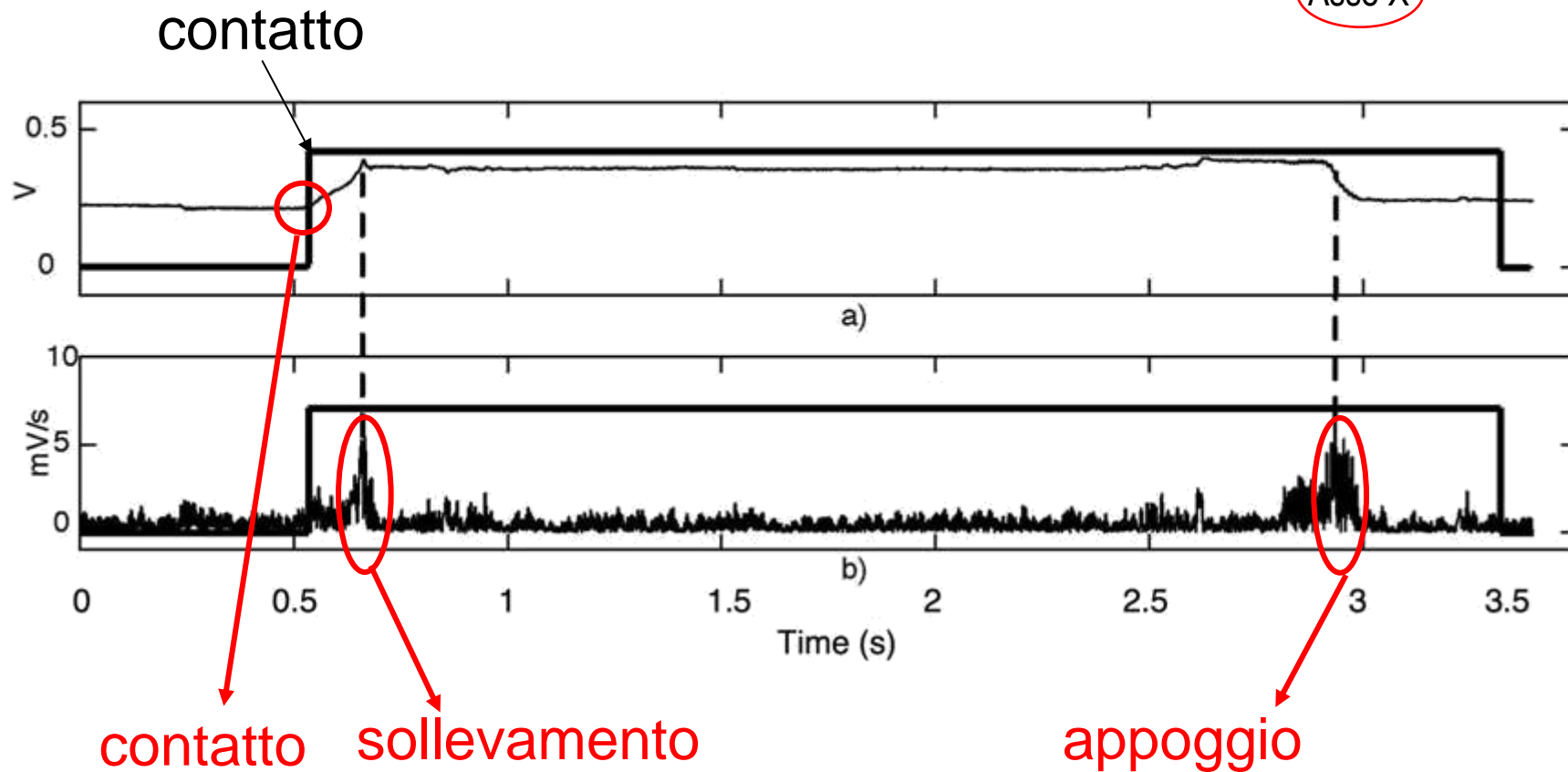
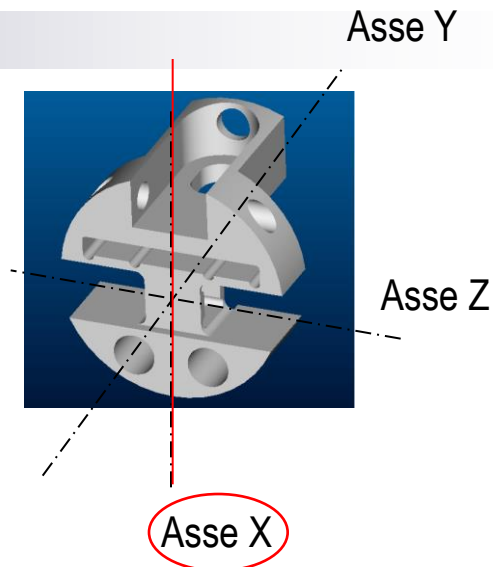
## Three-Axial Force Sensor



- The three-axial sensor can trigger the necessary signals during the object lift-off and replacement emulating the response of the FA-II mechanoreceptors

- One of the sensor outputs is sufficient to detect the sequential phases of the lifting task

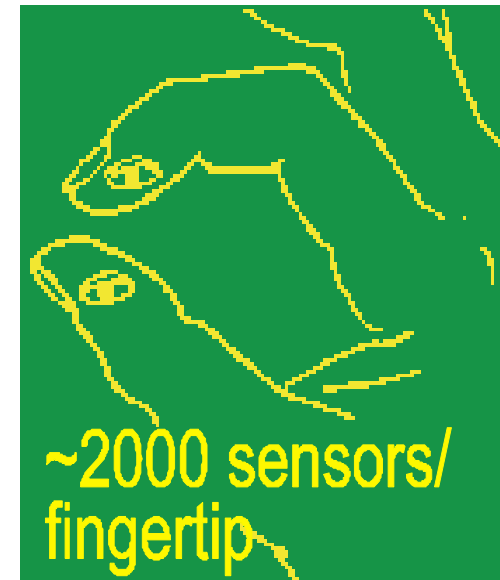
# Comportamento del polpastrello tattile nel compito di presa prototipale





# Funzionalità del sensore di forza triassiale rispetto al polpastrello

- Forza sul polpastrello:
  - intensità
  - direzione
- Forma locale del contatto (curvatura della superficie dell'oggetto)
- Eventi di controllo tattile:
  - scivolamenti
  - inizio e fine del contatto
  - inizio e fine del contatto dell'oggetto afferrato con altri oggetti (es. piano di appoggio)



Flat



Curved  
( $r = 10 \text{ mm}$ )



Curved  
( $r = 5 \text{ mm}$ )

# Funzionalità del sensore di forza triassiale rispetto al polpastrello

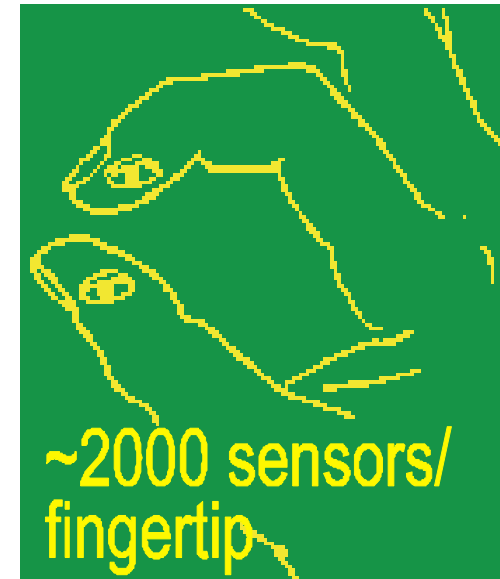
## ■ Forza sul polpastrello:

- intensità
- direzione

## ■ Forma locale del contatto (curvatura della superficie dell'oggetto)

## ■ Eventi di controllo tattile:

- scivolamenti
- inizio e fine del contatto
- inizio e fine del contatto dell'oggetto afferrato con altri oggetti (es. piano di appoggio)



Flat

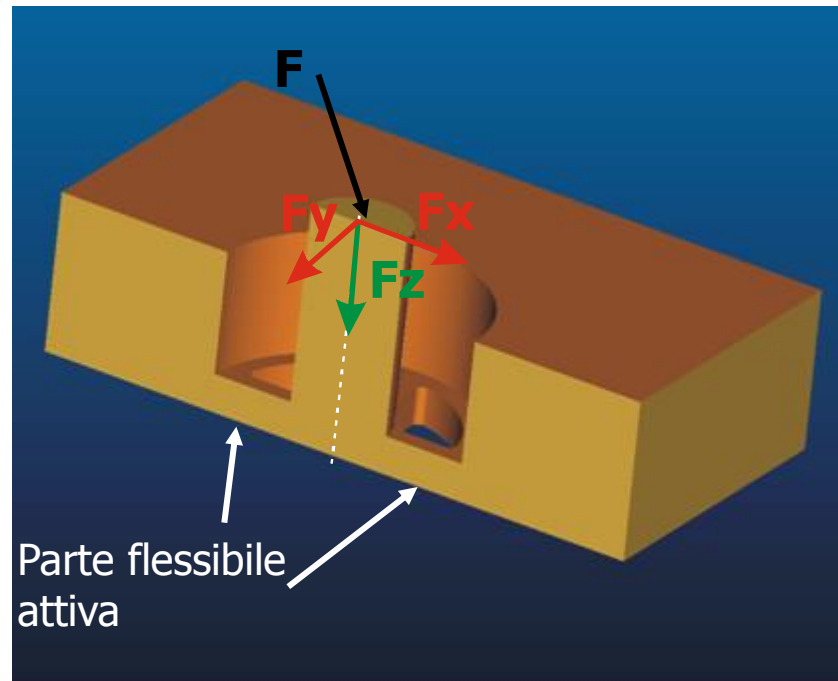


Curved  
( $r = 10 \text{ mm}$ )



Curved  
( $r = 5 \text{ mm}$ )

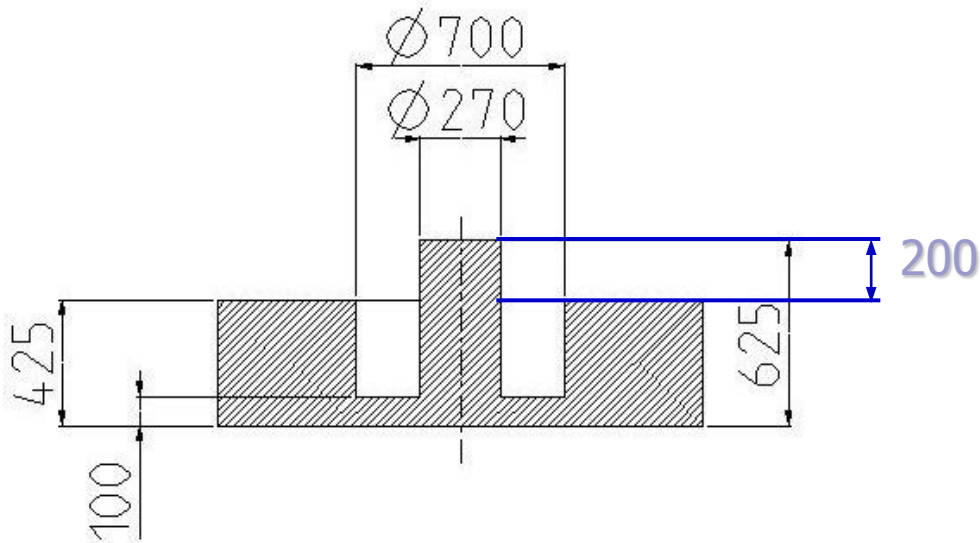
# Microsensore di forza triassiale



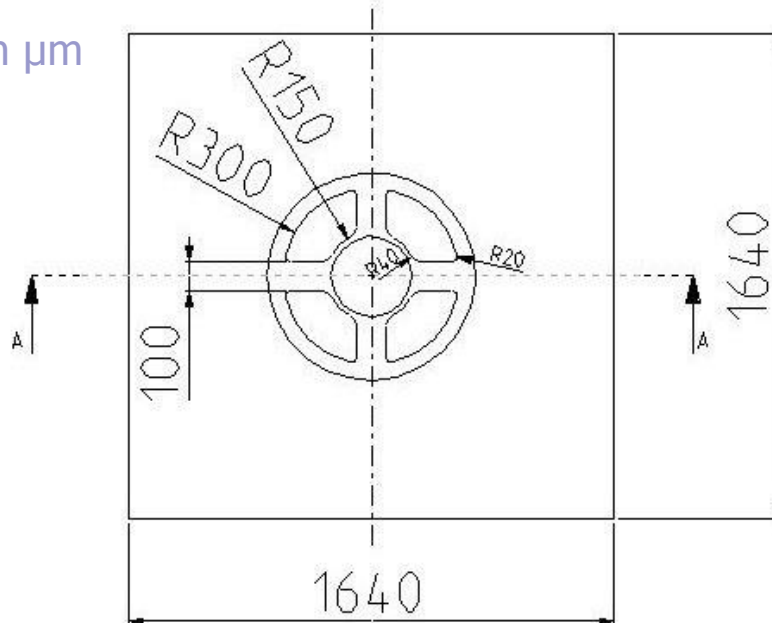
*Sezione del modello 3D del sensore*

Il sensore è basato sulla trasduzione piezoresistiva ottenuta impiantando dei piezoresistori nelle braccia della struttura flessibile

# Dimensioni del sensore

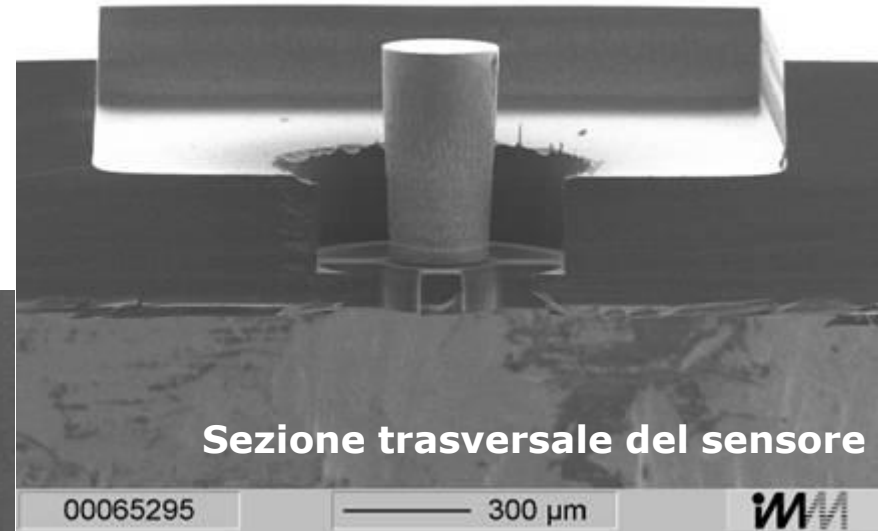
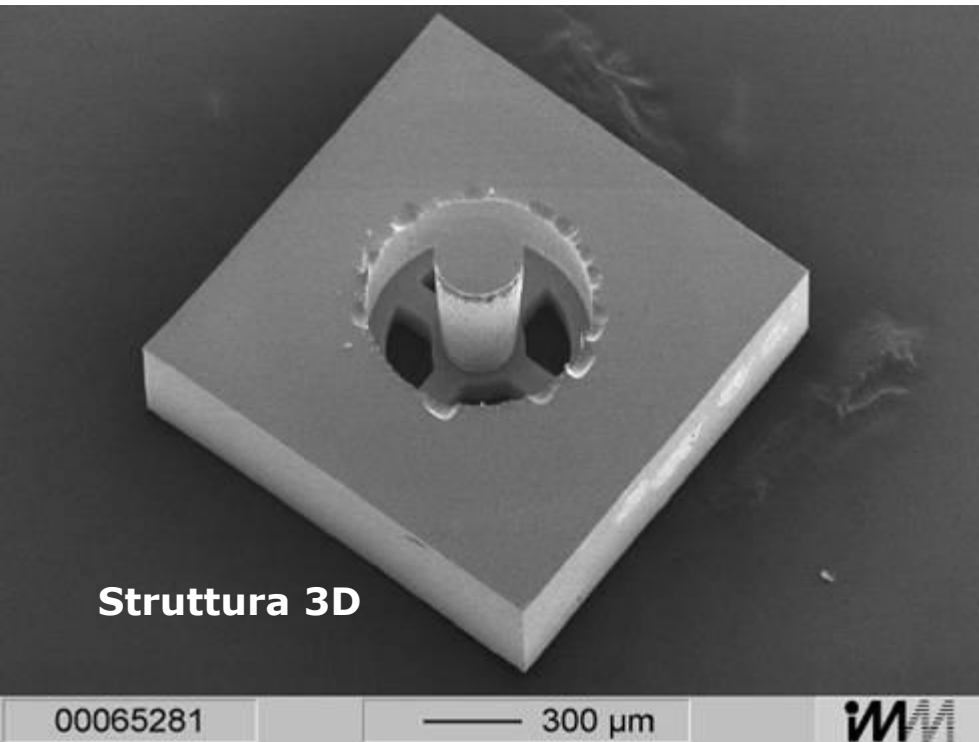


Dimensioni in  $\mu\text{m}$



- Forma a croce, quattro braccia perpendicolari - alta sensibilità alle forze tangenziali
- Cilindro centrale per trasferire il carico alle braccia - blocco di silicio cilindrico integrato totalmente col resto della struttura

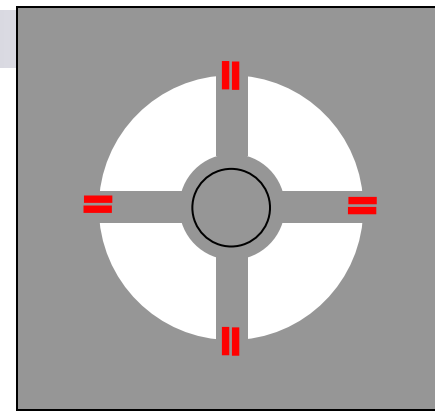
# Struttura del sensore



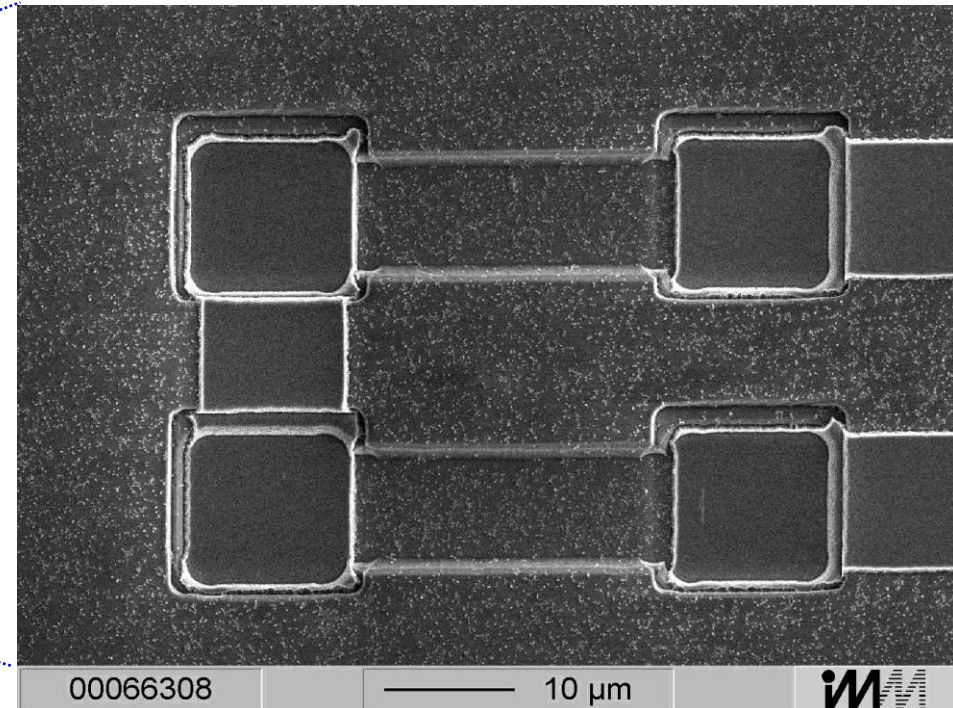
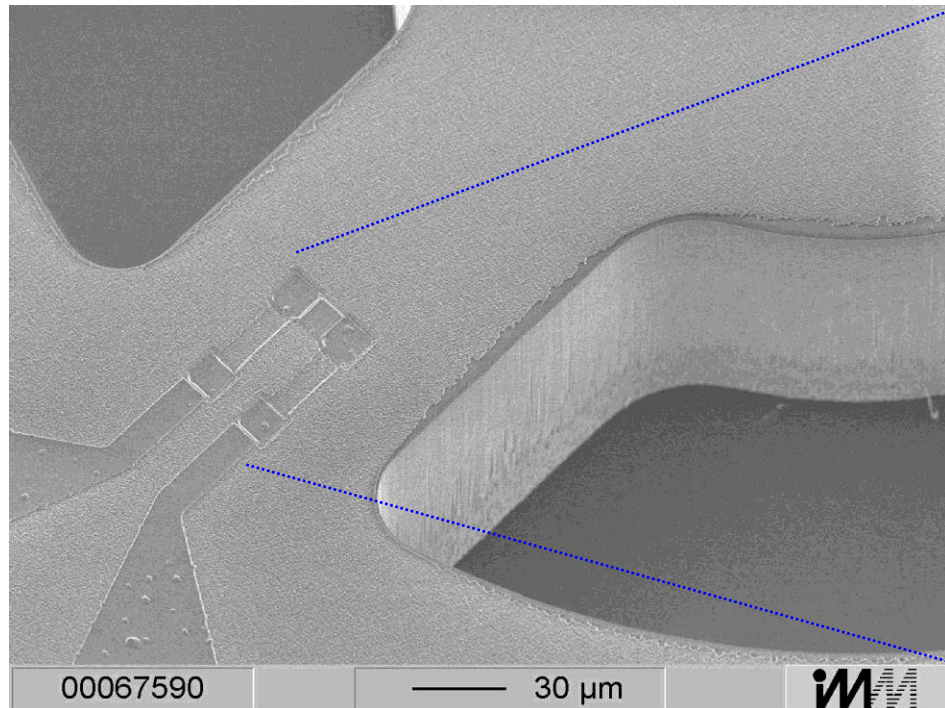
# Piezoresistori

$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \cancel{1+2\nu} + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$

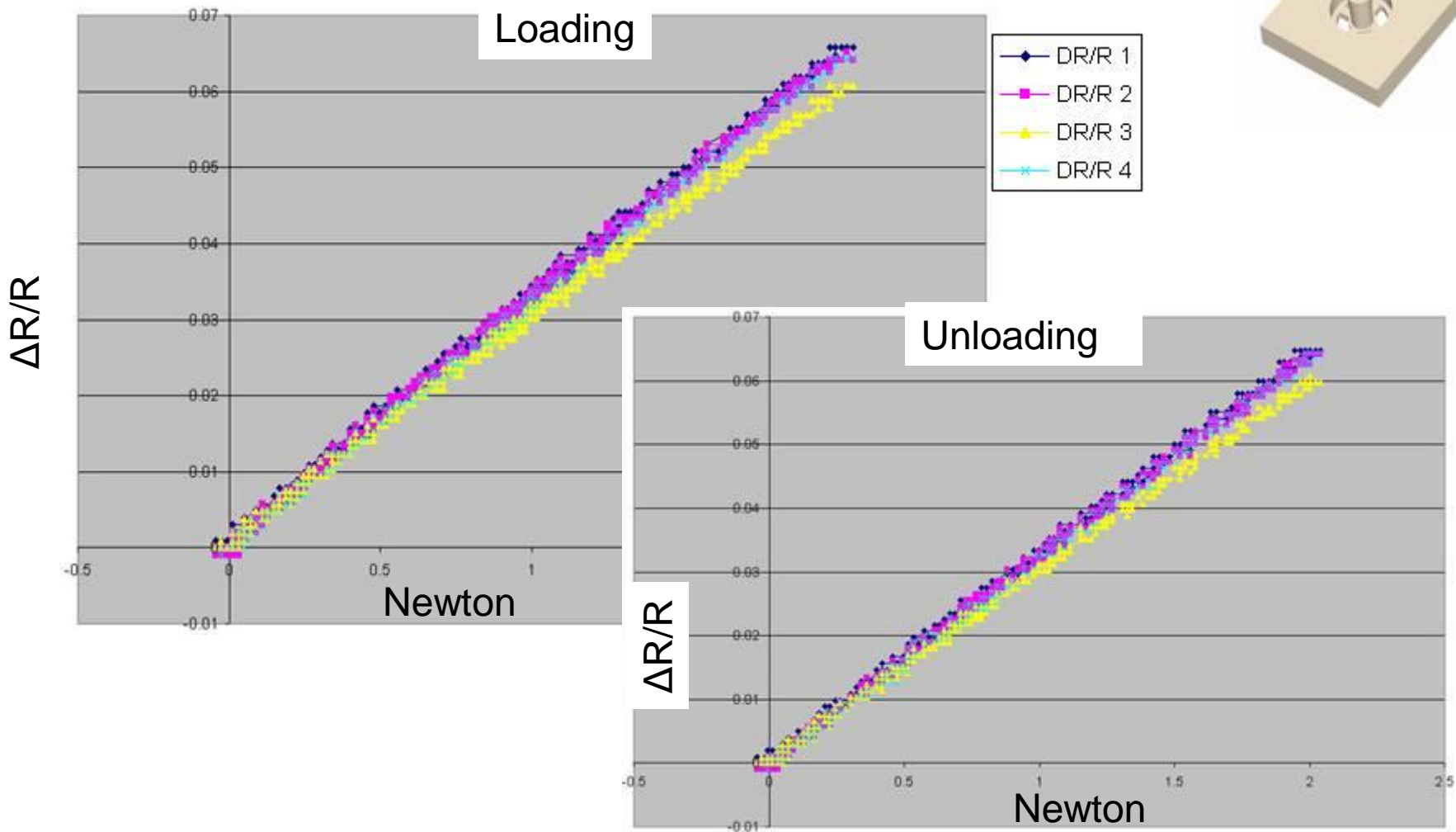
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\pi}{2} \sigma_l$$



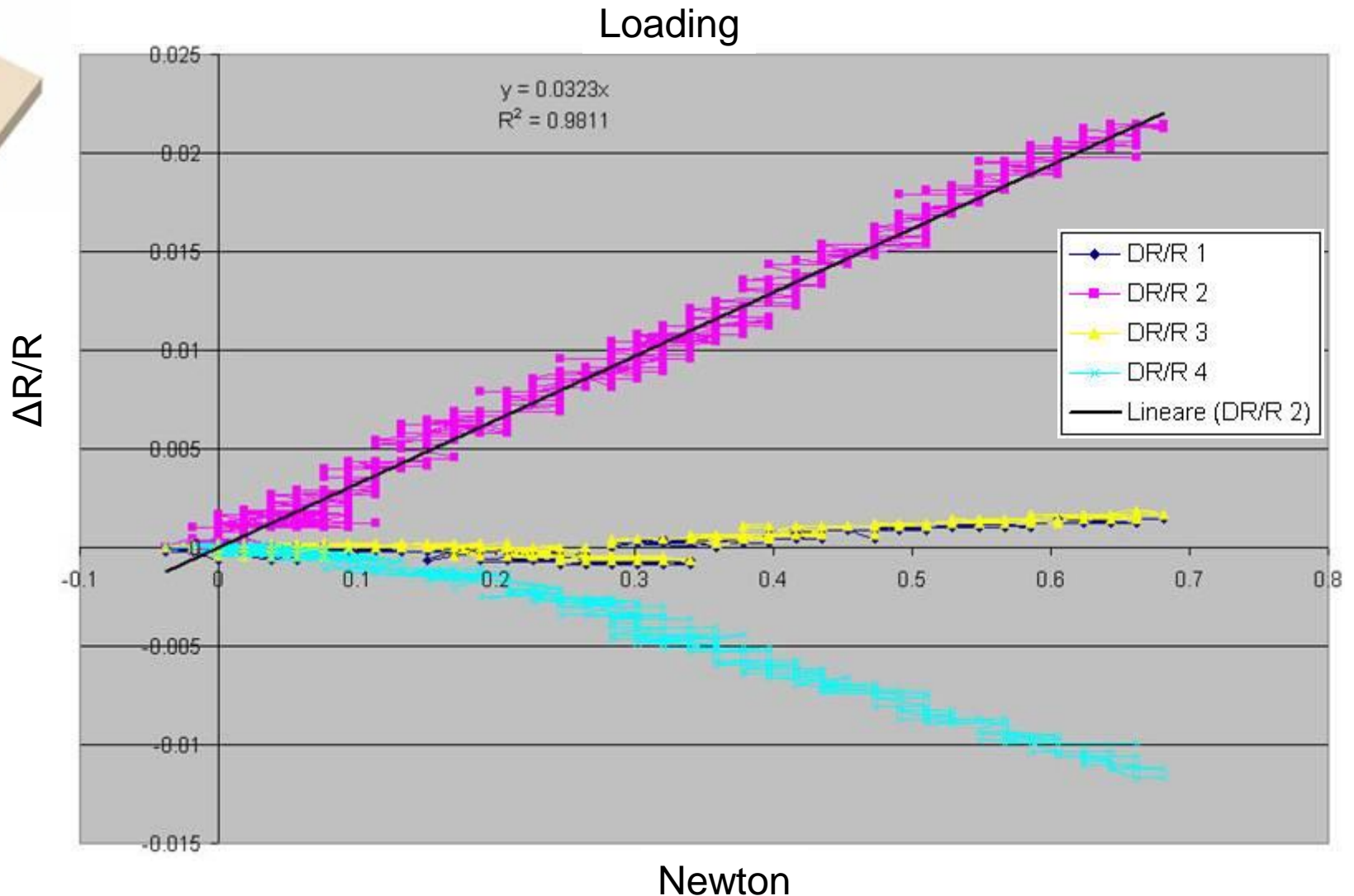
Nei semiconduttori  $1+2\nu$  trascurabile



# Risposta $\Delta R/R$ dei 4 piezoresistori rispetto a una forza normale

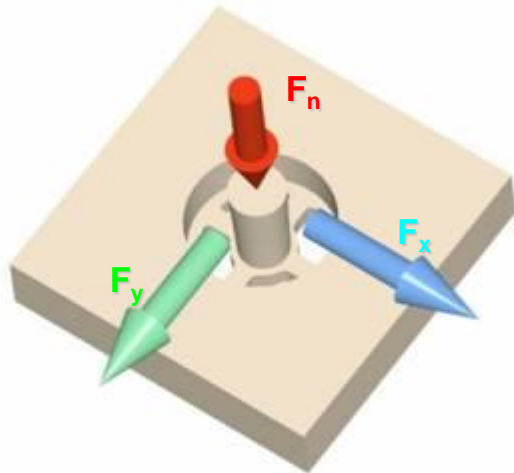


# Risposta $\Delta R/R$ dei 4 piezoresistori rispetto a una forza tangenziale





# Misura della forza



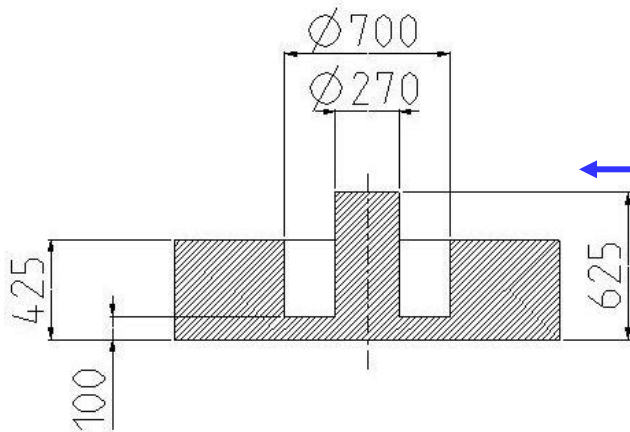
$F_n$  forza normale

$F_x$  e  $F_y$  componenti tangenziali

Procedura di calibrazione:

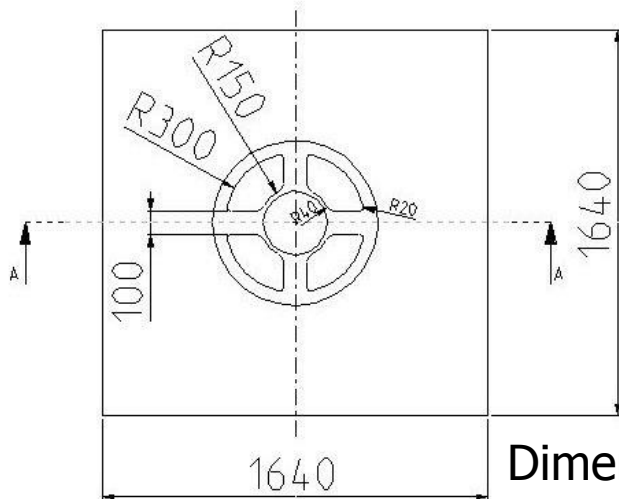
- forze crescenti da 0.5 N a 2.5 N nella direzione normale;
- forze crescenti da 0.1 N to 0.4 N in due direzioni tangenziali, perpendicolari tra di loro.

# Dimensioni finali

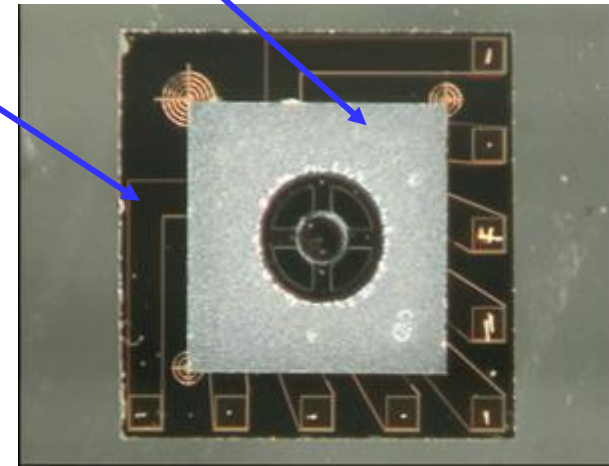


← Chip A (Sensor Chip):  
1,5 x 1,5 mm

Chip B (Carrier Chip):  
2,3 x 2,3 mm

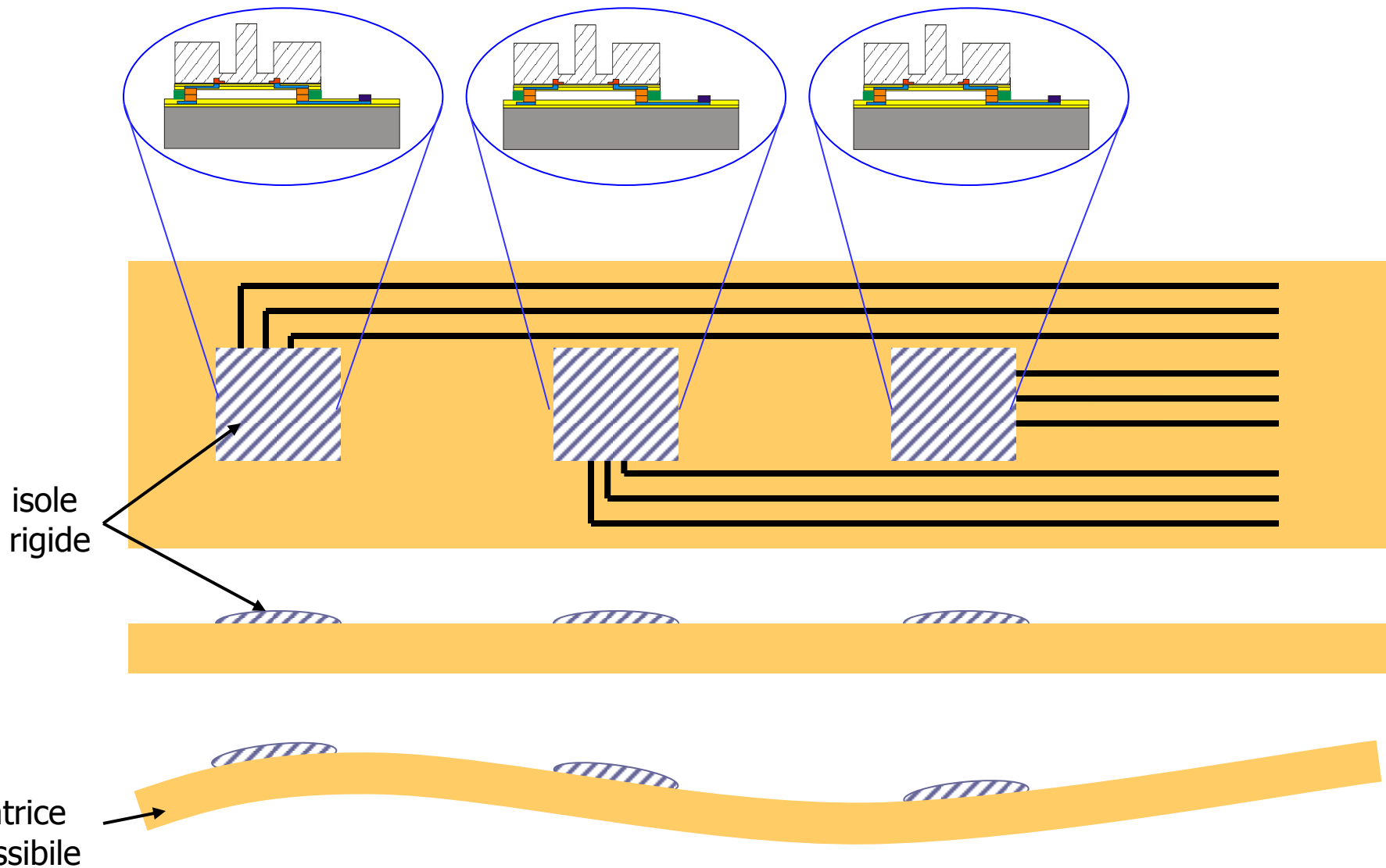


Dimensioni  
in  $\mu\text{m}$

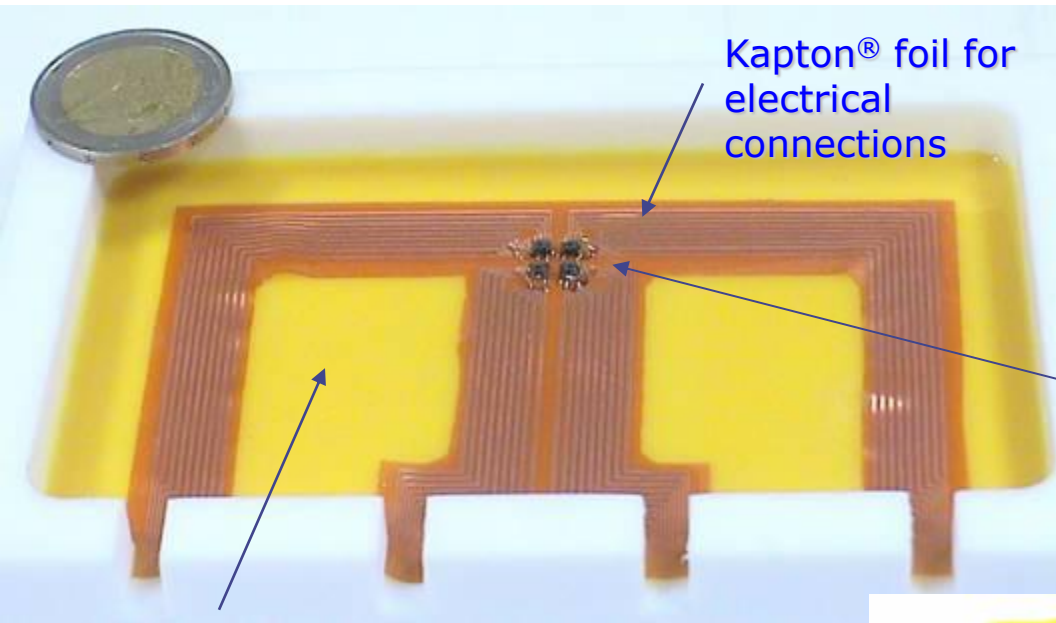


Dimensioni finali del sensore:  
2300 $\mu\text{m}$  x 2300 $\mu\text{m}$  x 1300 $\mu\text{m}$

# Possibile integrazione su una pelle flessibile

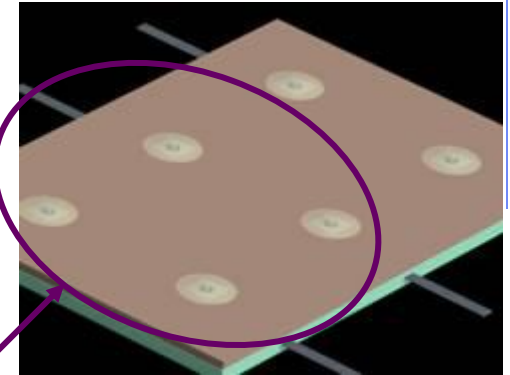


# Possibile integrazione su una pelle flessibile



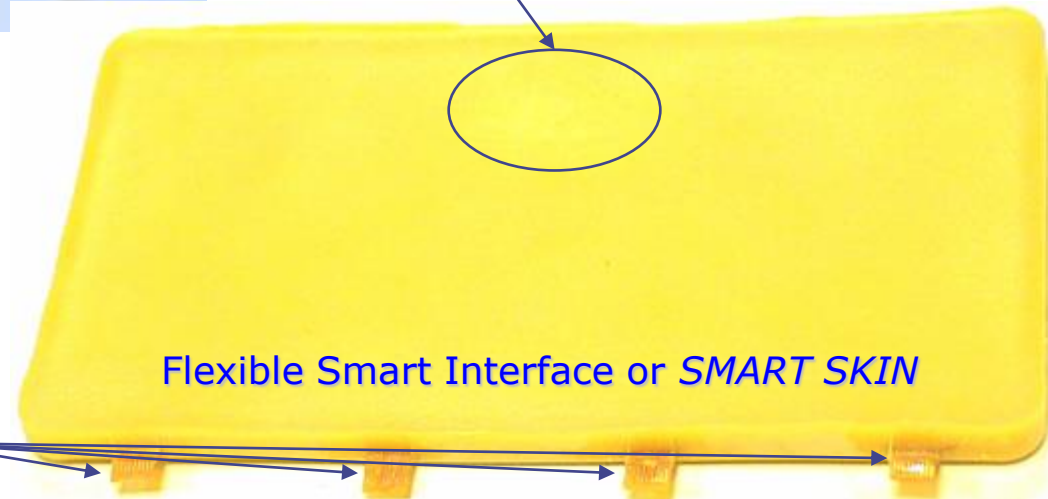
Kapton® foil for electrical connections

Soft polyurethane for circuit embedding



2 x 2 SENSOR ARRAY

Electrical connections to the conditioning electronics



Flexible Smart Interface or *SMART SKIN*

# Conclusioni sugli esempi di tecnologie piezoresistive per sensori tattili in biorobotica

Le tecnologie piezoresistive, come utilizzate negli esempi, permettono di misurare:

- a livello di organo sensoriale (polpastrello tattile):
  - la forza applicata sul polpastrello
  - gli eventi di 'controllo tattile'
    - il contatto con l'oggetto
    - il contatto dell'oggetto con altri oggetti
- a livello di sensore:
  - la forza applicata su un'area di 2,3 x 2,3 mm