

Corso di Robotica (ROB)

Modulo C. Percezione Attiva

Il tatto in robotica

Cecilia Laschi

Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna

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
- Esplorazione tattile

Riferimenti bibliografici:

Russel, "Robot Tactile Sensing", Prentice Hall

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**
- **Esplorazione tattile**

Riferimenti bibliografici:

Russel, "Robot Tactile Sensing", Prentice Hall

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



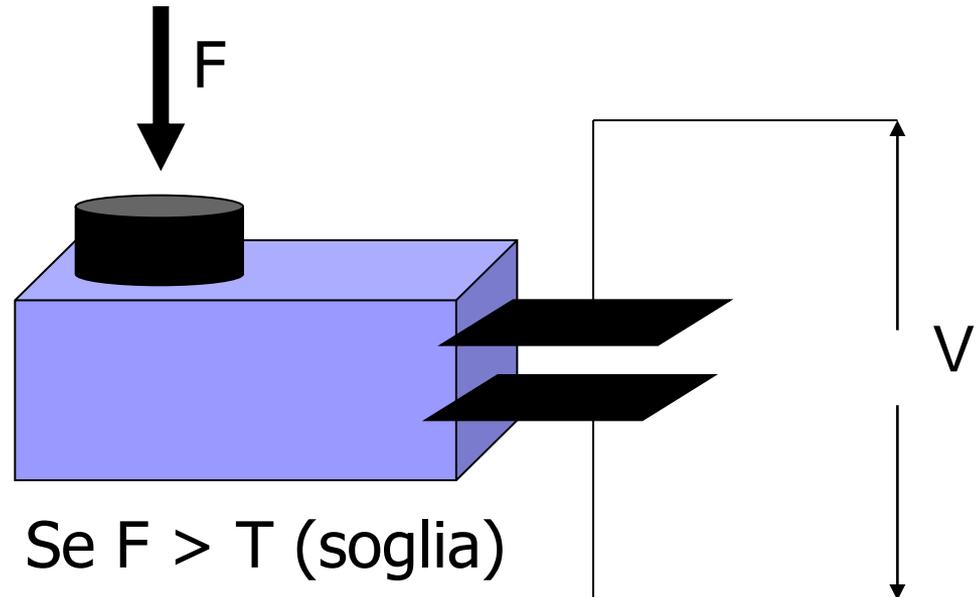
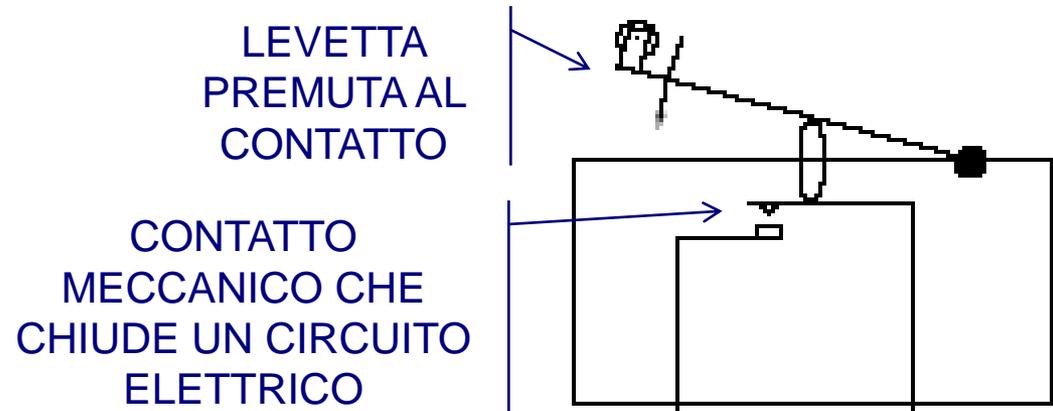
- FUNZIONE DI TRASFERIMENTO
- CALIBRAZIONE (TARATURA)
- LINEARITÀ
- ISTERESI
- ACCURATEZZA
- RIPETIBILITÀ
- RISOLUZIONE
- SENSIBILITÀ
- SENSIBILITÀ AL RUMORE
- VITA UTILE
- STABILITÀ

Principali tecnologie

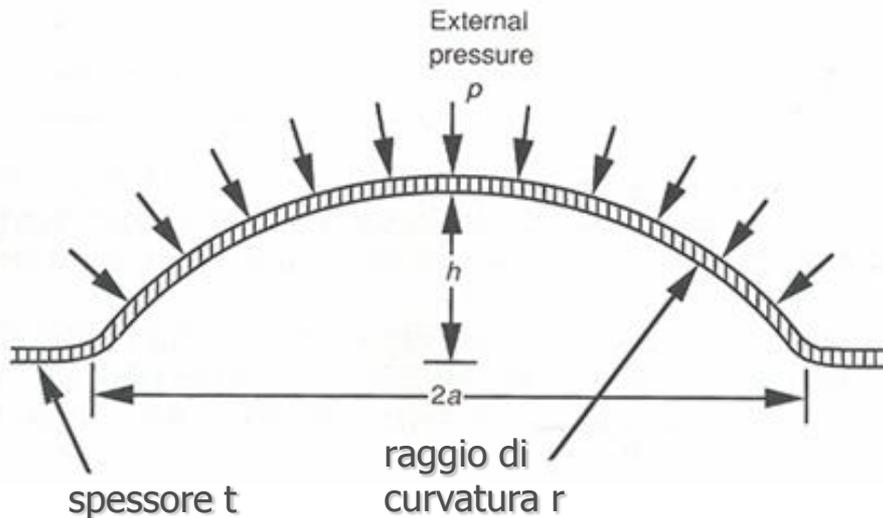
- Sensori meccanici: switch come sensori tattili
- Sensori piezoresistivi
- Sensori piezoelettrici
- Sensori ottici
- Sensori magnetici
- Sensori capacitivi
- Sensori FSR
- Sensori QTC

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



Switch a deflessione



Dalla teoria delle deflessioni elastiche:
Parametro geometrico λ

$$\lambda^2 = \frac{a^2}{t \cdot r} \sqrt{12(1-\nu^2)}$$

Parametro di carico R

$$R = \frac{p}{E} \left(\frac{a}{t} \right)^4 (1-\nu^2)$$

con

p = pressione applicata

E = modulo di Young del materiale metallico

ν = rapporto di Poisson del materiale metallico

Sfaglia metallica

Deformazione elastica, che causa la chiusura di un circuito elettrico

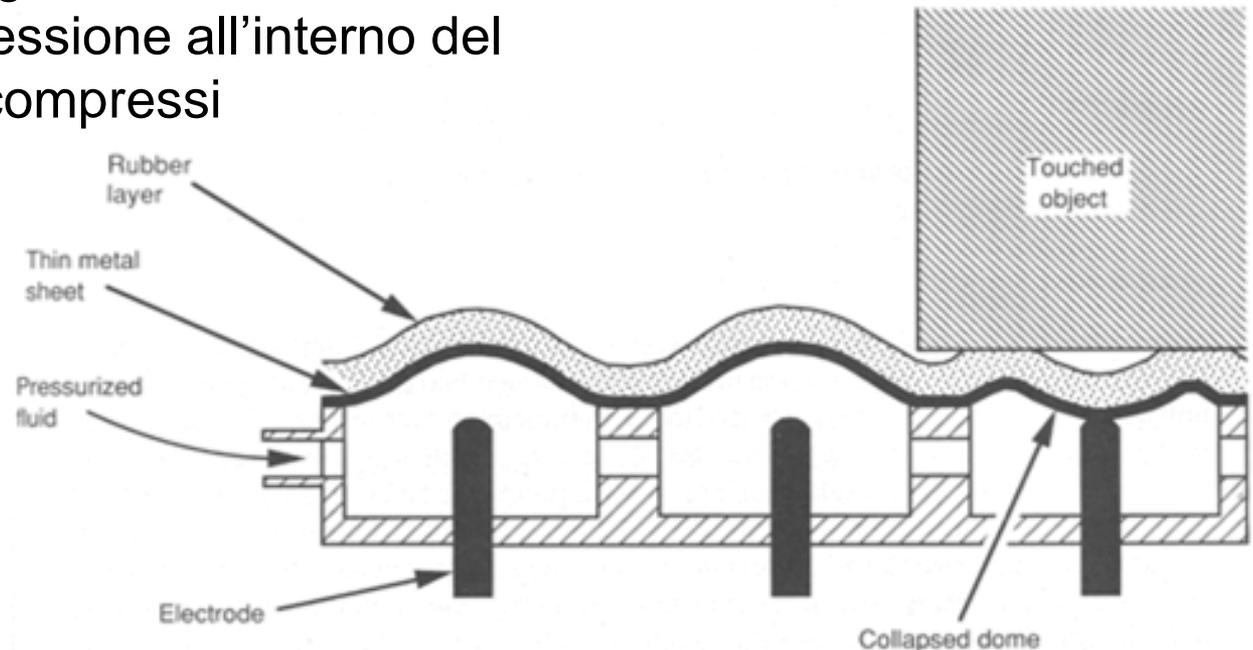
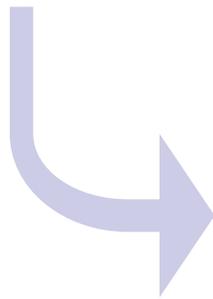
Risposta binaria alla pressione applicata

Relazione tra il parametro geometrico λ e il corrispondente parametrico di carico critico R_{cr} , oltre il quale si ha la deflessione

λ	2,08	3	3,5	4	5	6
R_{cr}	2,46	4,1	8	14	33	77

Sensore di contatto pneumatico

- 100 unità disposte a matrice
- Spaziatura: 2,54 mm
- Variazione della soglia di contatto attraverso l'applicazione di pressione all'interno del sensore con fluidi compressi



Alcuni svantaggi:

- bassa risoluzione spaziale
- eventuali forze trasversali non vengono rilevate come tali e inoltre possono ridurre la deflessione
- sfoglie di metallo soggette a rottura
- output binario

Sensore tattile digitale

Un array con una densità elevata di switch con soglie di contatto diverse potrebbe misurare la pressione applicata.

La profondità massima che può raggiungere una sfoglia metallica sottoposta a pressione all'interno di un foro circolare è data da:

$$\delta \propto \frac{pa}{E}$$

con :

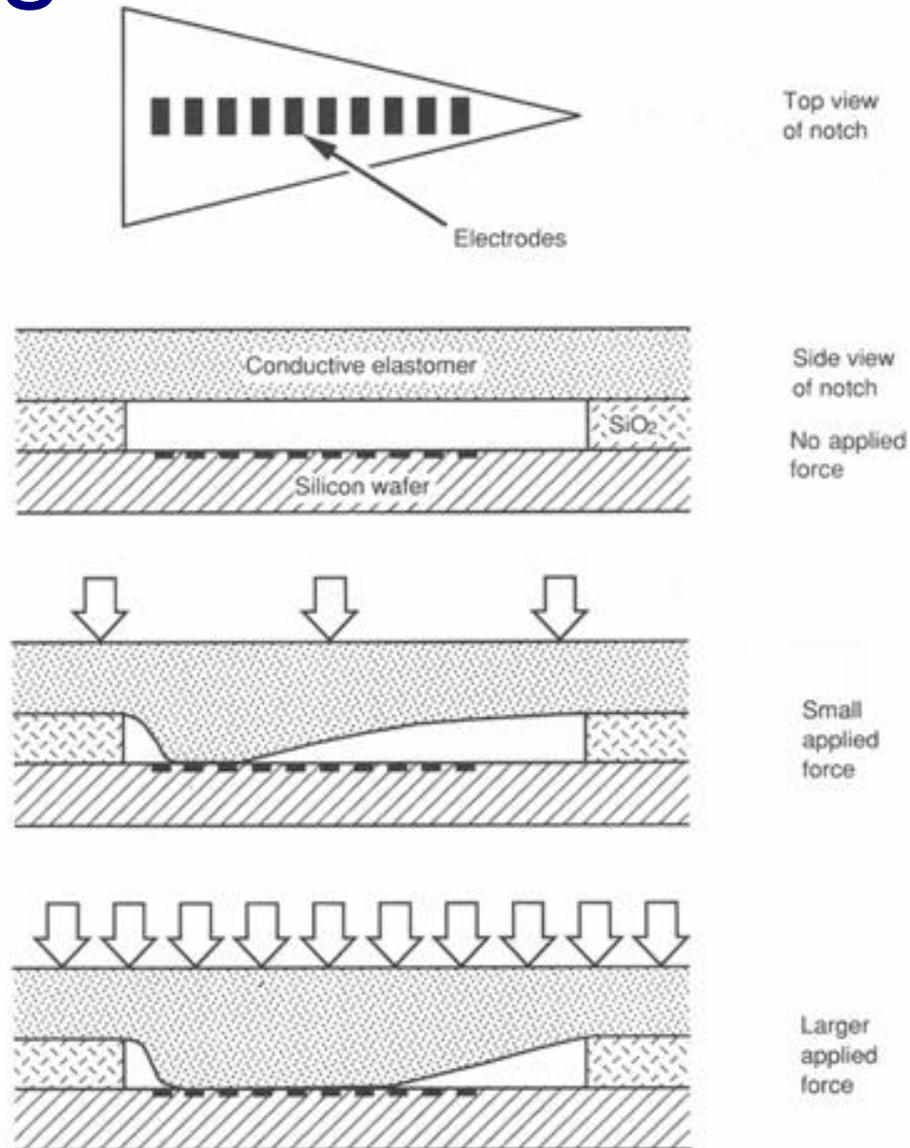
δ = massima deflessione

p = pressione applicata

a = raggio del foro

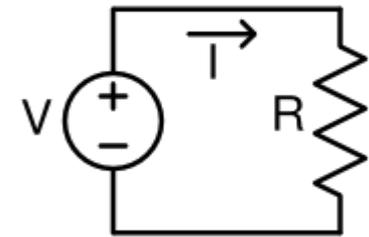
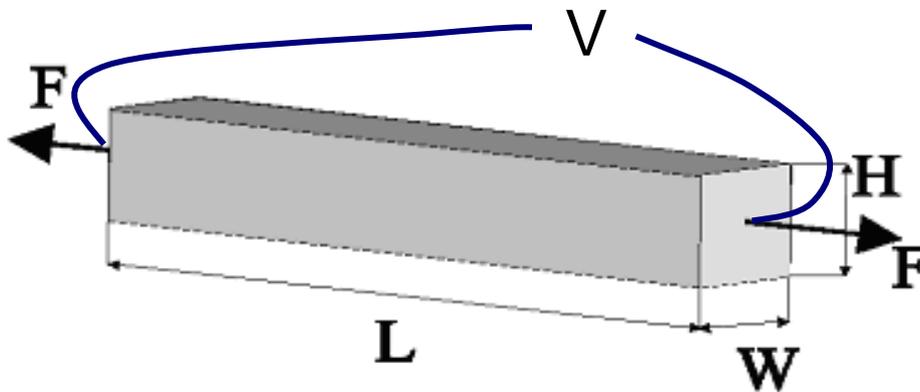
E = modulo di Young

- 48 unità
- area di ogni unità: 0,3 x 0,6 mm
- 15 elettrodi per ottenere 16 livelli di pressione
- variando la forma del foro si possono ottenere risposte lineari, logaritmiche o esponenziali



Effetto piezoresistivo

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



$$V=RI$$

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

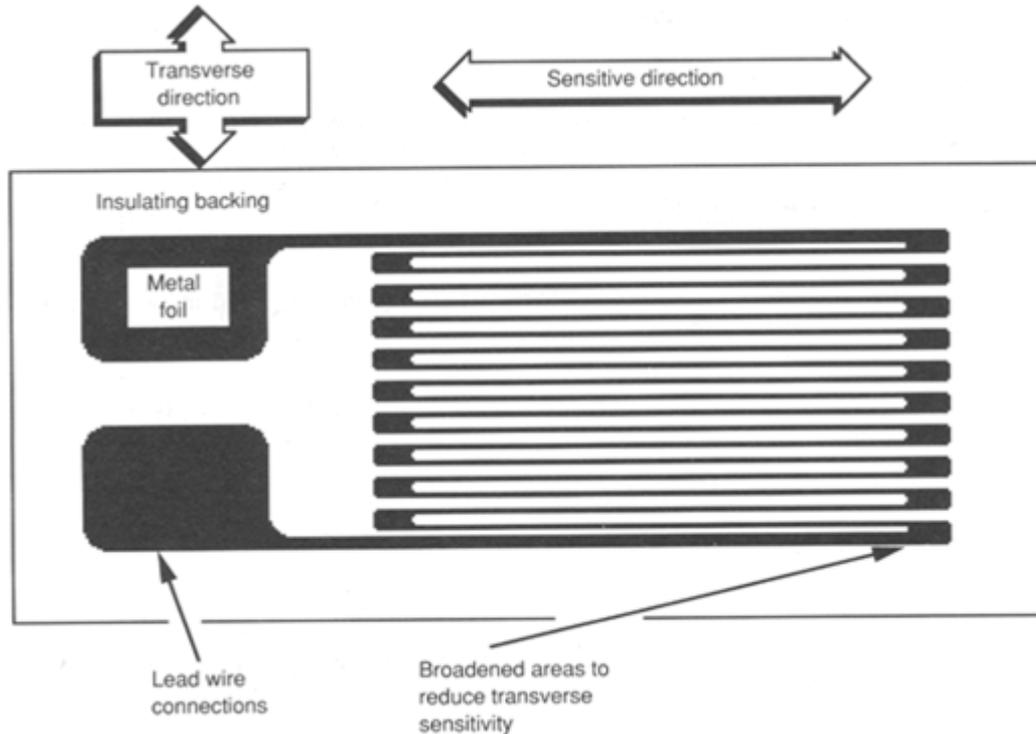
con ρ = resistività del materiale,

L, W, H = dimensioni del parallelepipedo

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

ν = rapporto di Poisson del materiale

Strain gauge

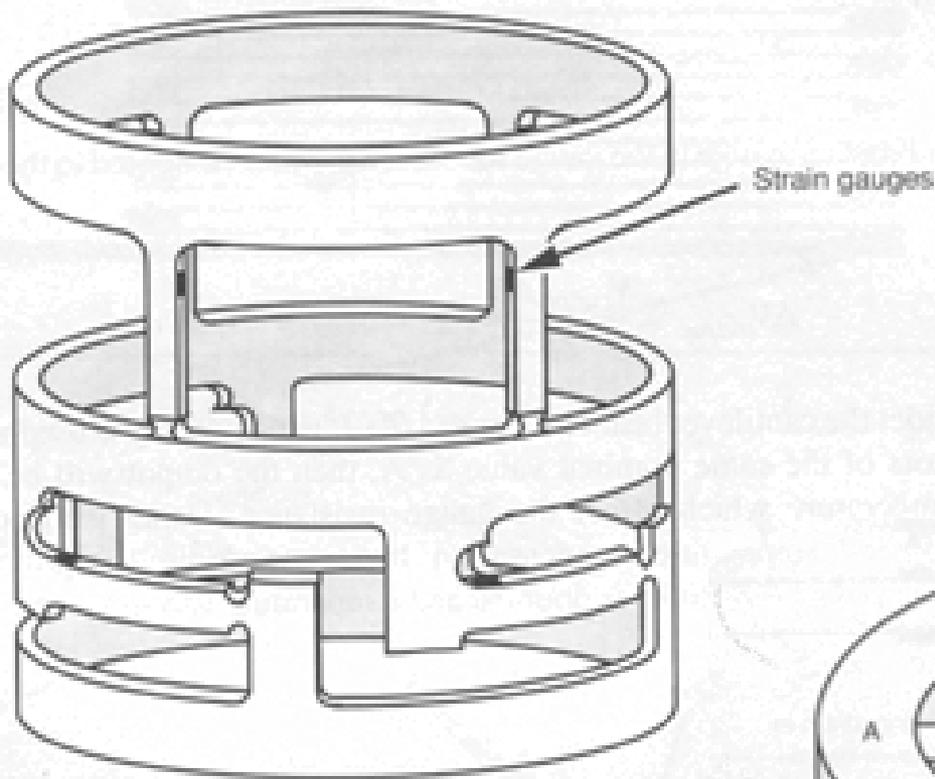


La forma del sensore serve a renderlo più sensibile in una direzione che nell'altra

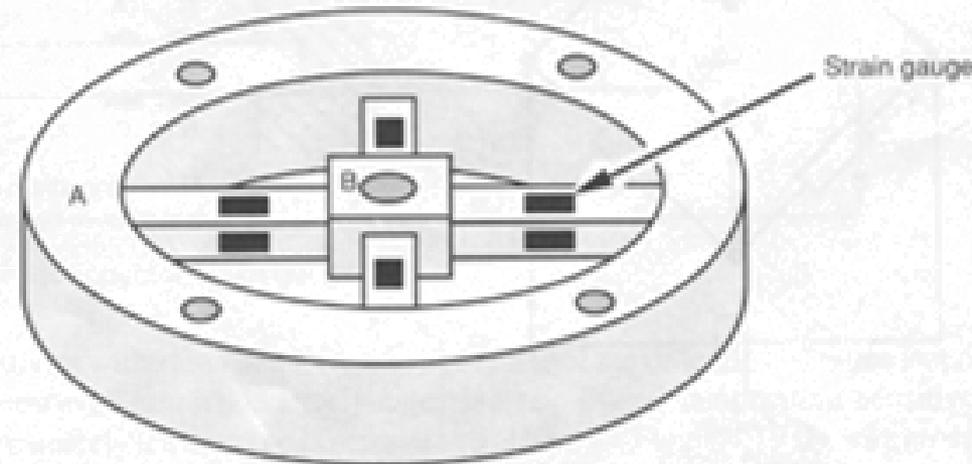
Fattore di Gauge:
$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$

ν = rapporto di Poisson del materiale

Sensori di forza/coppia a 3 componenti



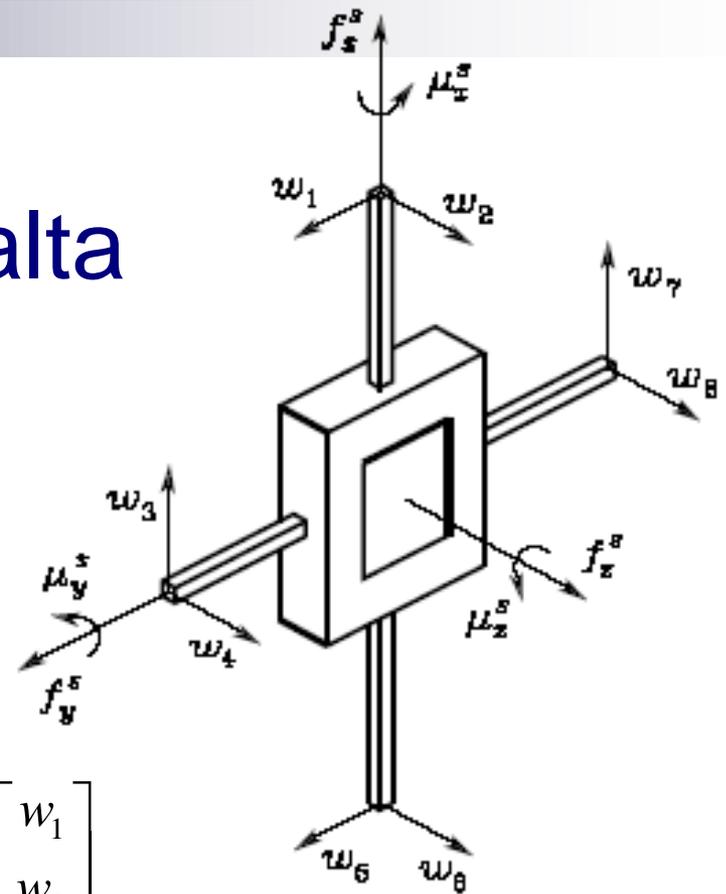
- Strutture meccaniche con direzioni di deformazione preferenziali, date da indebolimenti, su 3 assi
- Strain gauge disposti sugli indebolimenti



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

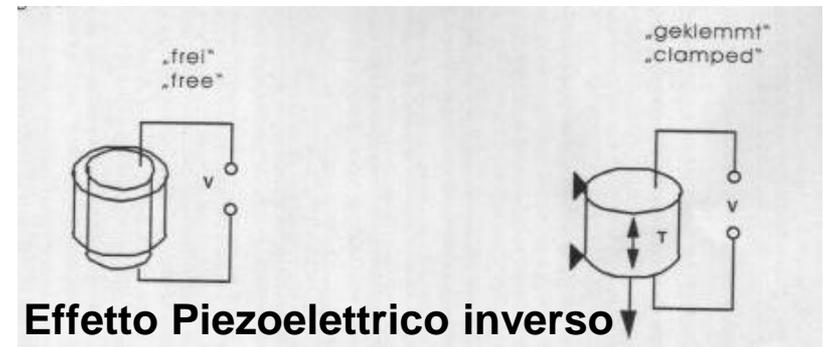
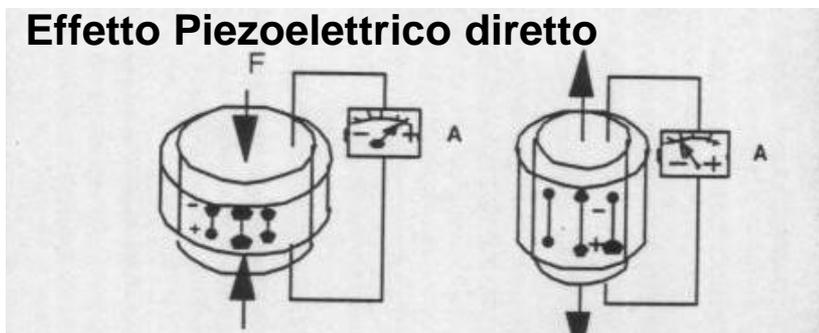
$$\begin{bmatrix} f_x^s \\ f_y^s \\ f_z^s \\ \mu_x^s \\ \mu_y^s \\ \mu_z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 & c_{17} & 0 \\ c_{21} & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & c_{34} & 0 & c_{36} & 0 & c_{38} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & c_{48} \\ 0 & c_{52} &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



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.



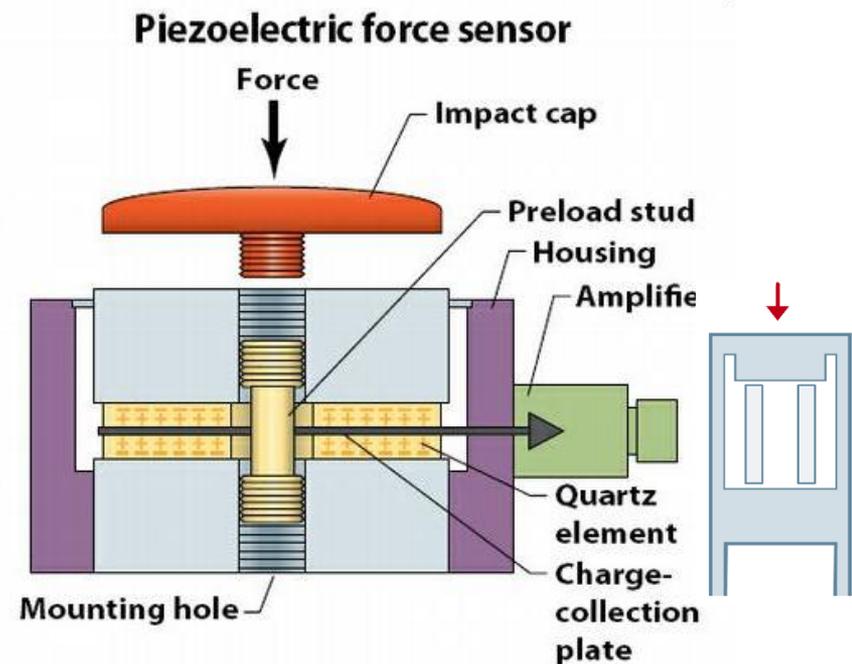
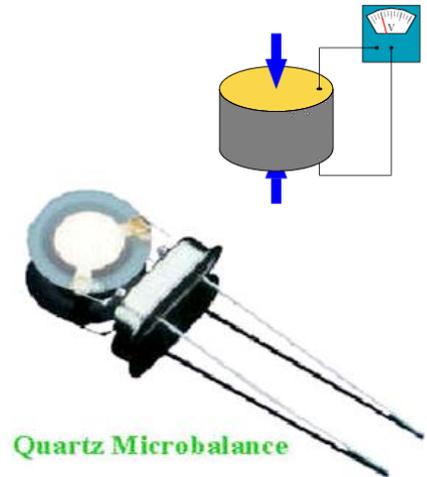
- È sfruttato per misure di Pressione, Forza o Accelerazione

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 θ_c :

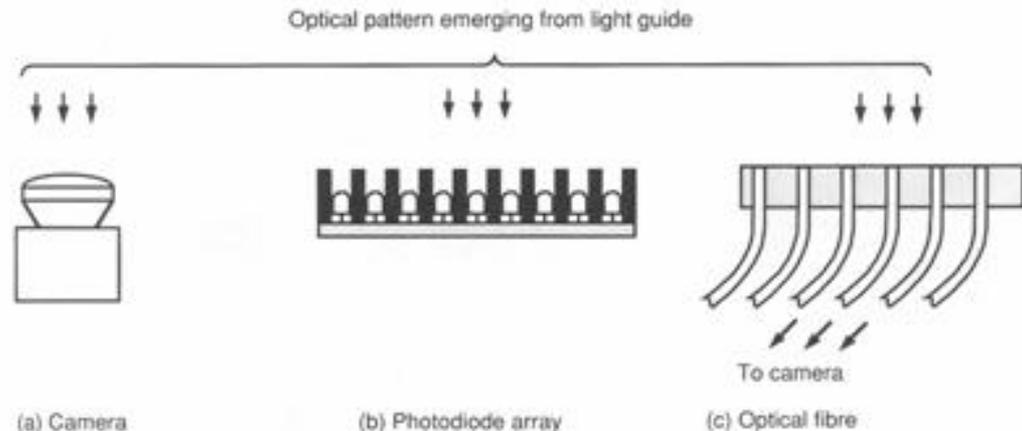
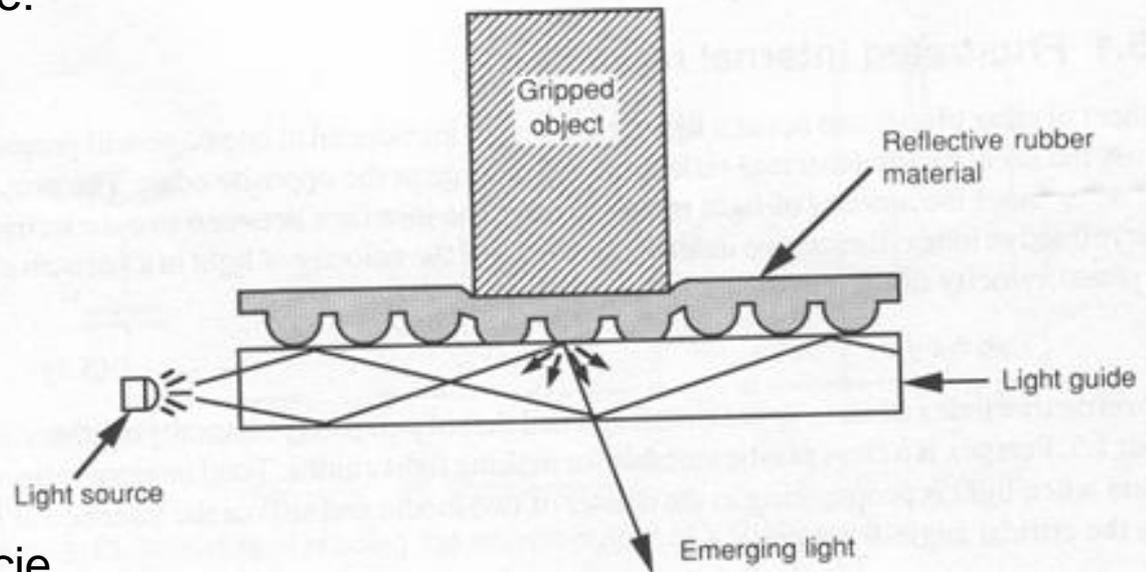
$$\sin \theta_c = n_2/n_1 \quad \text{con } n_1 > n_2$$

Riflessione interna totale:

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

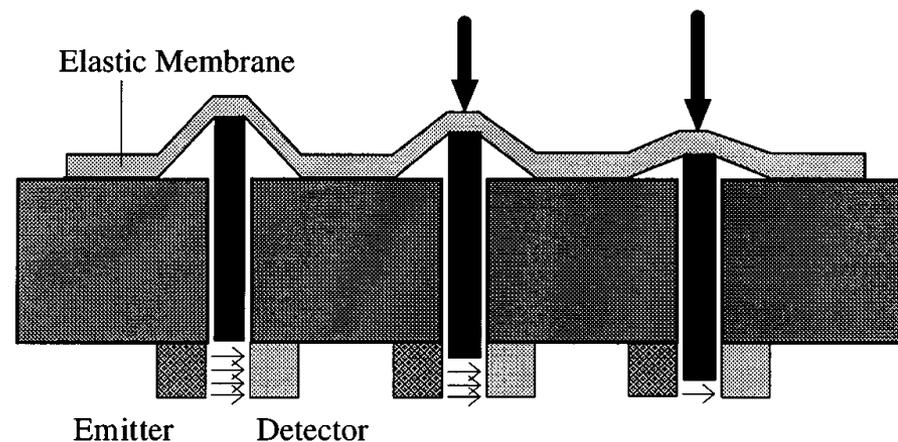
All'interno di una guida ottica la luce si propaga se incide sulla superficie dell'interfaccia tra la guida ottica e l'aria con un angolo superiore a θ_c

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

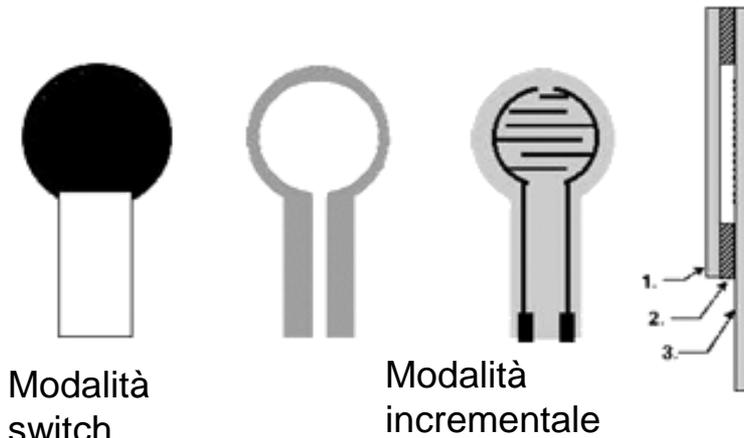


Sensori ottici (ad occlusione)

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.

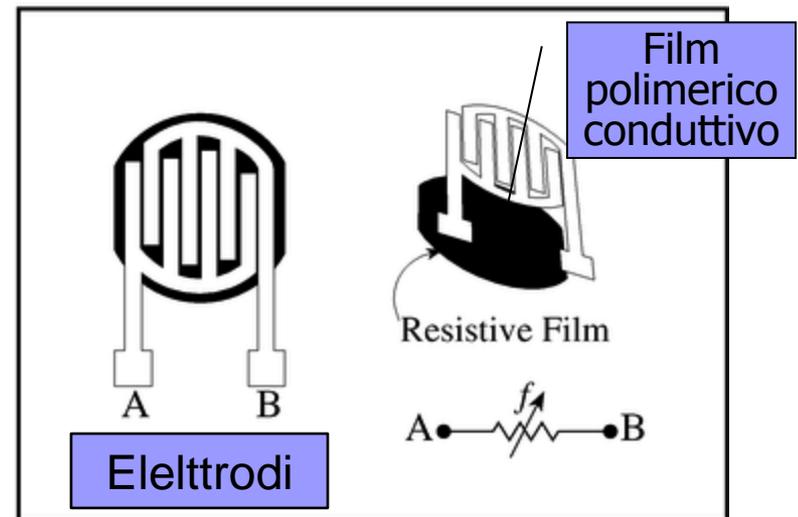
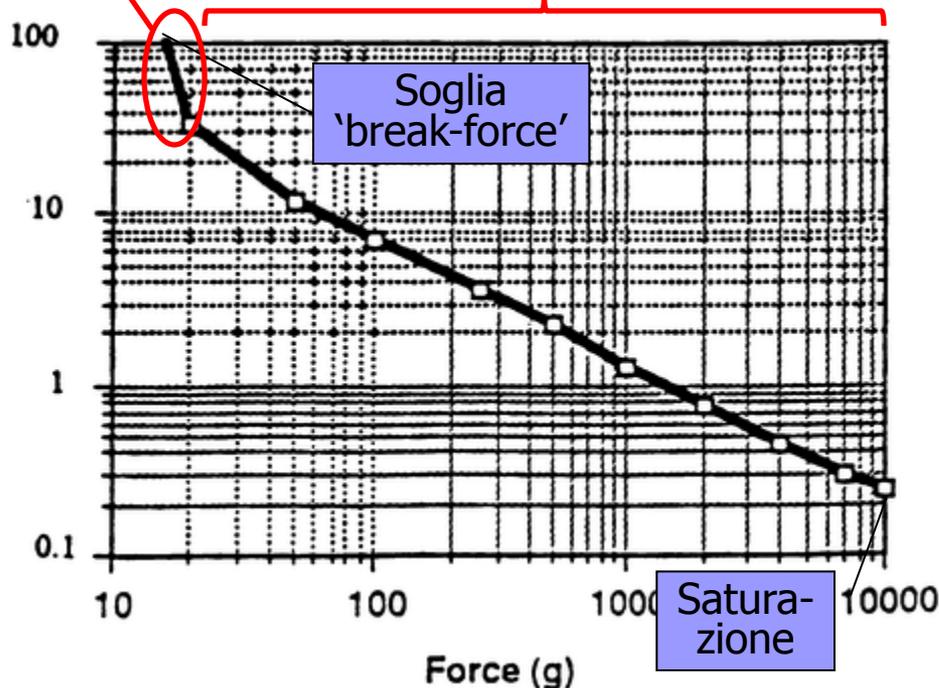


FSR – Force Sensing Resistors



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

- Bassa accuratezza
- Bassa sensibilità
- Bassa isteresi
- Economici

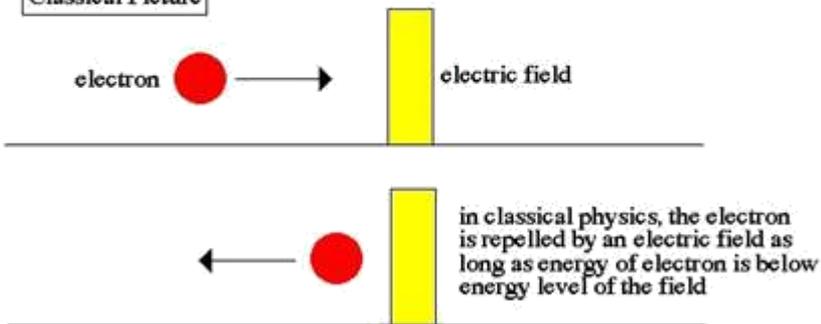


Sensori QTC (Quantum Tunneling Composites)

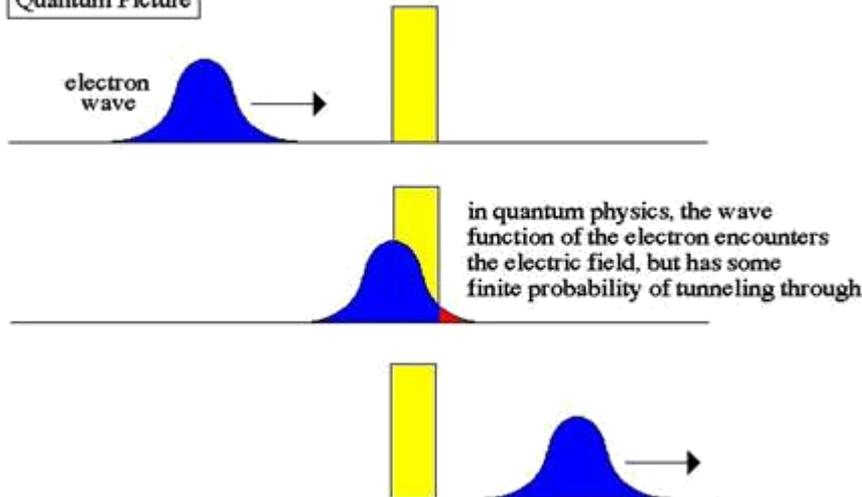
- I QTC possono trasformarsi da perfetti isolanti a conduttori simili ai metalli quando deformati
- La deformazione può risultare da compressione, taglio o stiramento
- La risposta dei QTC può essere modulata sullo spettro delle forze applicate
- La transizione da isolante a conduttore segue una curva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

Quantum Tunneling

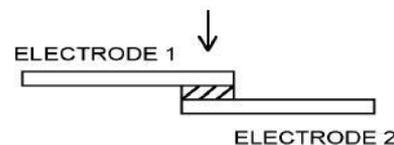
Classical Picture



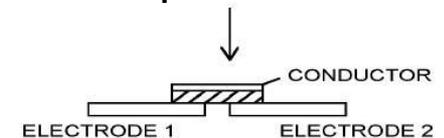
Quantum Picture



Configurazione sandwich



Configurazione ponte



 = QTC  = FORCE

Sensori QTC

Dimensioni

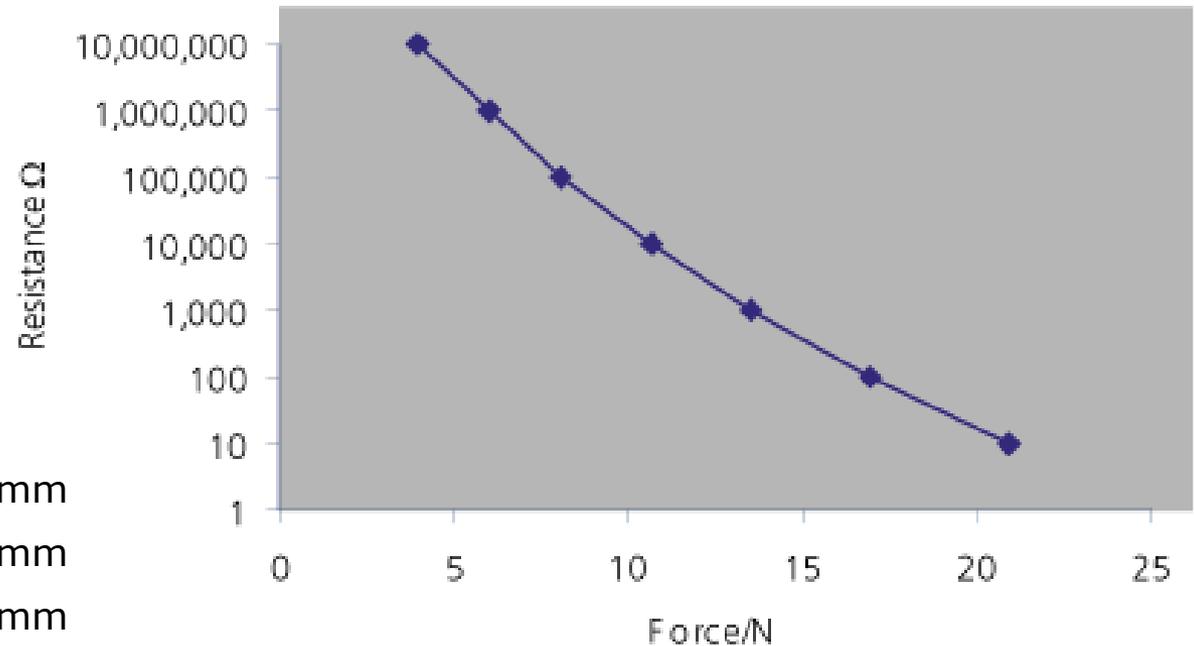
Larghezza	3.6 mm
Lunghezza	3.6 mm
Spessore	1.0 mm

Caratteristiche meccaniche

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

Caratteristiche elettriche

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



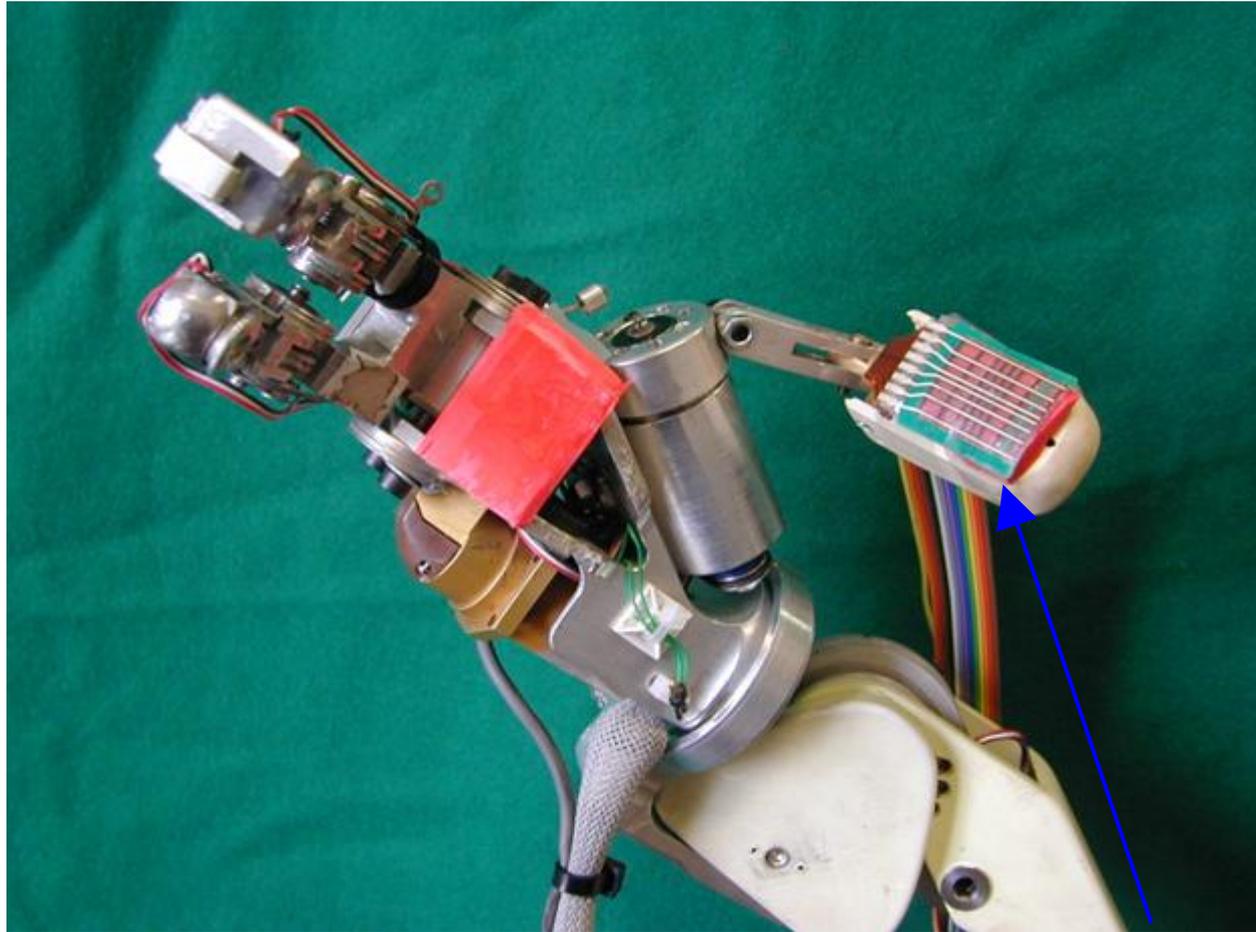
Sommario della lezione

- 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**
- Esplorazione tattile

- *Riferimenti bibliografici:*

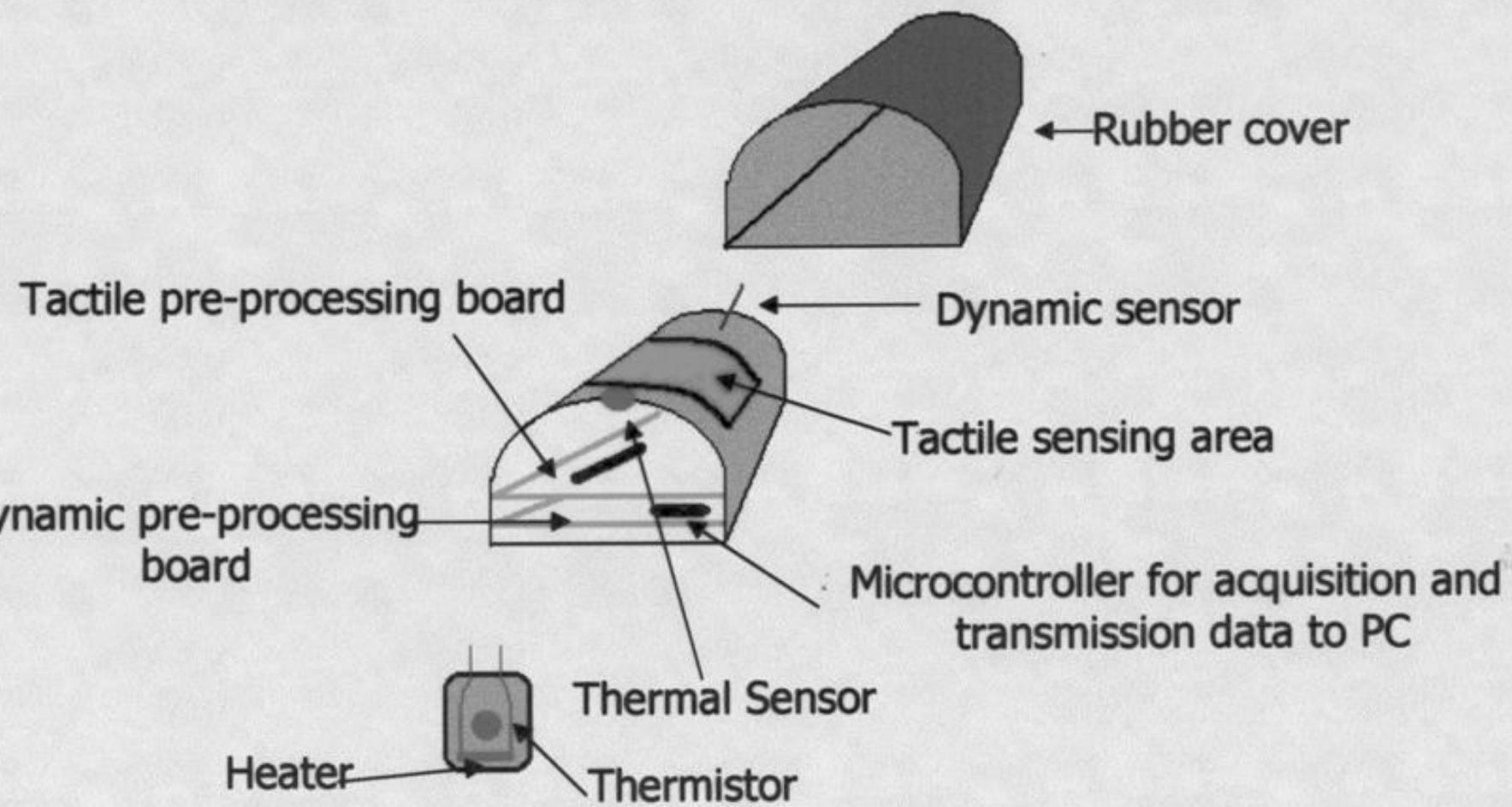
Russel, "Robot Tactile Sensing", Prentice Hall

Sensori Tattili: ARTS Tactile Sensor

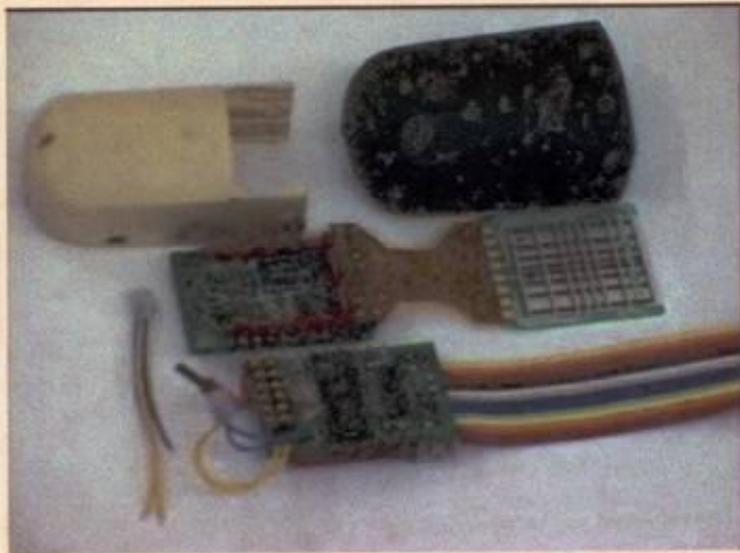


ARTS Tactile Sensor

Scheme of the ARTS integrated fingertip



The ARTS integrated fingertip

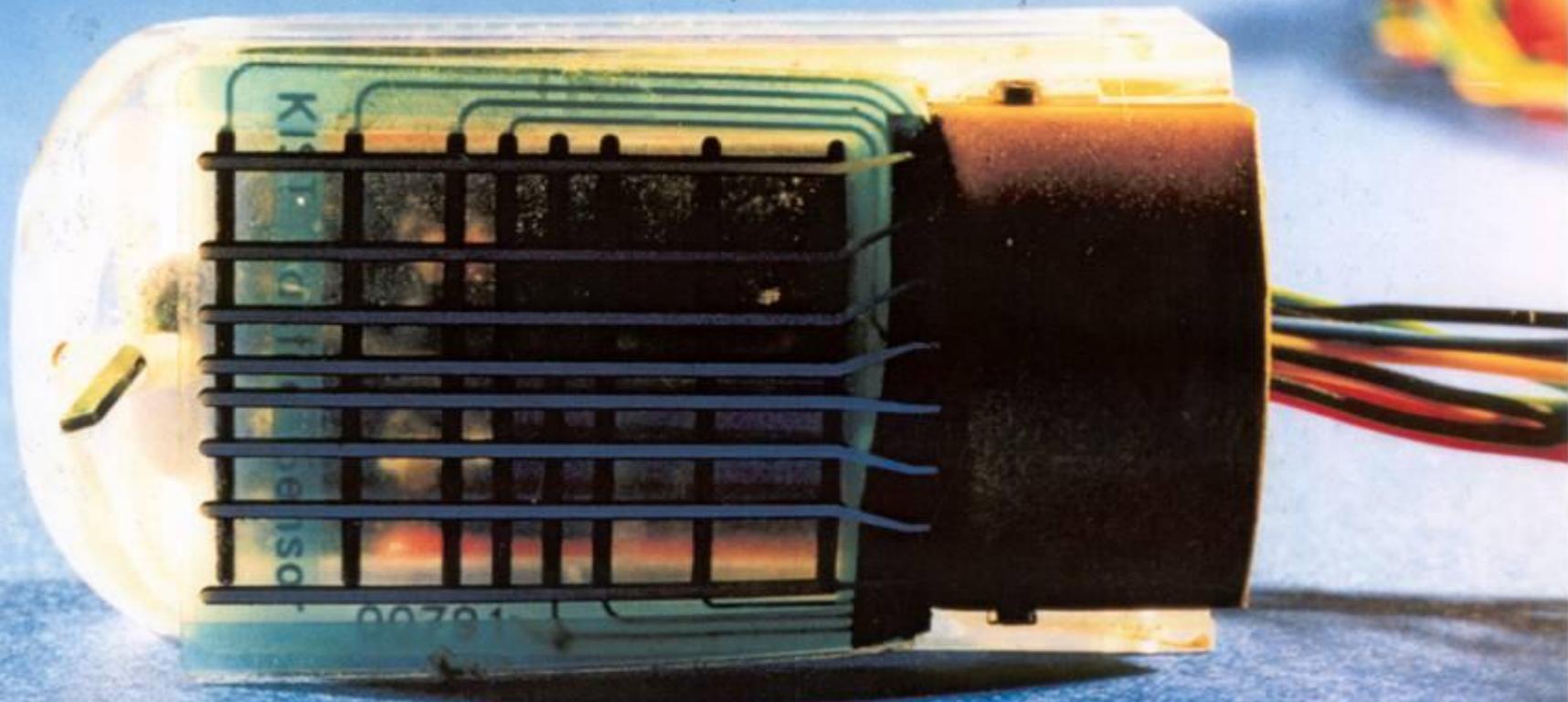


Tactile Sensor Performance

Force resolution	0.1 N (approx.)
Linearity & Hysteresis	$\pm 12\%$ Fs
Uniformity	$\pm 15\%$ Fs @ 3N

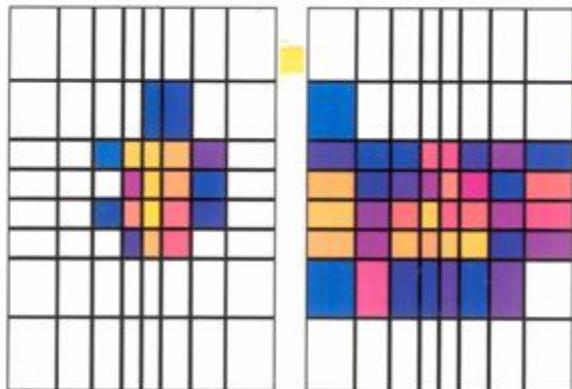
Tactile Array Sensor Physical Characteristics

External Dimensions	24.36mm x 34.9 mm.
Overall Area	850 mm ²
Sensitive Area	432 mm ²
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 ² (each)



Polpastrello sensorizzato

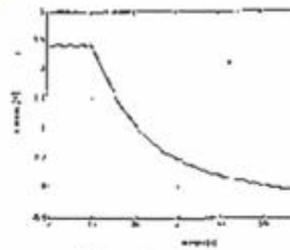
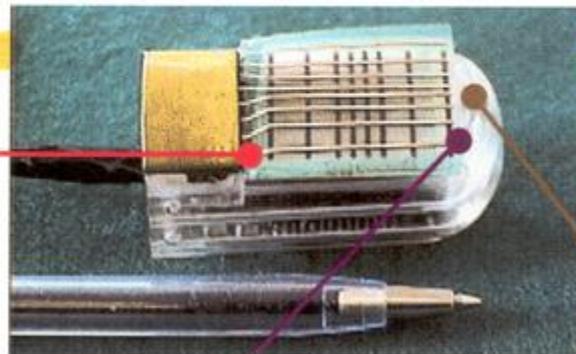
ARTS Lab, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa



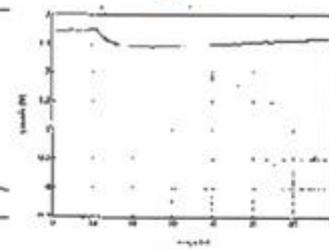
(a)

(b)

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

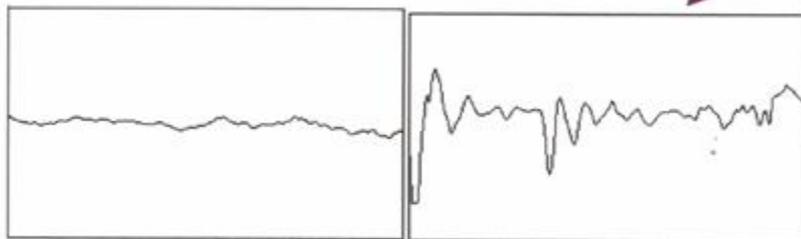


(a)



(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

The “SSSA-PALOMA Hand” at a glance

Hand mechanical specifications

10 d.o.f.s; 6 underactuated, 4 motor actuated

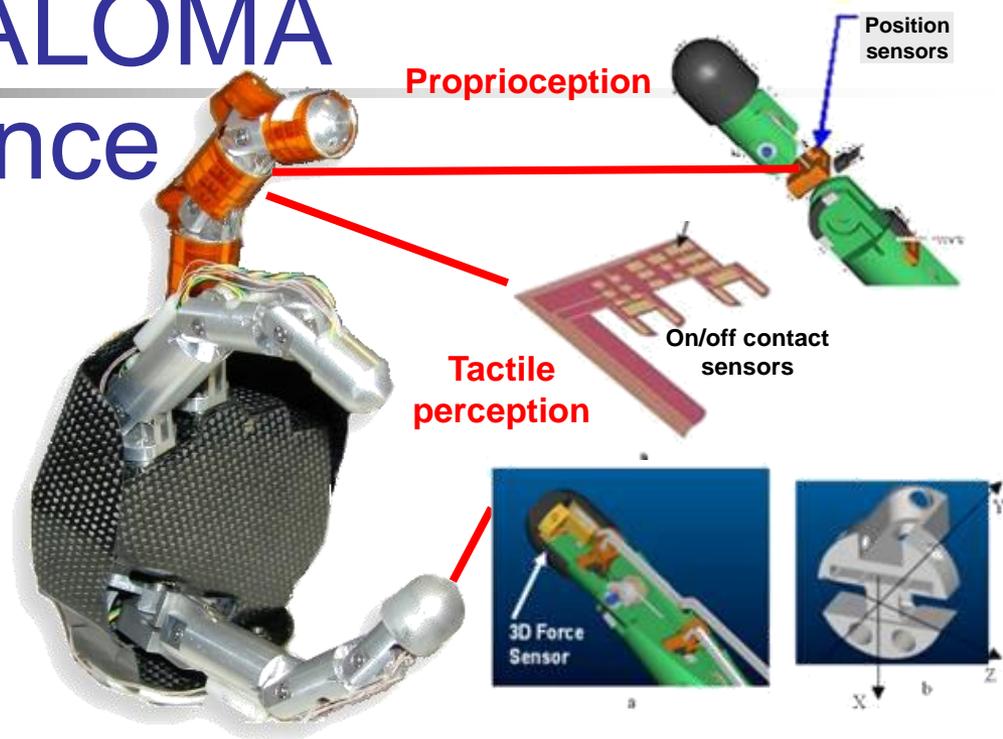
- three identical underactuated 3 dof fingers with cylindrical phalanges, driven by a single cable allowing flexion/extension
- a 2 DoFs trapezo-metacarpal joint at the base of the palm allowing thumb opposition movement (adduction/abduction) towards the other 2 fingers

Weight: about 400gr

Dimension: similar to the human hand

Performance

- trapezo-metacarpal thumb joint abduction/adduction range: 0° - 120°
- finger joints flexion range: 0 - 90°
- load weight: 450 gr
- grasping force: 40 N
- tip to tip force: 15 N
- closing time: 2 sec.



Proprioceptive System

- 3 position Hall-effect sensors, one per phalanx, for each finger
- 4 motor encoders
- 3 force tension sensors providing the tension of the actuation cable

Tactile System

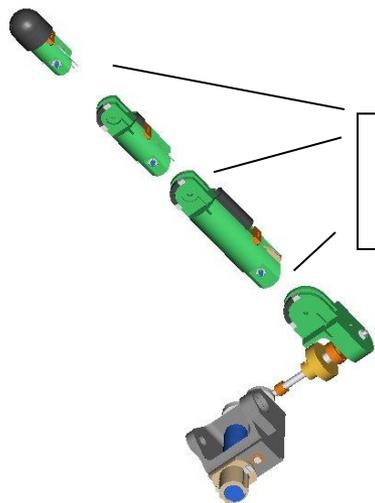
- a 3D force sensor for each finger embedded in the fingertip providing the three force components of the contact
- 3 ON/OFF contact sensors for each finger:
 - 1 on the distal phalanx
 - 1 on the intermediate phalanx
 - 1 on the proximal phalanx

Polpastrello tattile per una mano robotica

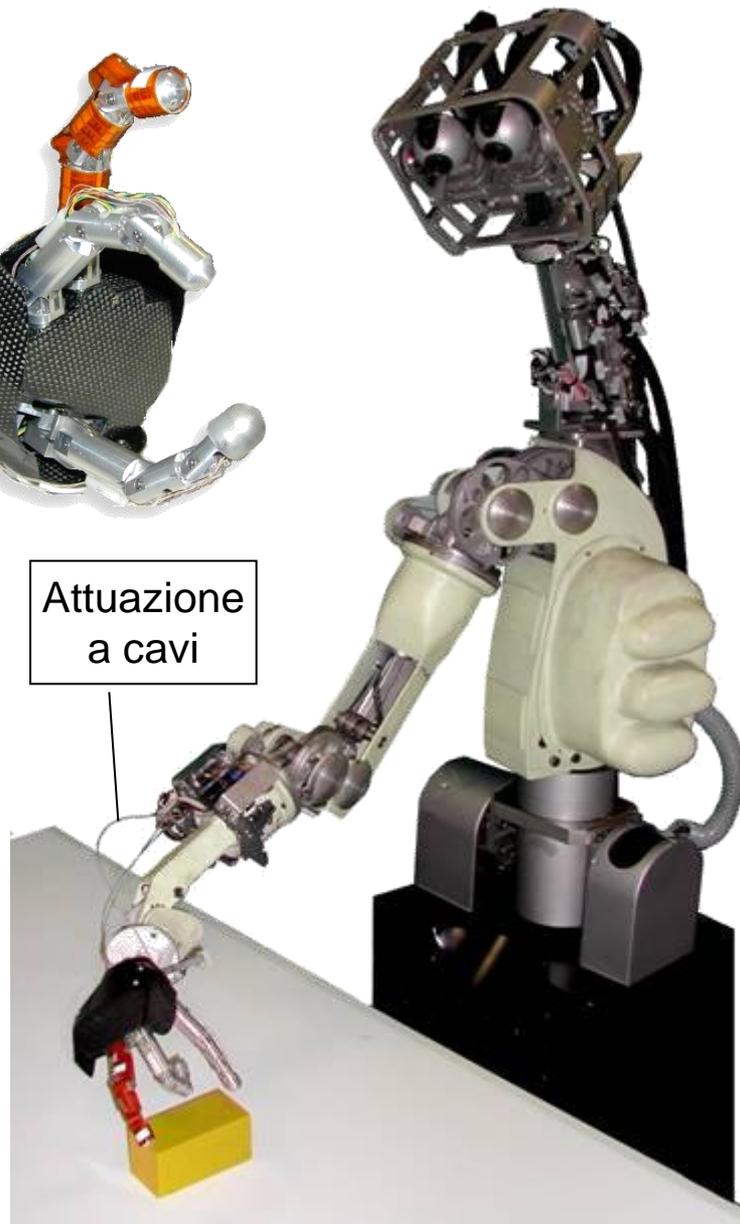
1 giunto per l'adduzione/abduzione del pollice



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

Developing a bio-inspired artificial tactile system

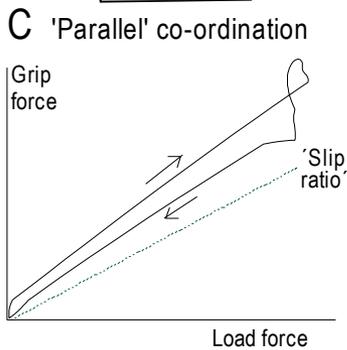
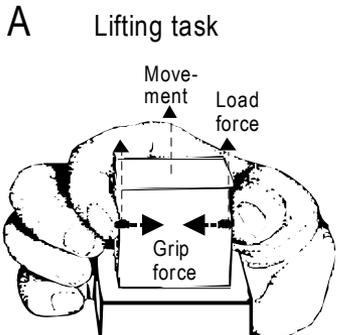
- To mimic the biomechanical features and the sensory apparatus of the human hand

APPROACH

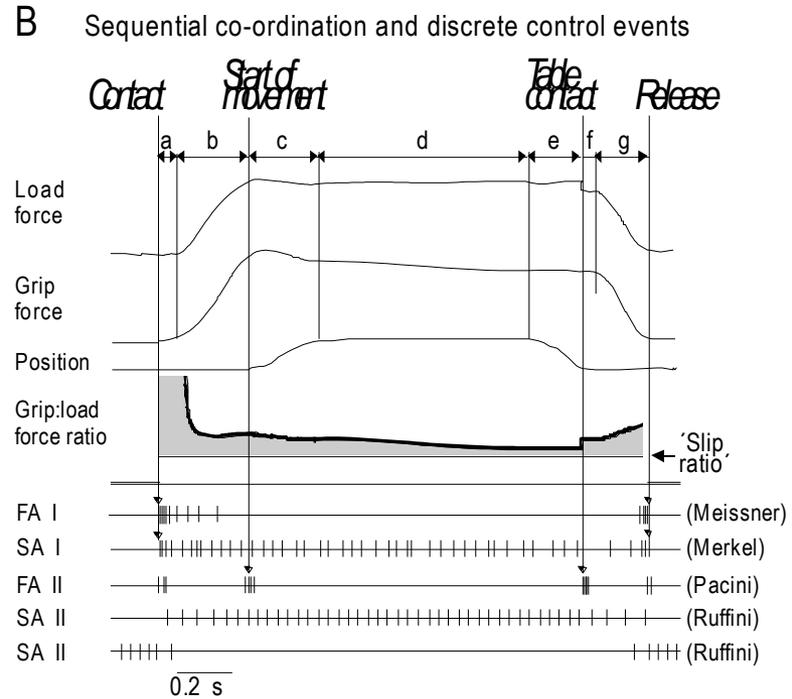
- To have a COMPLETE SYSTEM for tactile sensing
- To focus on sensory signals that belong to basic human grasping and manipulation



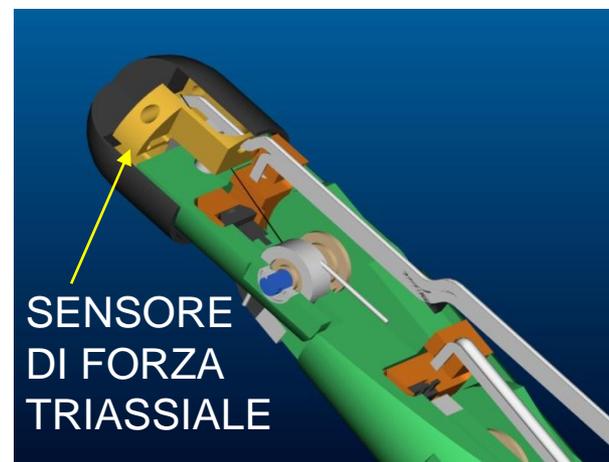
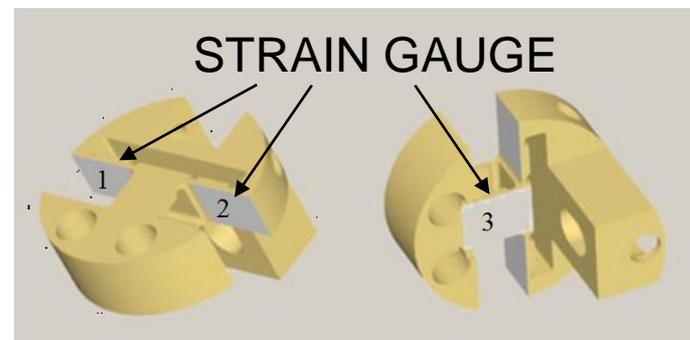
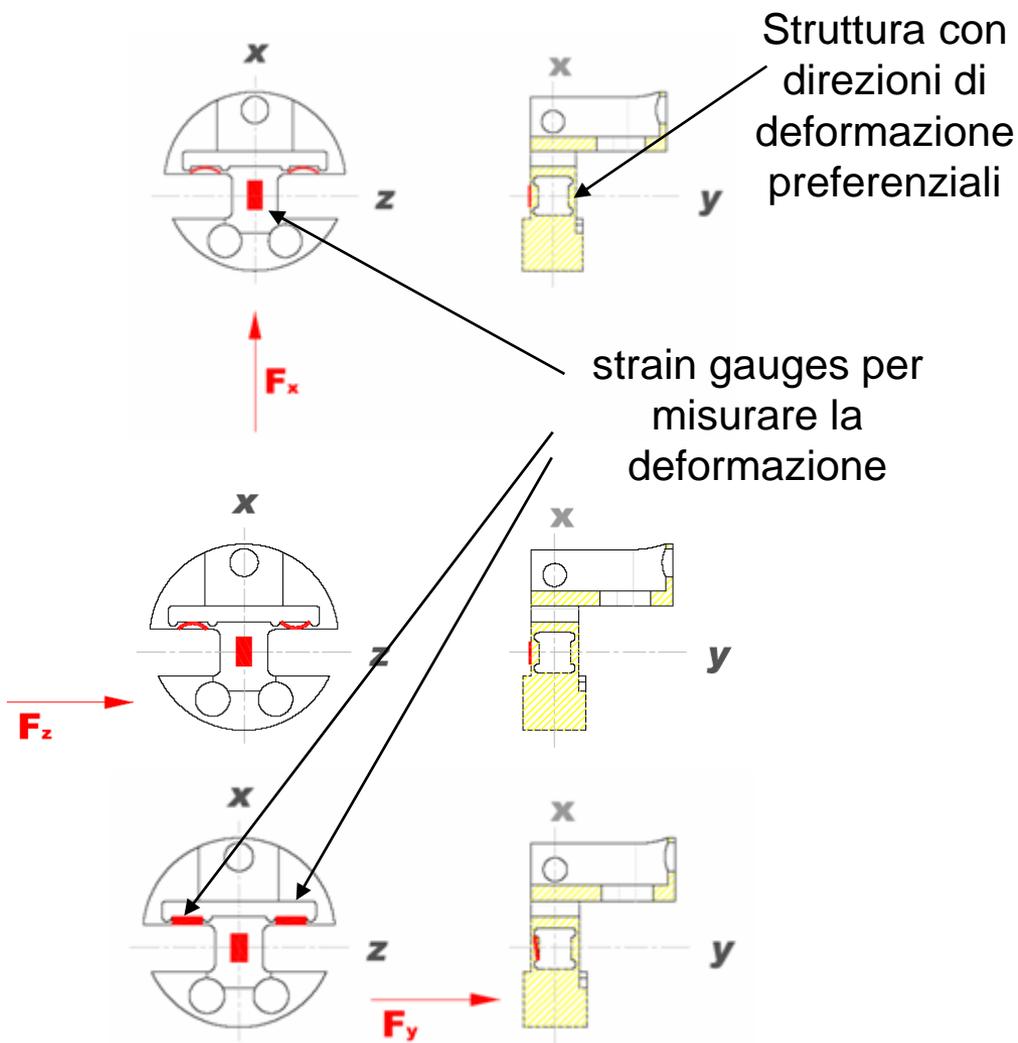
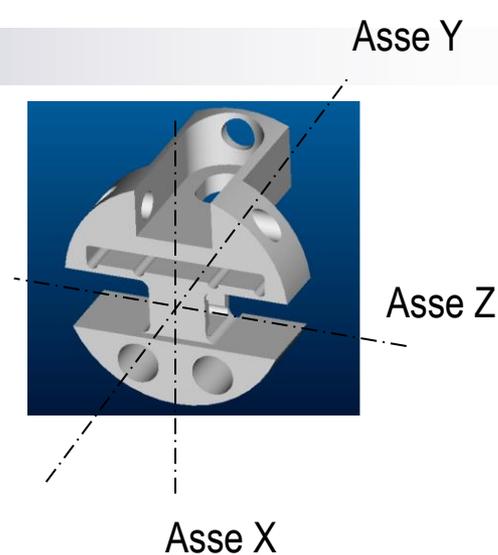
Prototypical task:
grasping, lifting and replacing an object



Biomimetic sensors are considered not as precision devices but as a SYSTEM able to extract qualitative or semi-quantitative information



Sensore di forza triassiale nel polpastrello

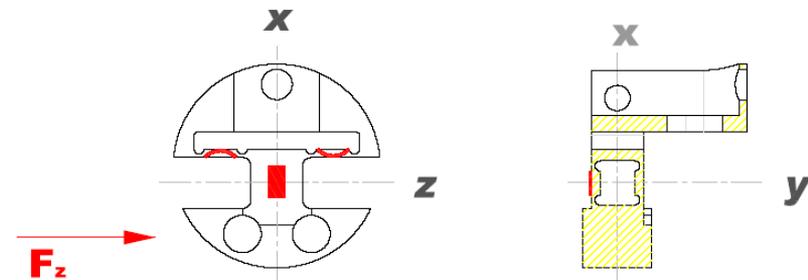
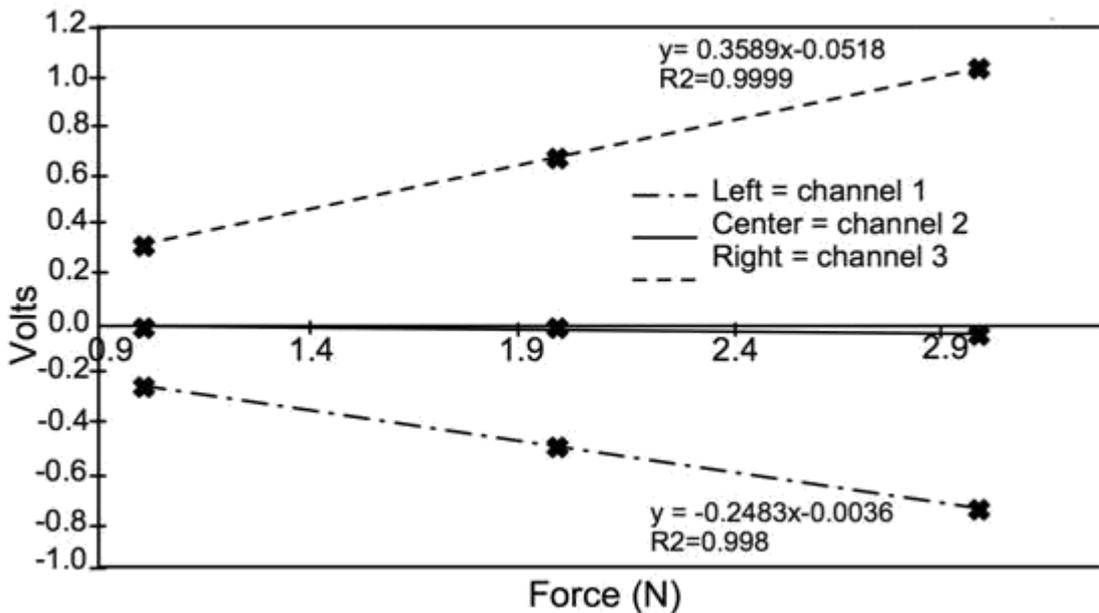
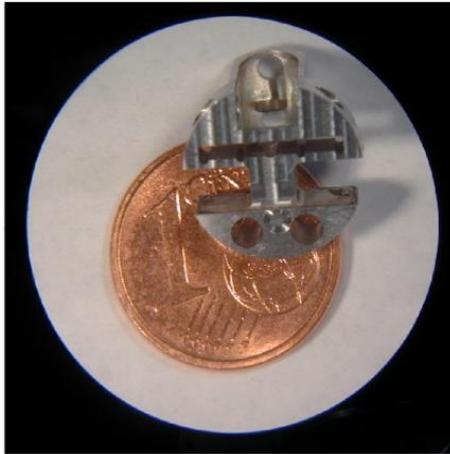


Sensore di forza triassiale nel polpastrello

materiale: alluminio

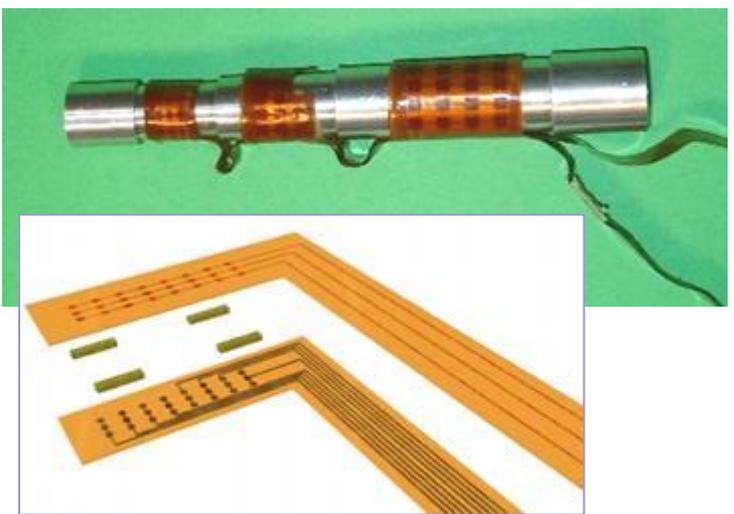
dimensioni: $\phi=12$ mm

$h=9,5$ mm



Contact making and breaking between object and fingertips

New On/Off Contact Sensors

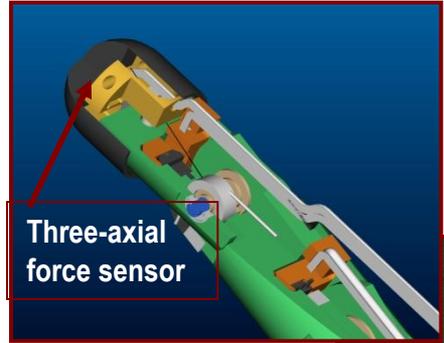


Distribution on anthropomorphic hand (Total of 80 taxels)

- 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

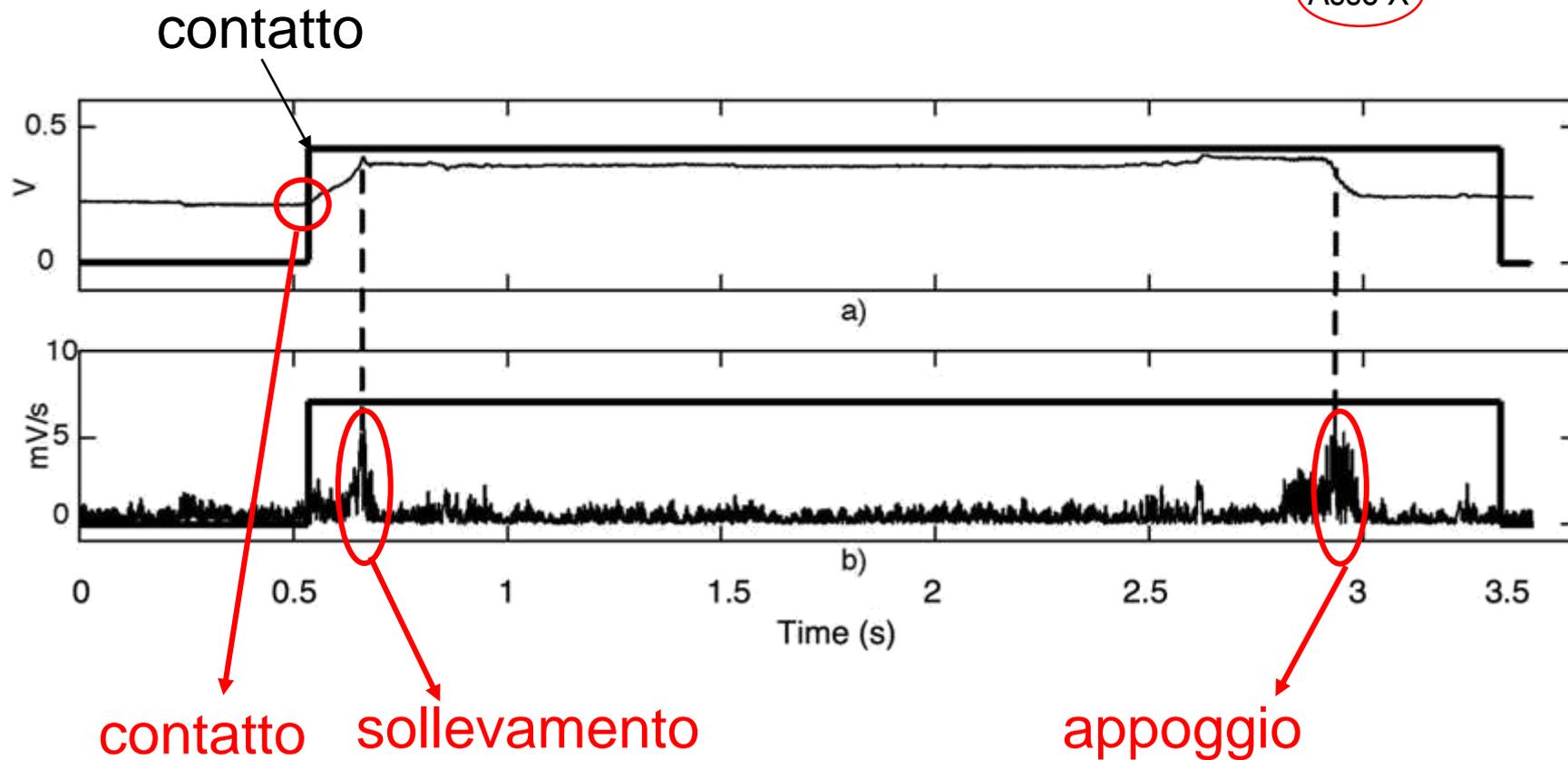
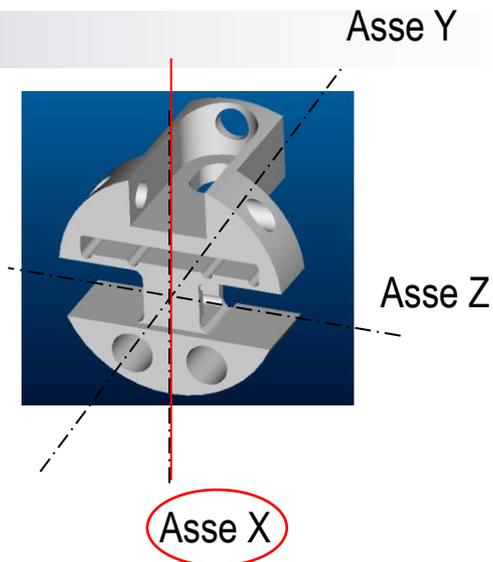
Three-Axial Force Sensor



- 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

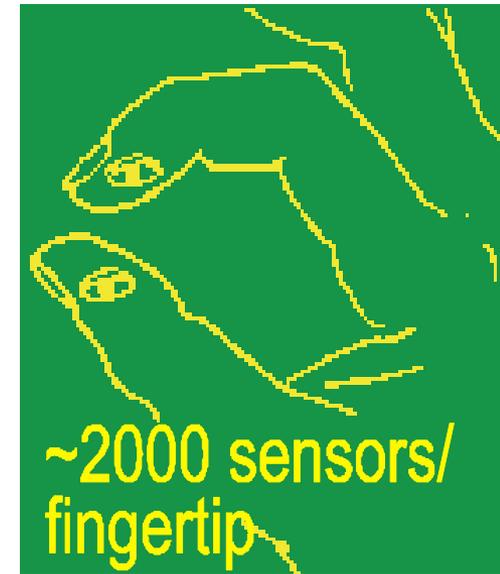
■ Forza sul polpastrello:

- 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

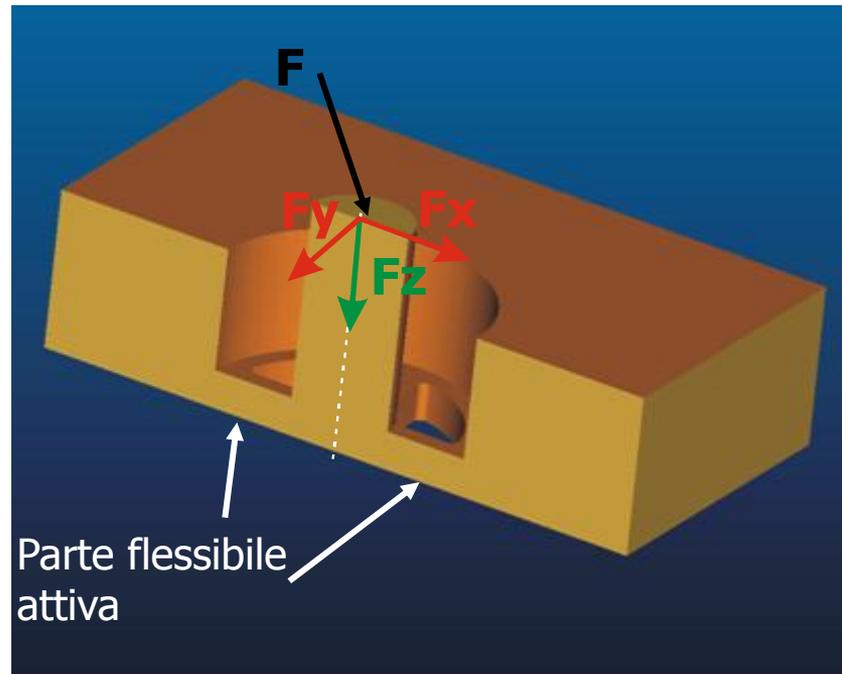


Curved
($r = 10 \text{ mm}$)



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

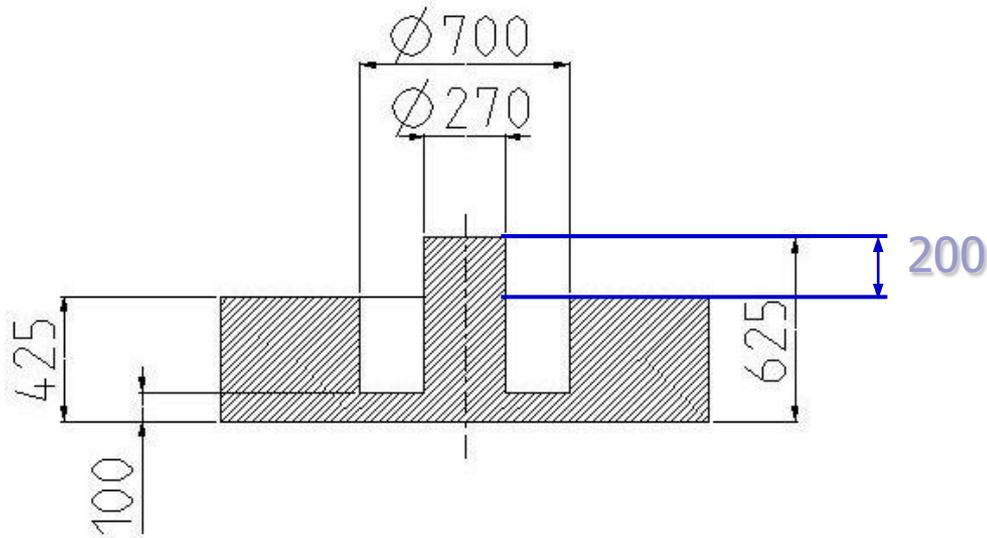
Microsensore di forza triassiale



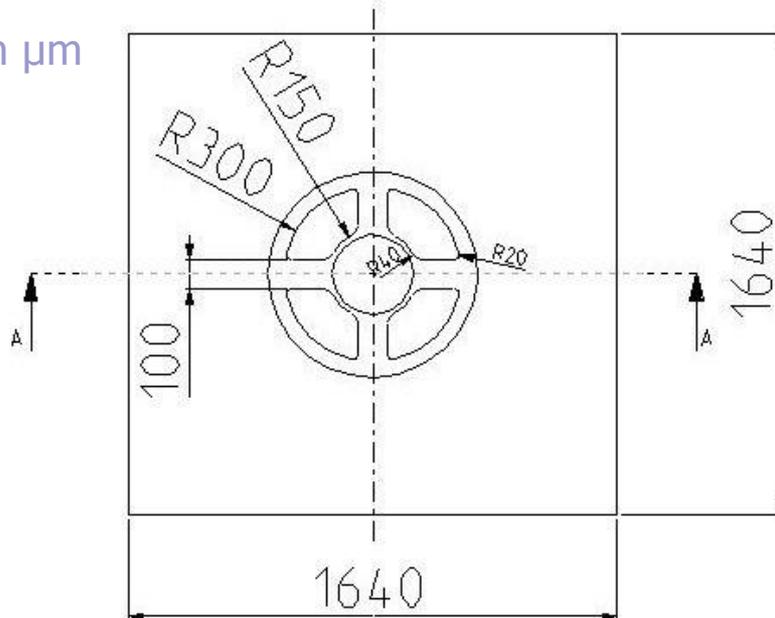
Sezione del modello 3D del sensore

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

Dimensioni del sensore

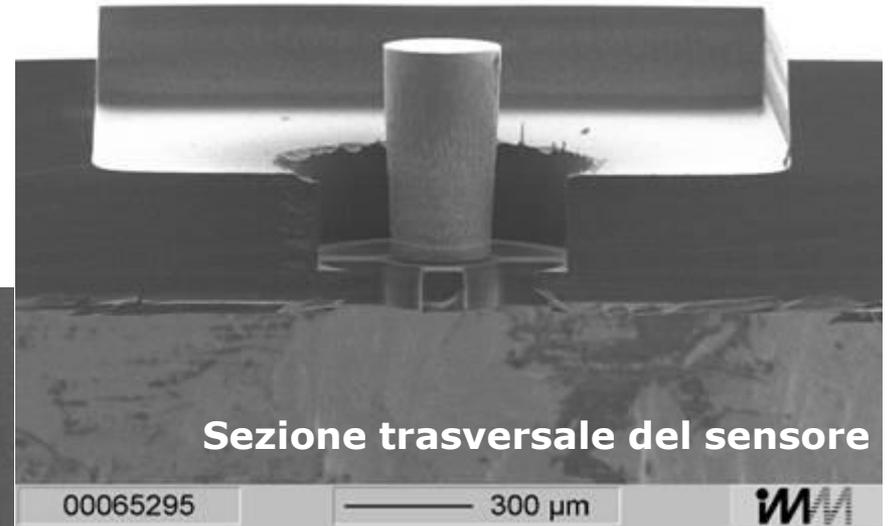
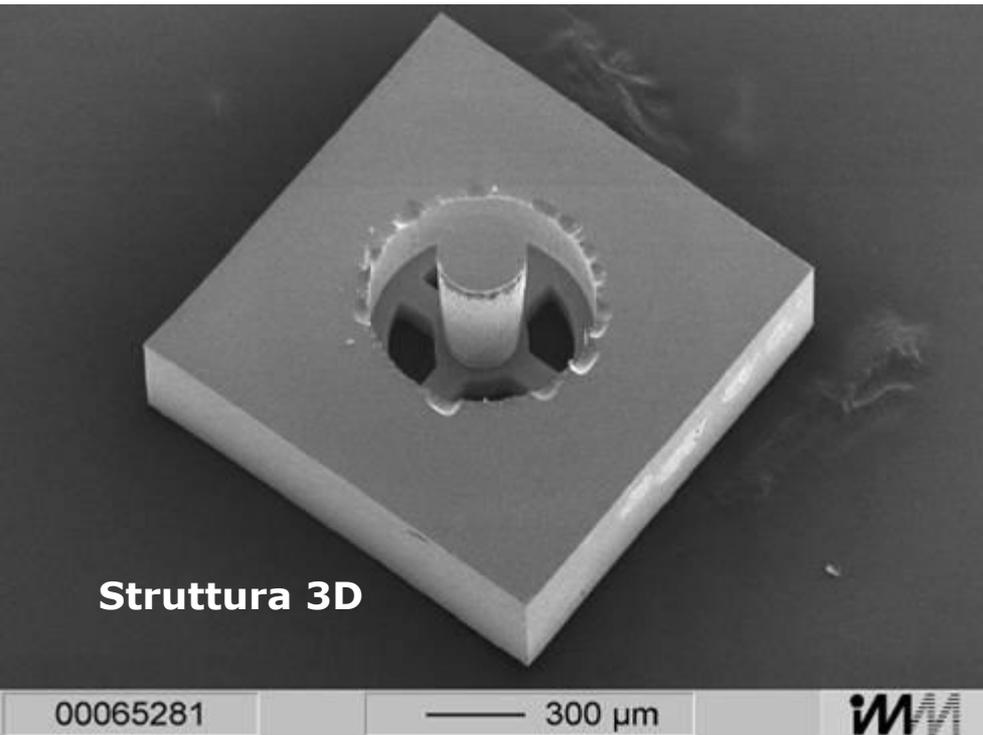


Dimensioni in μm



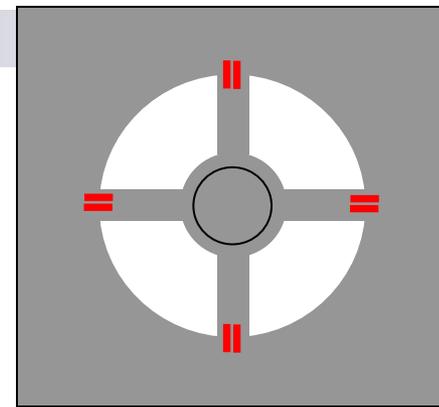
- Forma a croce, quattro braccia perpendicolari - alta sensibilità alle forze tangenziali
- Cilindro centrale per trasferire il carico alle braccia - blocco di silicio cilindrico integrato totalmente col resto della struttura

Struttura del sensore

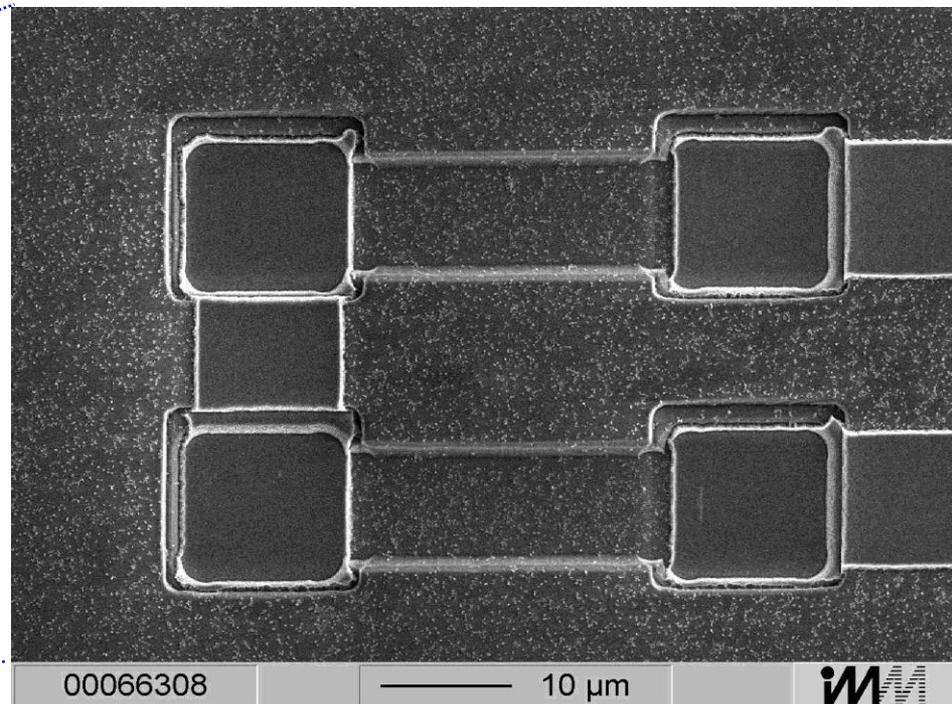
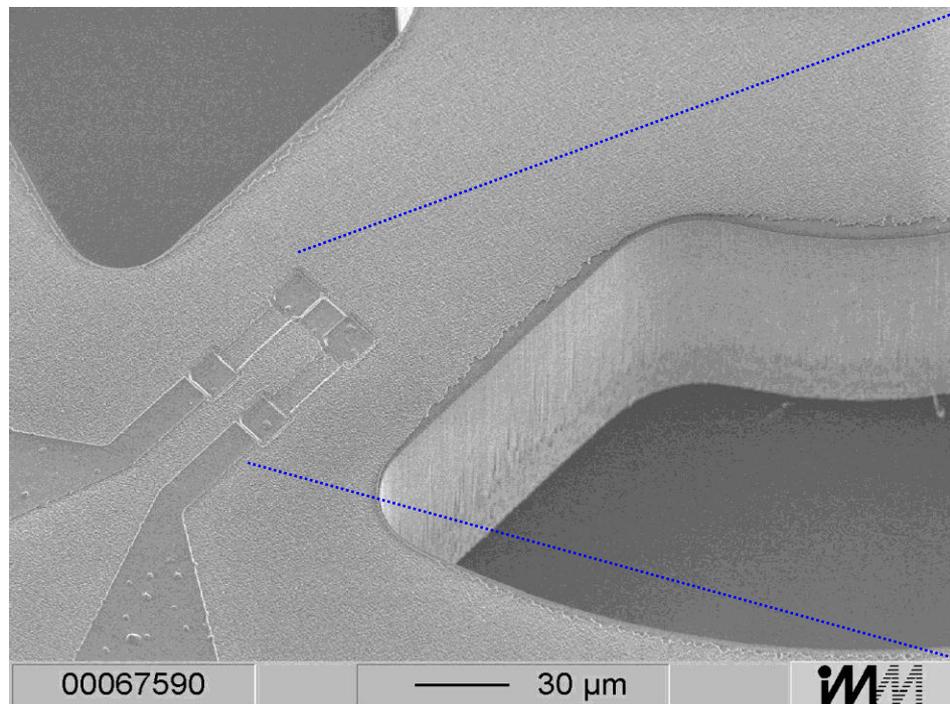


Piezoresistori

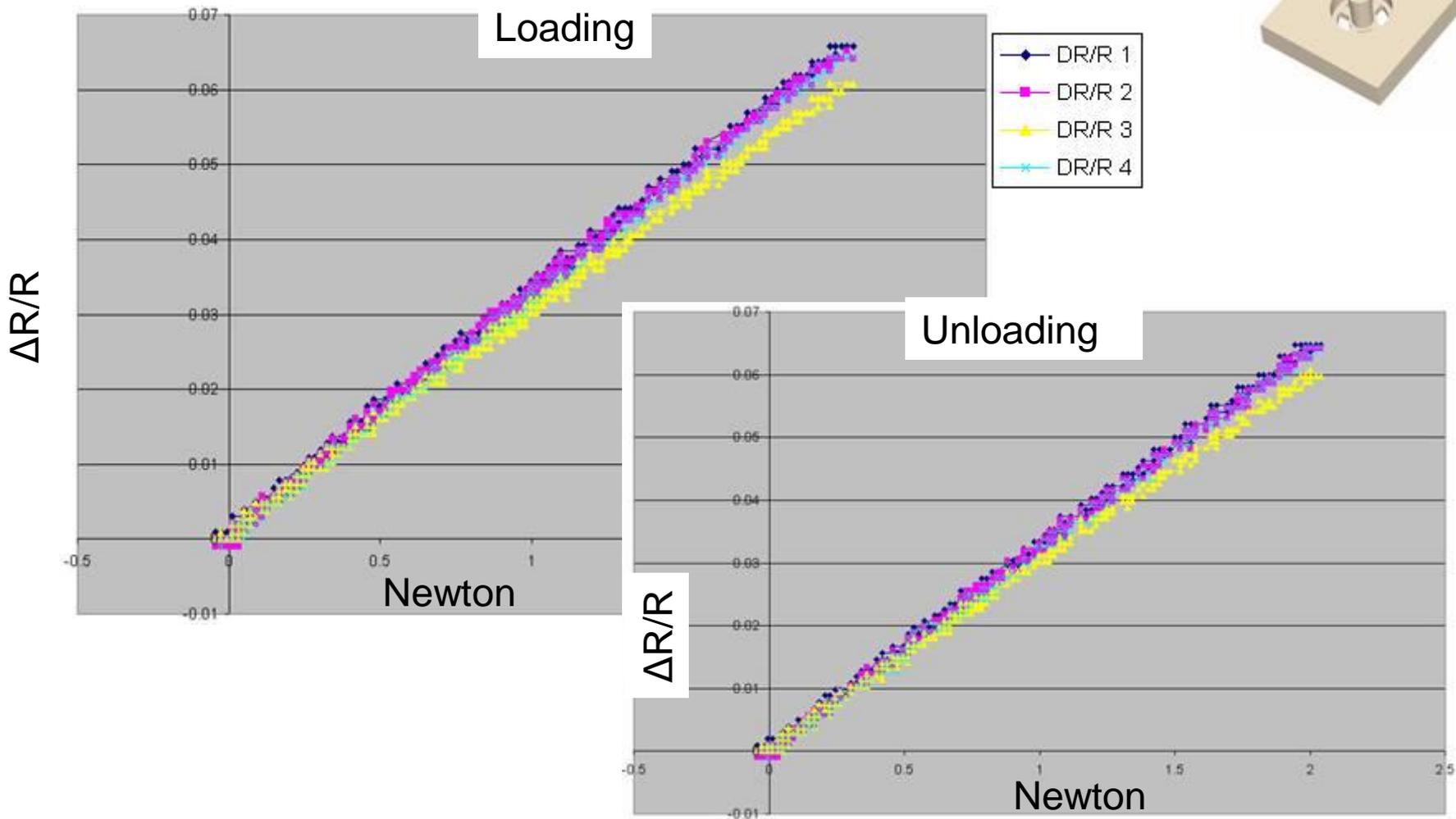
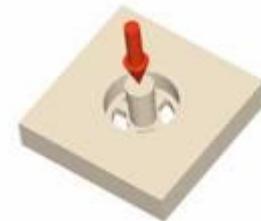
$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \cancel{1+2\nu} + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\pi}{2} \sigma_l$$



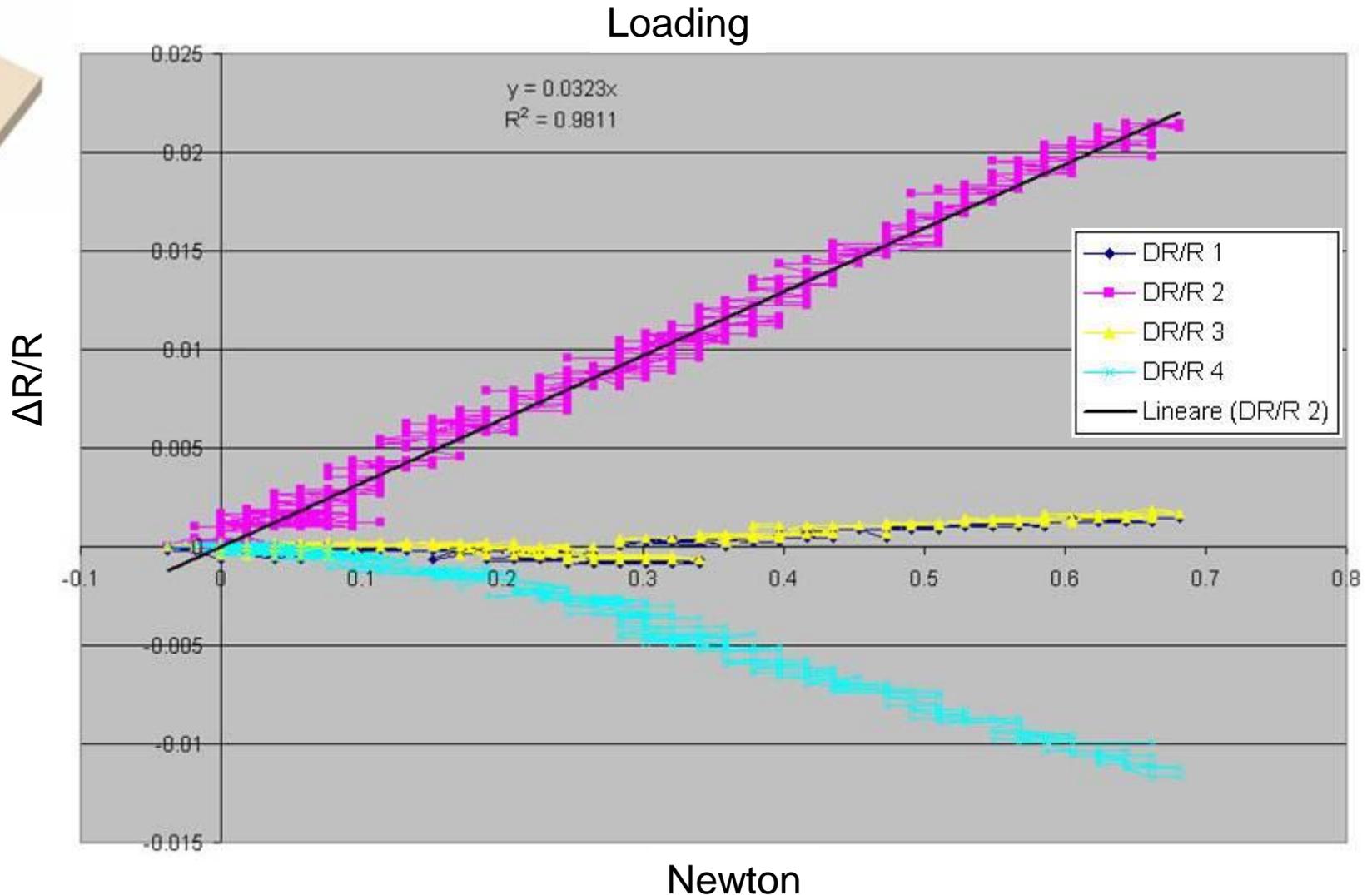
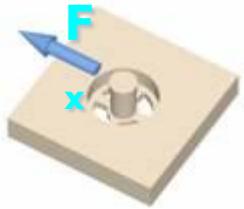
Nei semiconduttori $1+2\nu$ trascurabile



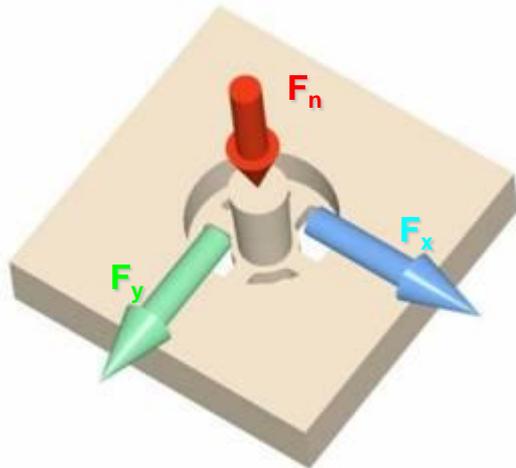
Risposta $\Delta R/R$ dei 4 piezoresistori rispetto a una forza normale



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



Misura della forza



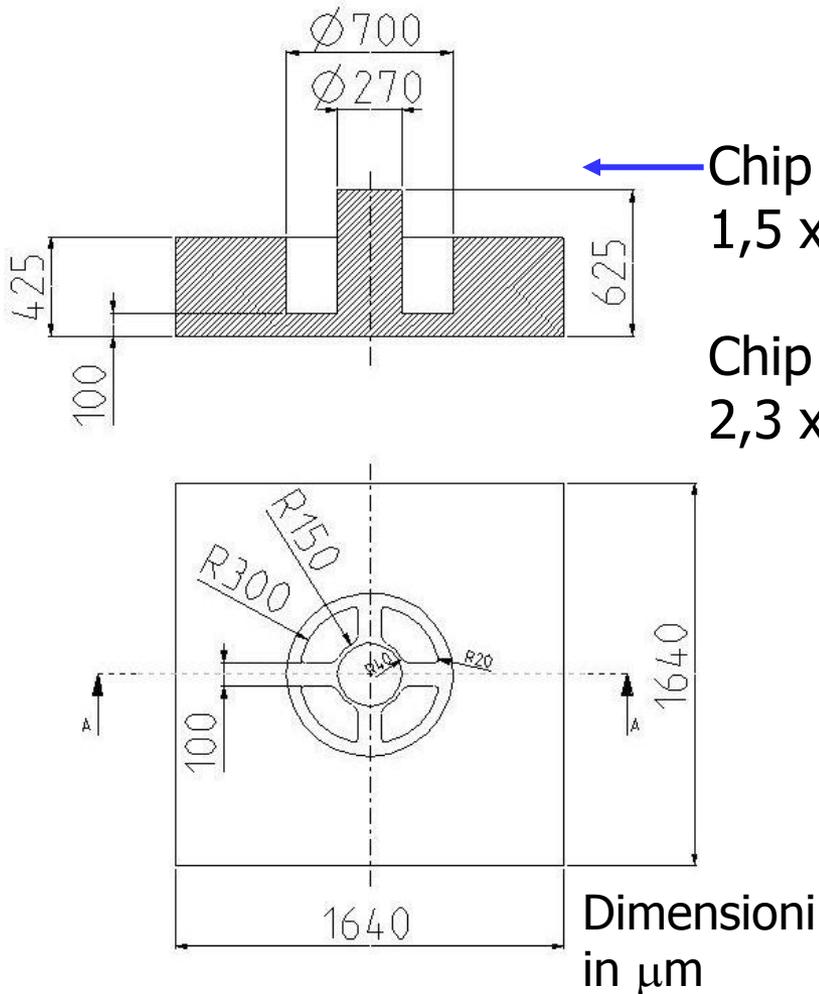
F_n forza normale

F_x e F_y componenti tangenziali

Procedura di calibrazione:

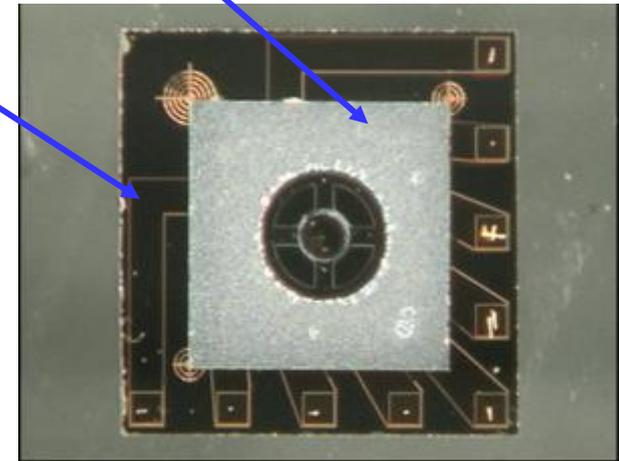
- forze crescenti da 0.5 N a 2.5 N nella direzione normale;
- forze crescenti da 0.1 N to 0.4 N in due direzioni tangenziali, perpendicolari tra di loro.

Dimensioni finali



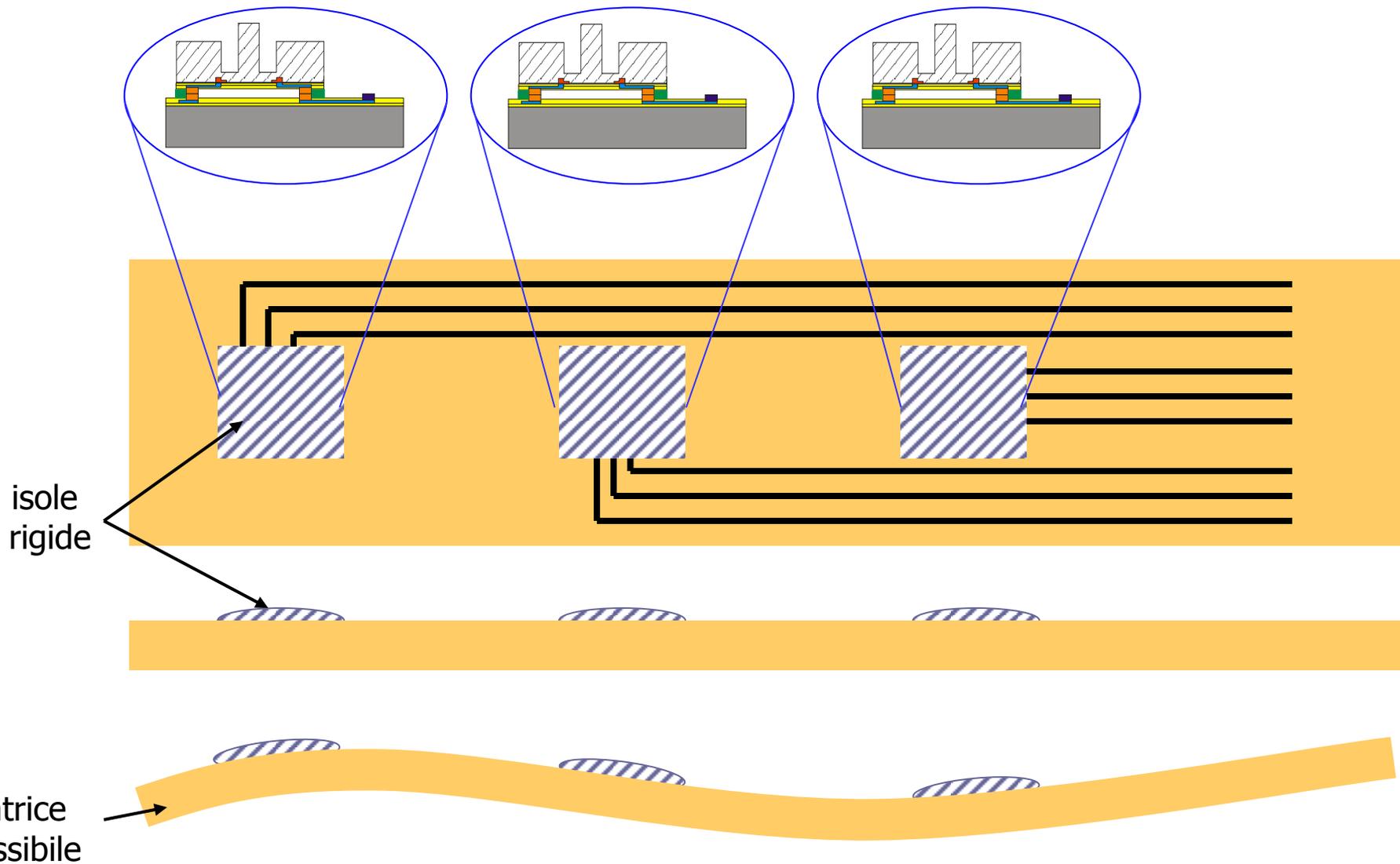
← Chip A (Sensor Chip):
1,5 x 1,5 mm

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

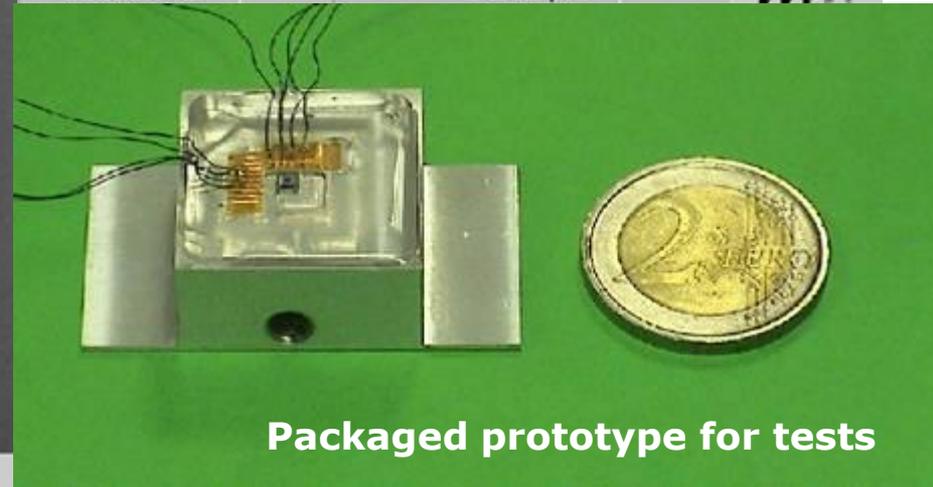
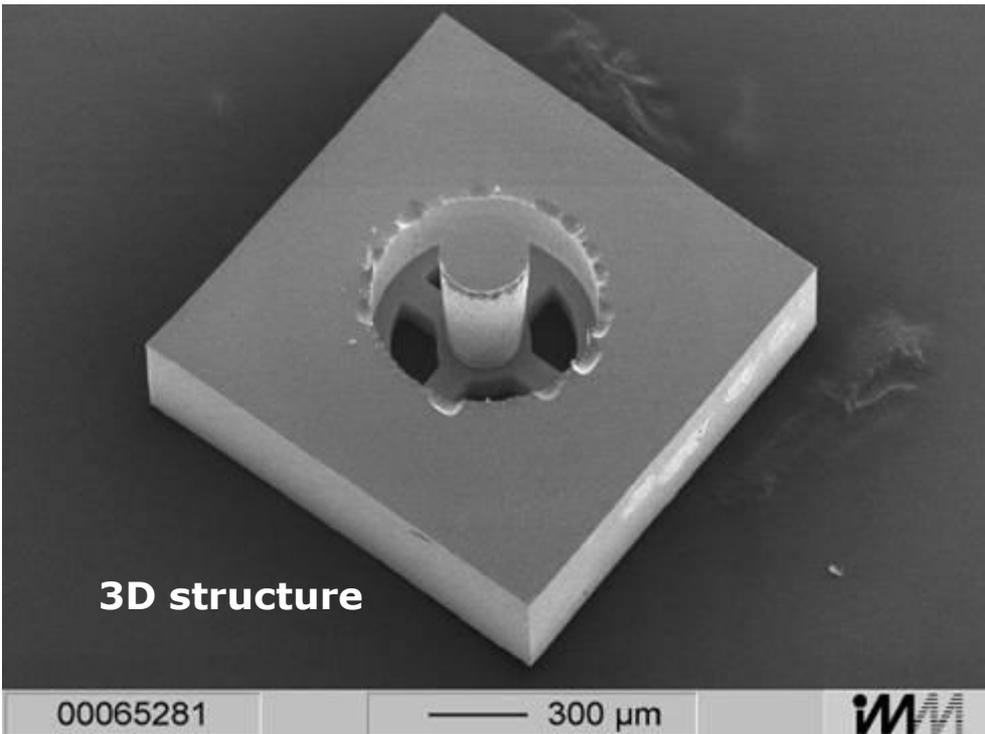
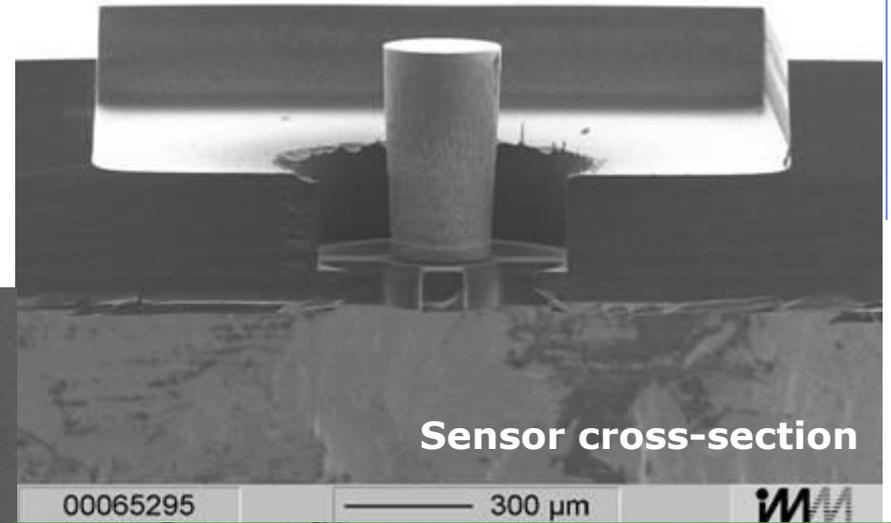
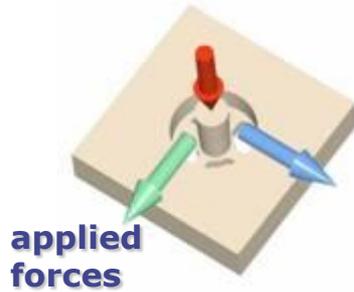


Dimensioni finali del sensore:
 $2300\mu\text{m} \times 2300\mu\text{m} \times 1300\mu\text{m}$

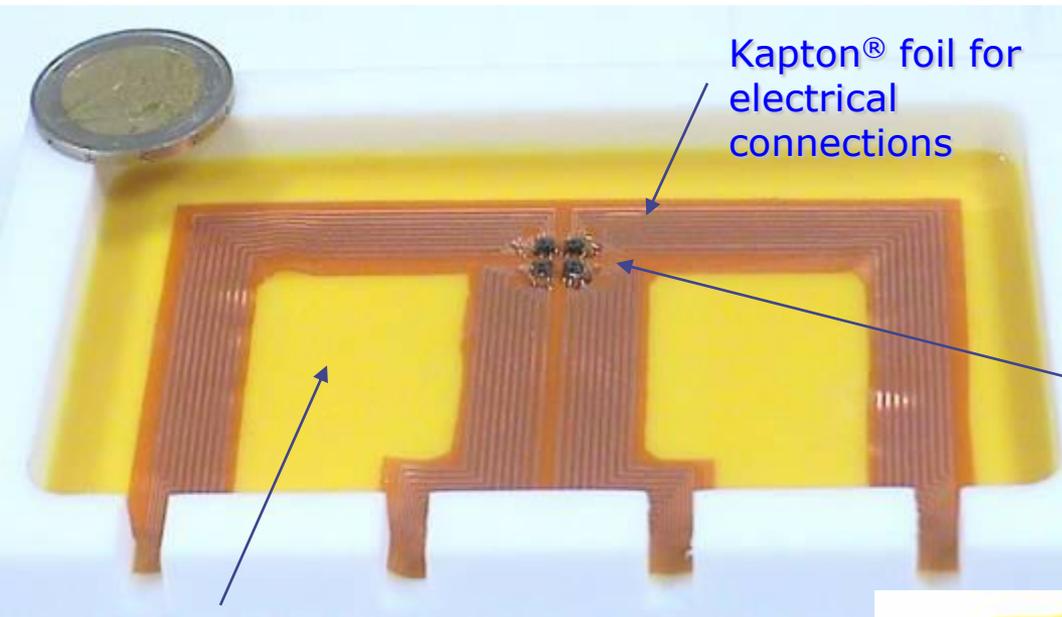
Possibile integrazione su una pelle flessibile



Work in progress for development of a smart skin

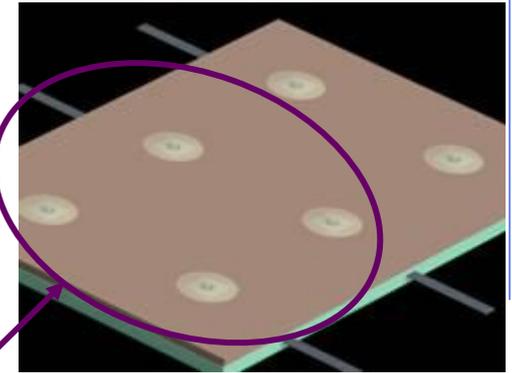


Work in progress for development of a smart skin



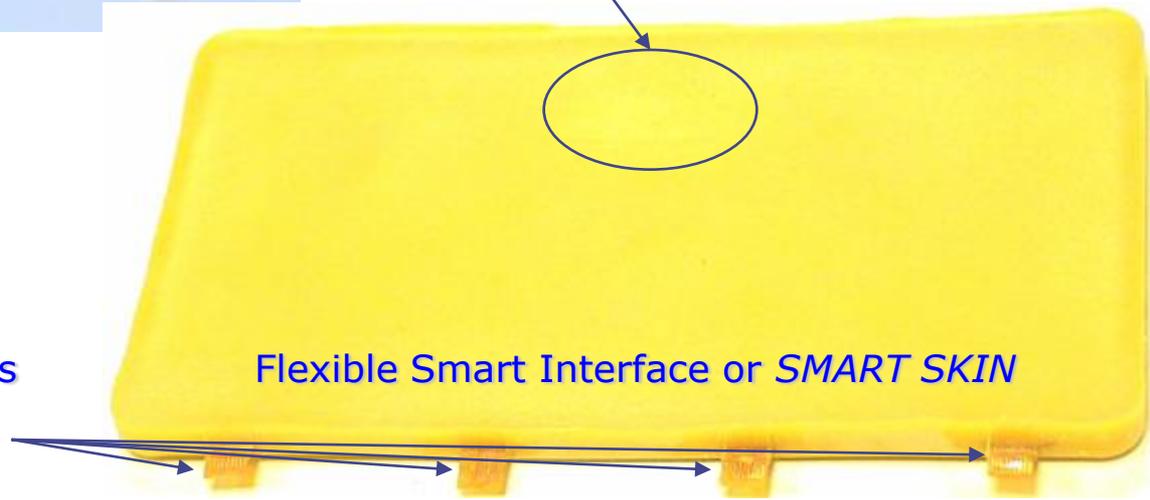
Kapton® foil for electrical connections

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:

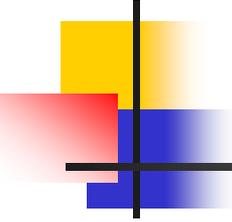
- a livello di organo sensoriale (polpastrello tattile):
 - la forza applicata sul polpastrello
 - gli eventi di 'controllo tattile'
 - il contatto con l'oggetto
 - il contatto dell'oggetto con altri oggetti
- a livello di sensore:
 - la forza applicata su un'area di 2,3 x 2,3 mm

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
- **Esplorazione tattile**

Riferimenti bibliografici:

Russel, "Robot Tactile Sensing", Prentice Hall



Percezione Tattile Attiva

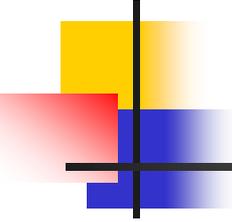
Utilizzo di procedure di esplorazione attiva per il rilevamento dei parametri di interesse

- **PRIMITIVE TATTILI:** proprietà degli oggetti che possono essere dedotte direttamente dai dati sensoriali o mediante semplici procedure di misura
- **CARATTERISTICHE TATTILI:** proprietà degli oggetti che richiedono una ricerca guidata per essere individuate
- **PROCEDURE ESPLORATIVE:** procedure di ricerca guidata per l'individuazione di caratteristiche tattili

Elaborazione tattile

Table 11.1 Tactile properties which can be directly inferred from sensor data

Tactile primitives					
Mechanical behavior	Gross characteristics	Surface shape	Thermal	Electrical behavior	
Compliance	Size	Corner	Temperature	Electrical conductivity	<p>Groupings</p> <p>Examples</p> <p>Parameters to be measured</p>
Resilience	Mass	Edge	Thermal conductivity	Contact potential	
Viscosity		Surface normal	Thermal diffusivity		
✓	✓				Forces and torques transmitted between gripper and object
		✓			Image of area of contact between gripper and object
✓	✓	✓			Configuration of robot gripper
			✓		Thermal
				✓	Electrical

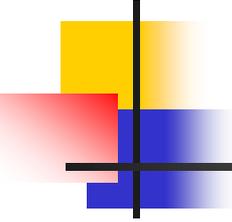


Elaborazione tattile

CEDEVOLEZZA: misura di quanto un materiale resiste all'applicazione di una forza

1. Premi fino ad applicare una forza F
2. Memorizza la posizione corrente come $D1$
3. Premi ancora fino ad applicare una forza $2F$
4. Memorizza la posizione corrente come $D2$

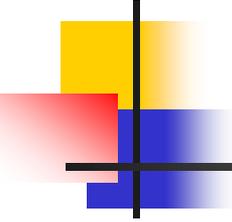
La distanza tra $D1$ e $D2$ è una misura della cedevolezza



Elaborazione tattile

ELASTICITA': indicazione di quanto un materiale ritorna alla forma originaria dopo essere stato deformato dall'applicazione di una forza

1. Premi fino ad applicare una forza F
 2. Memorizza la posizione corrente come $D1$
 3. Premi ancora fino ad applicare una forza $2F$
 4. Memorizza la posizione corrente come $D2$
 5. Riduci la pressione fino ad una forza F
 6. Memorizza la posizione corrente come $D3$
- $(D2-D3)/(D2-D1)$ è una misura dell'elasticità



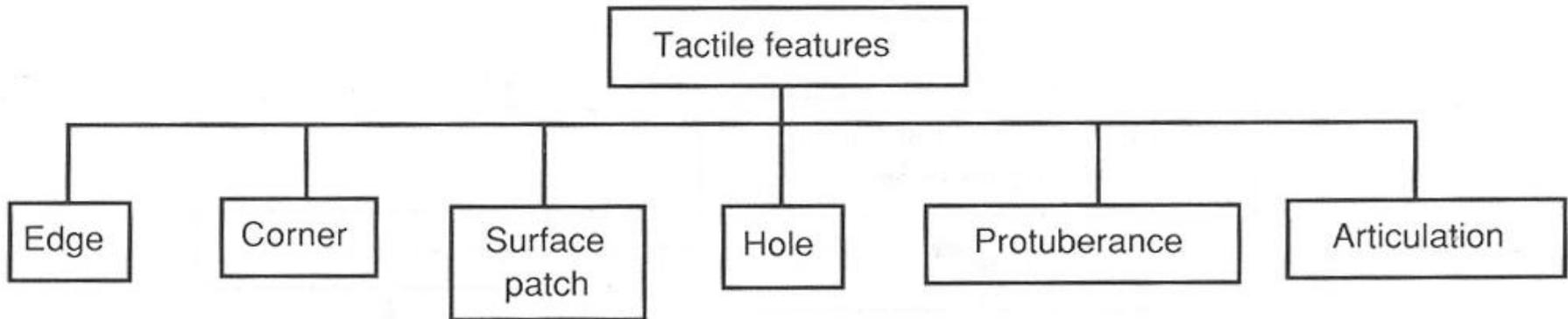
Elaborazione tattile

VISCOSITA': deformazione del materiale nel tempo, risultante dall'applicazione di una forza costante

1. Premi fino ad applicare una forza F
2. Memorizza la posizione corrente come $D1$
3. Attendi per un tempo prefissato
4. Memorizza la posizione corrente come $D2$

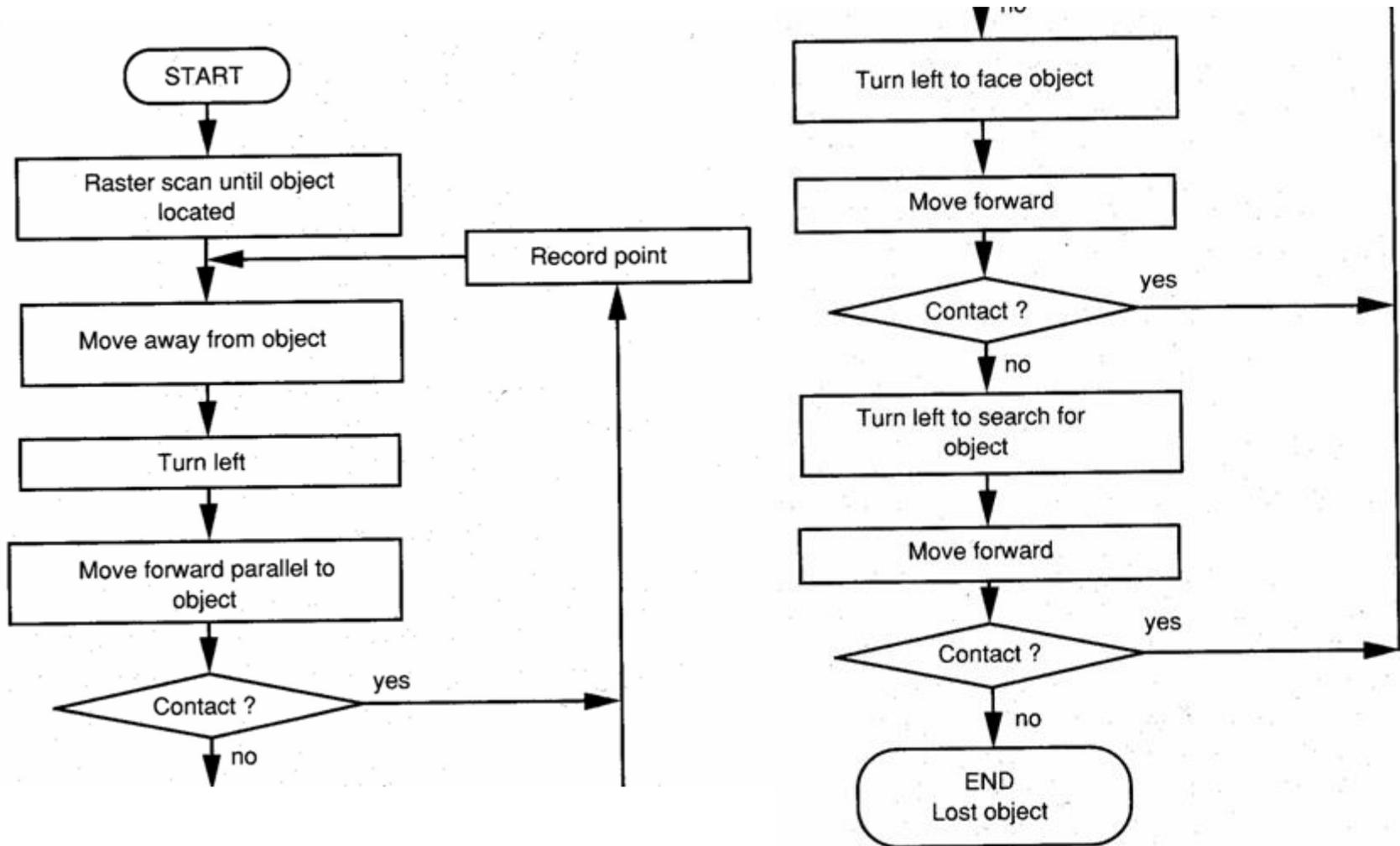
$D2-D1$ è una misura della viscosità

Caratteristiche tattili



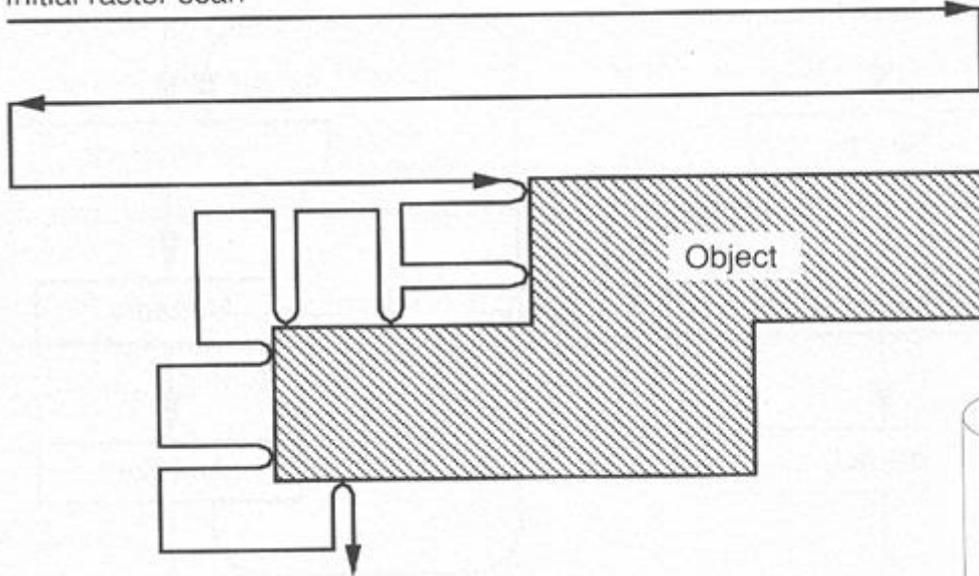
Ulteriori caratteristiche tattili di un oggetto possono essere ottenute mediante una esplorazione attiva condotta tramite opportuni algoritmi che prevedono lo spostamento del sensore (o dei sensori) in un intorno dell'oggetto alla ricerca delle "sensazioni" che permettano una classificazione

Elaborazione tattile: esempio di algoritmo di esplorazione della forma di un oggetto

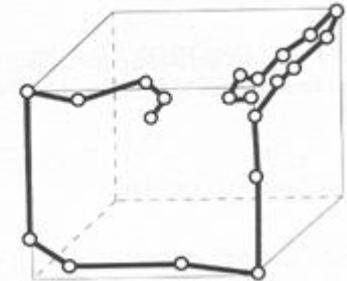
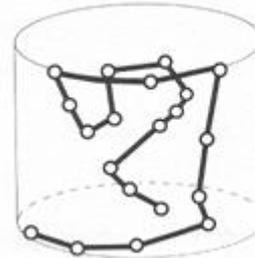


Elaborazione tattile

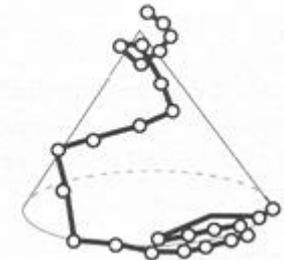
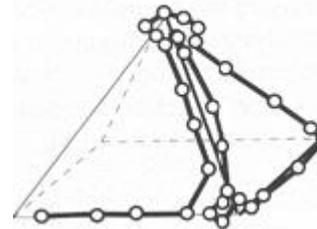
Initial raster scan



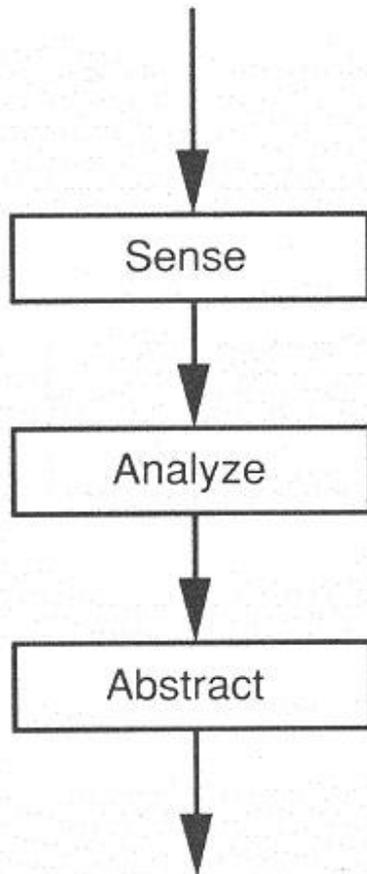
Schematizzazione dell'algoritmo esplorativo



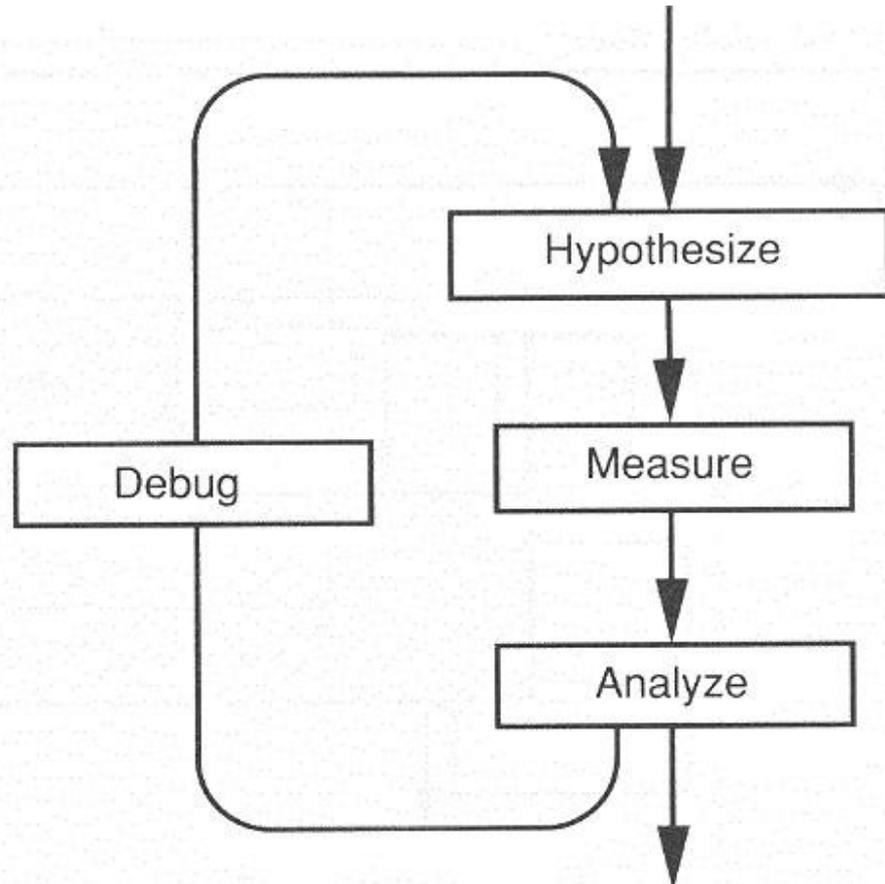
Esempi di percorsi seguiti dalle dita rispetto ad alcune tipologie di oggetti



Riconoscimento



(a) Data-driven object recognition



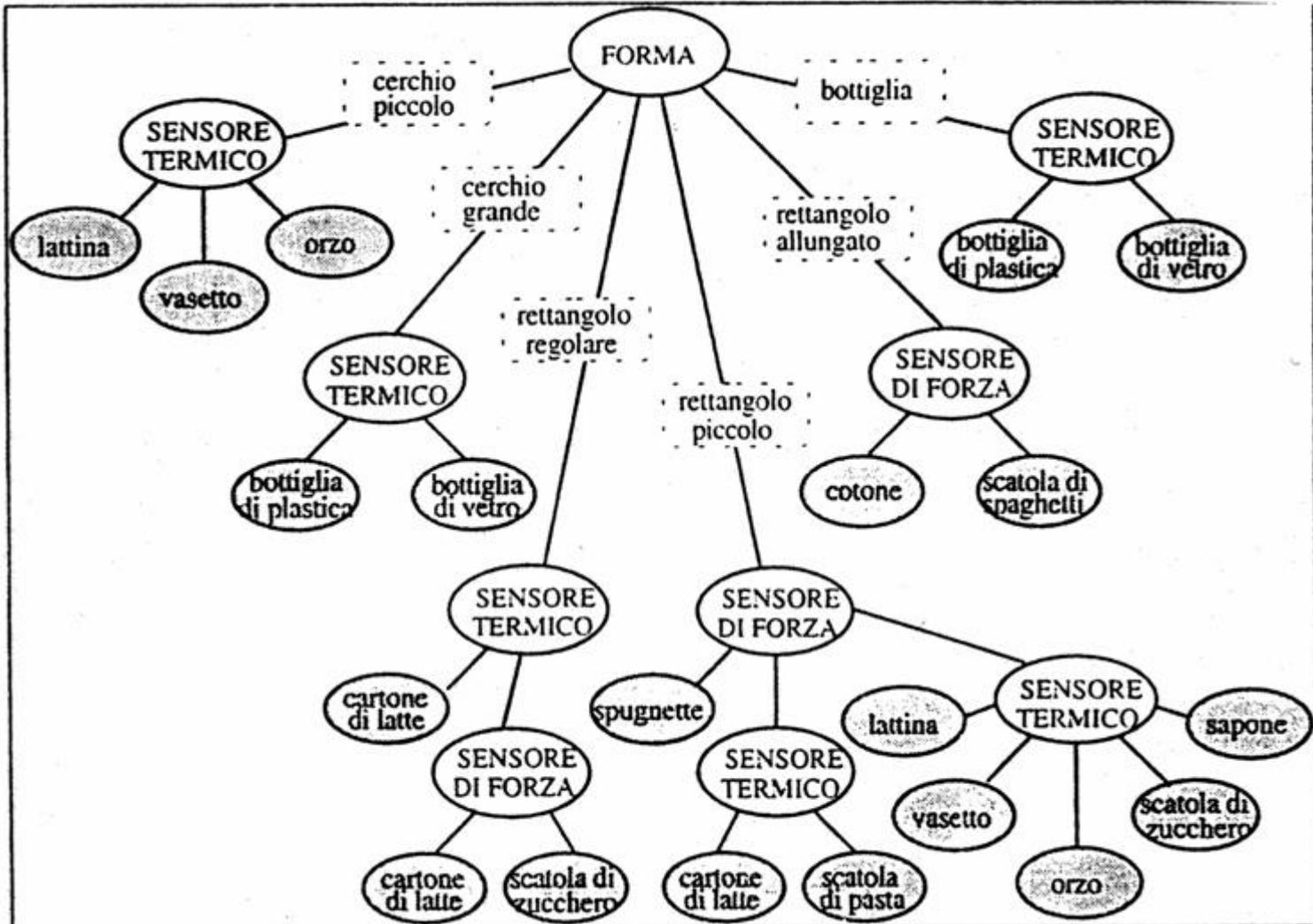
(b) Knowledge-driven object recognition

Un esempio di riconoscimento basato su proprietà tattili



Questi oggetti sono stati divisi in classi mediante aggregazione di caratteristiche comuni come forma, materiali, consistenza

Riconoscimento: albero delle ipotesi



Riconoscimento: esempio

