Corso di Percezione Robotica (PRo)

Modulo C. Percezione Attiva

Il tatto in robotica

Cecilia Laschi
ARTS Lab, Scuola Superiore Sant'Anna
cecilia@arts.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

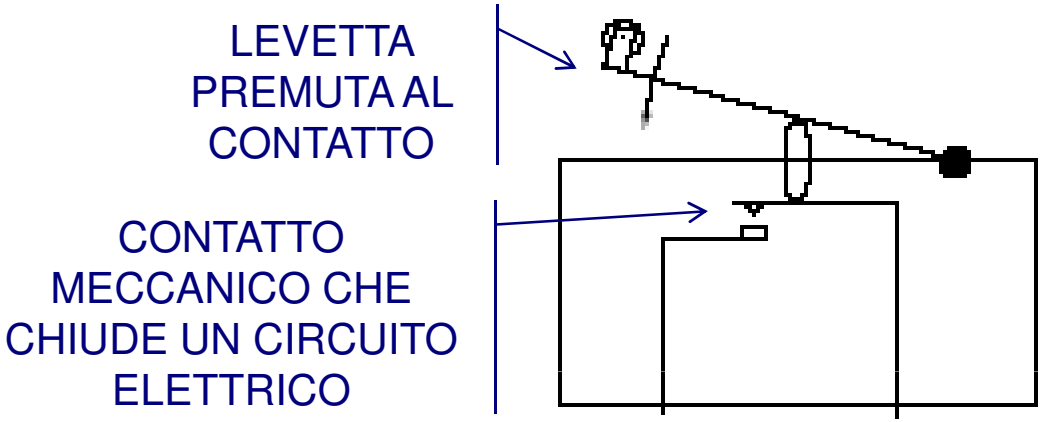
Principali tecnologie

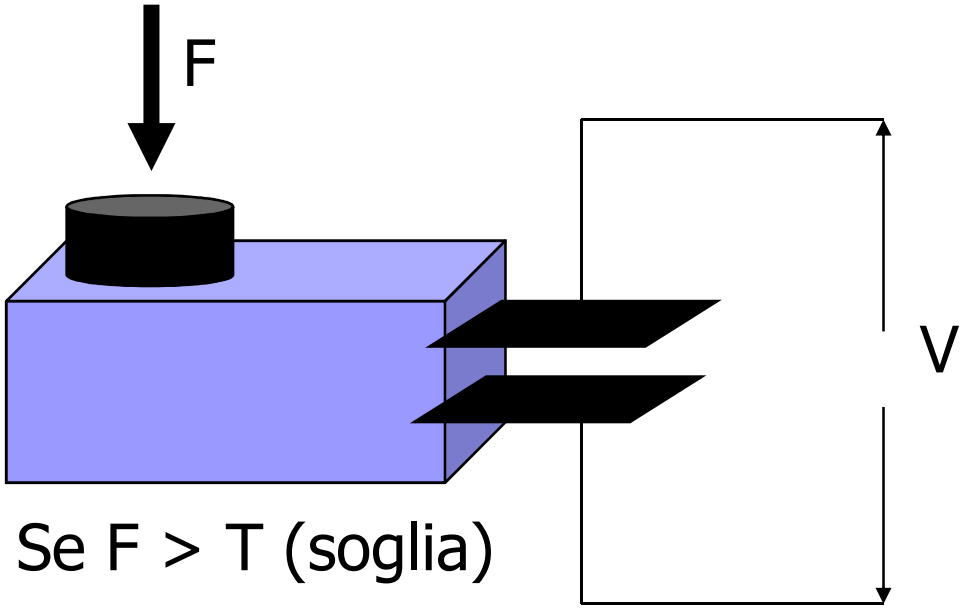
- Sensori meccanici: switch come sensori tattili
- Sensori piezoresistivi
- Sensori piezoelettrici
- Sensori ottici
- Sensori magnetici
- Sensori capacitivi
- Sensori FSR
- Sensori QTC

Switch meccanici

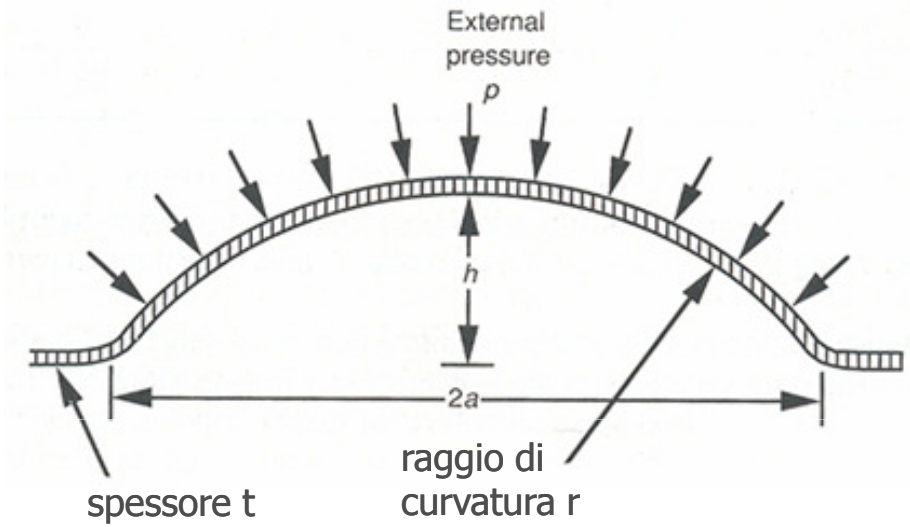
- Sensori di contatto più semplici
- Forniscono un solo dato binario:

  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



Sfoglia metallica
Deformazione elastica, che causa la chiusura di un circuito elettrico
Risposta binaria alla pressione applicata

Dalla teoria delle deflessioni elastiche:
Parametro geometrico λ

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

Parametro di carico *R*

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

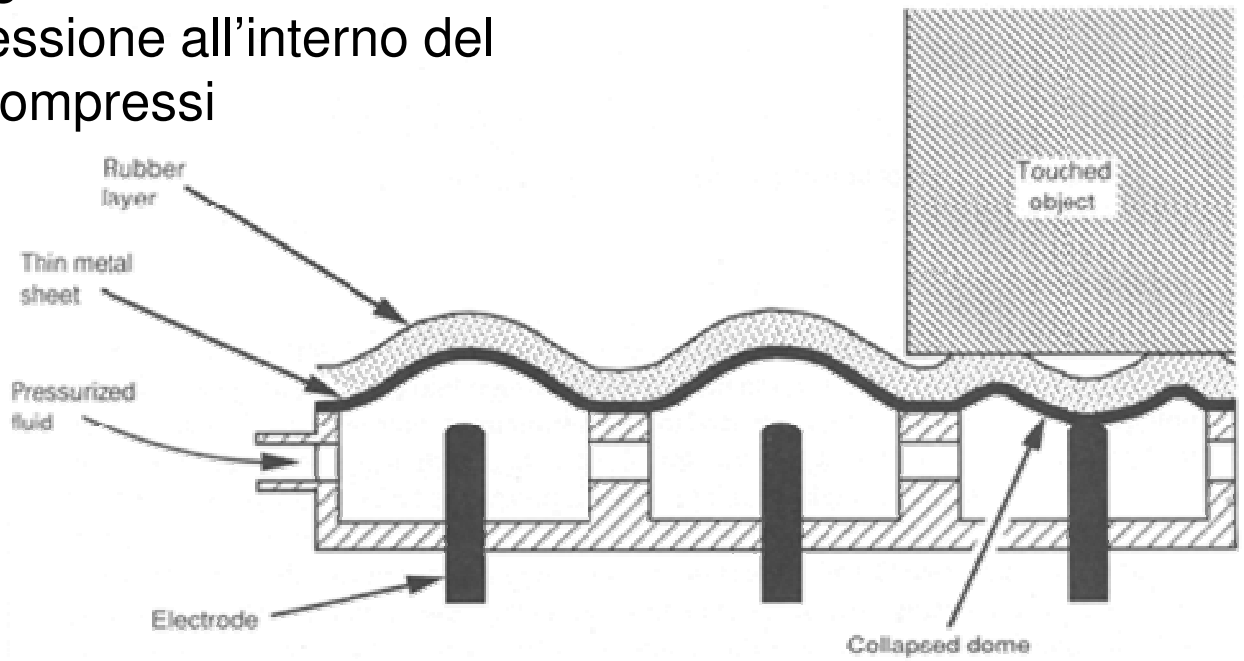
con
p = pressione applicata
E = modulo di Young del materiale metallico
ν = rapporto di Poisson del materiale metallico

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:

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

$con:$

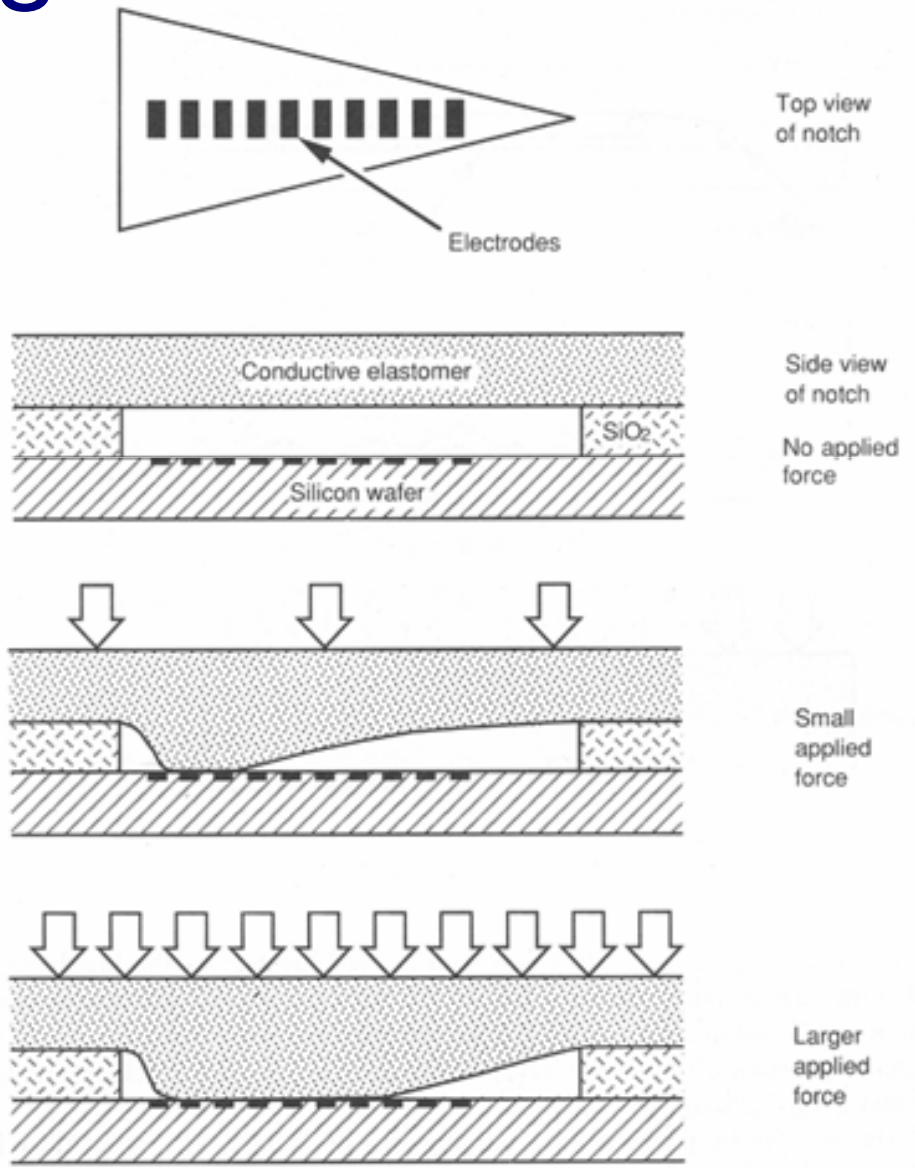
$\delta = massima\ deflessione$

$p = pressione\ applicata$

$a = raggio\ del\ foro$

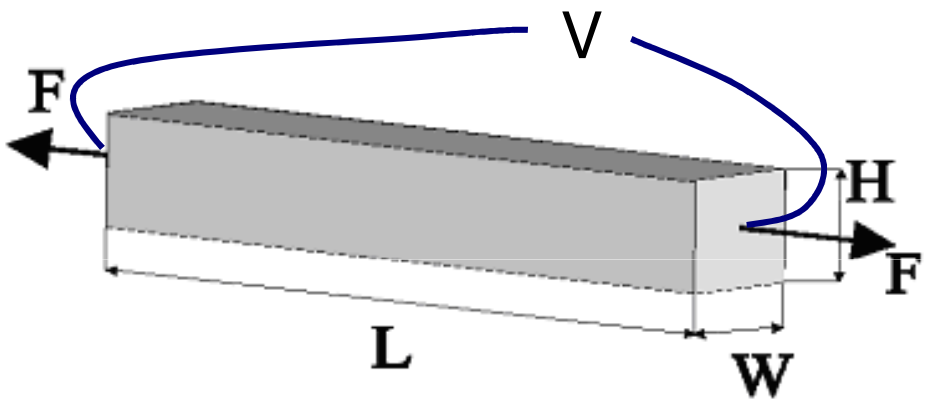
$E = modulo\ di\ Young$

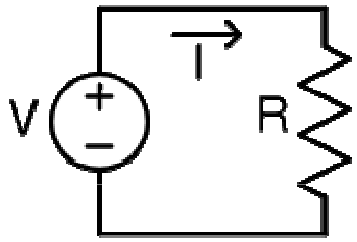
- 48 unità
- area di ogni unità: 0,3 x 0,6 mm
- 15 elettrodi per ottenere 16 livelli di pressione
- variando la forma del foro si possono ottenere risposte lineari, logaritmiche o esponenziali



Effetto piezoresistivo

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





V=RI

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

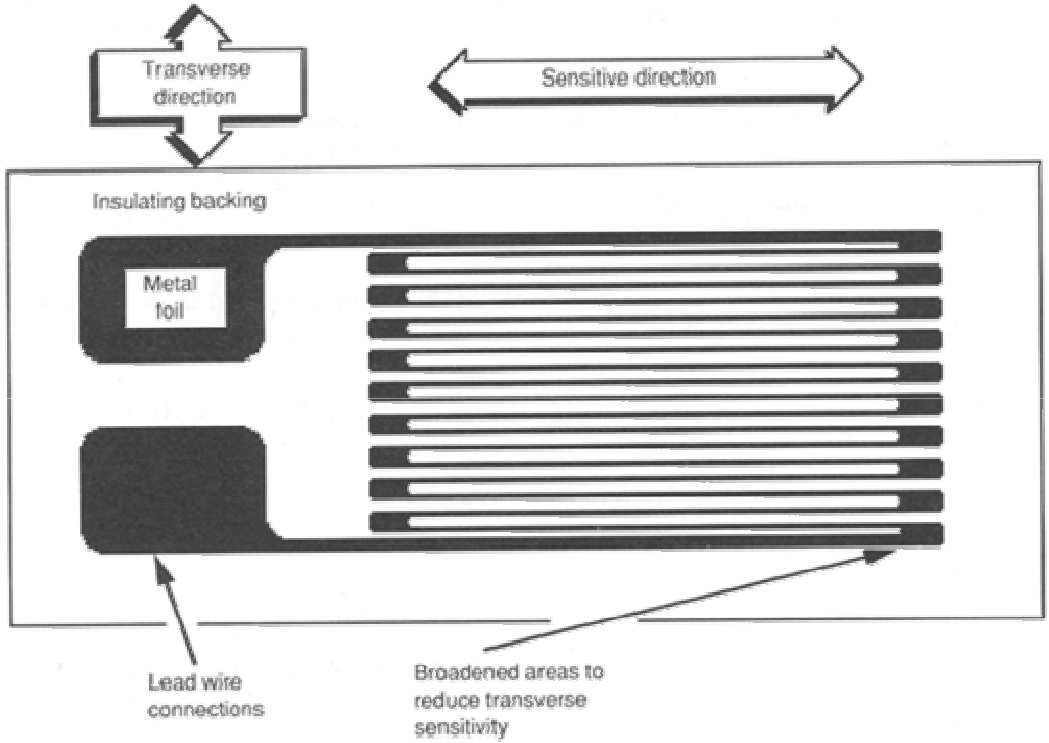
con ρ = resistività del materiale,

L, W, H = dimensioni del parallelepipedo

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

v = rapporto di Poisson del materiale

Strain gauge

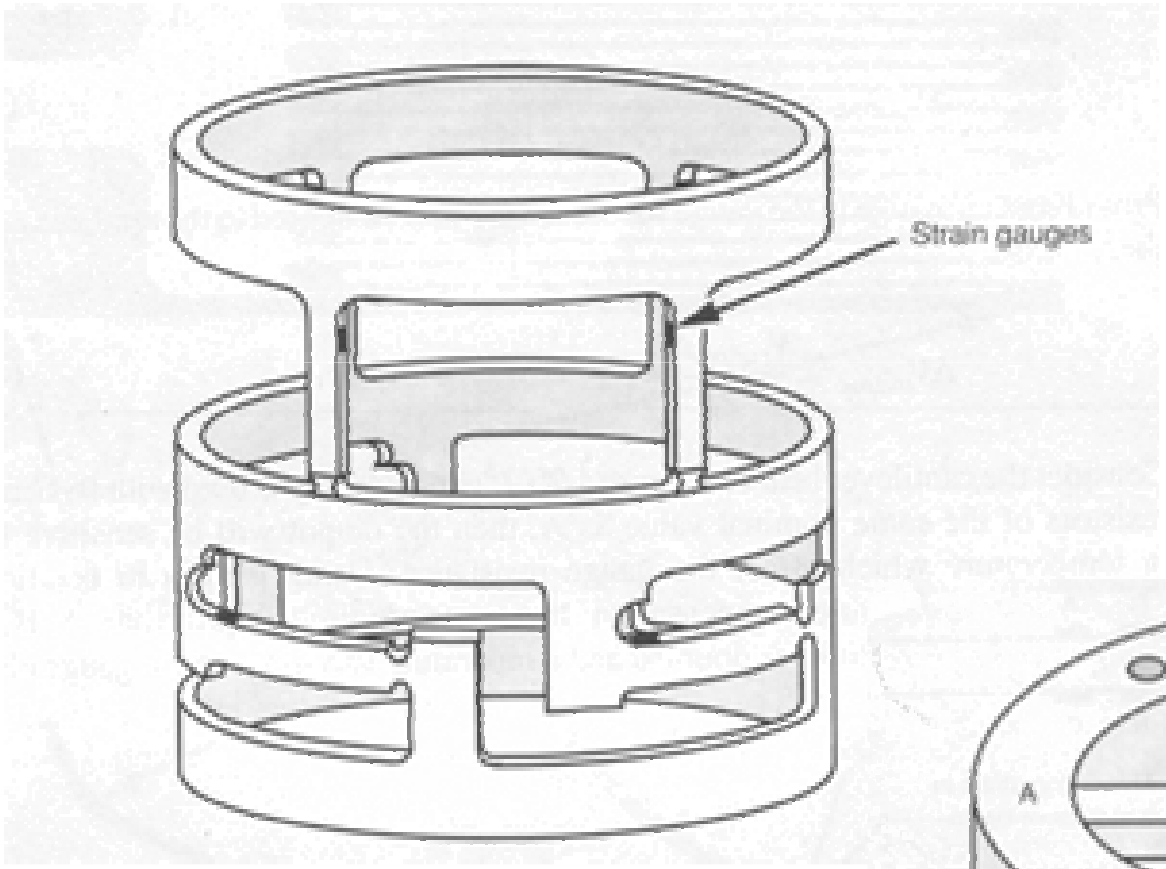


La forma del sensore serve a renderlo più sensibile in una direzione che nell'altra

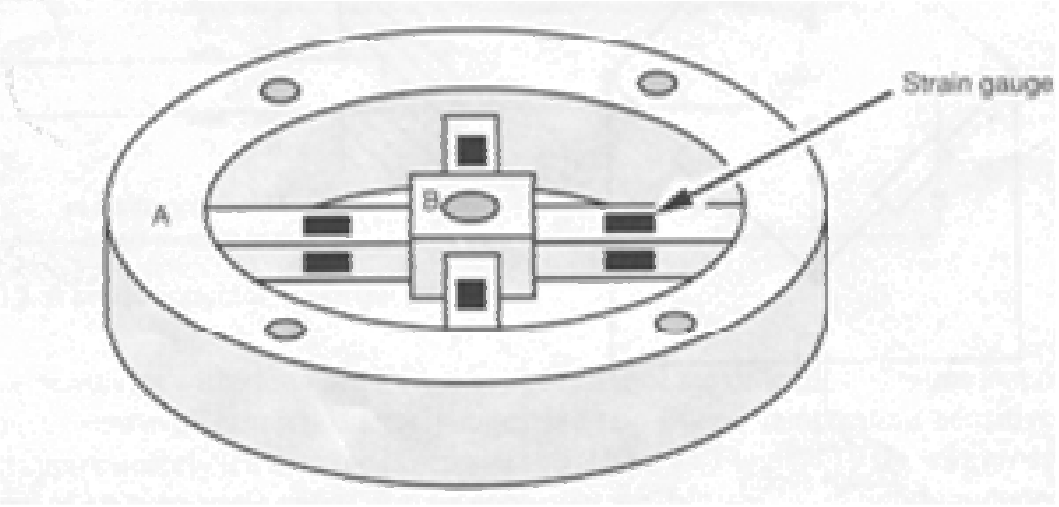
Fattore di Gauge: $$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$

v = rapporto di Poisson del materiale

Sensori di forza/coppia a 3 componenti

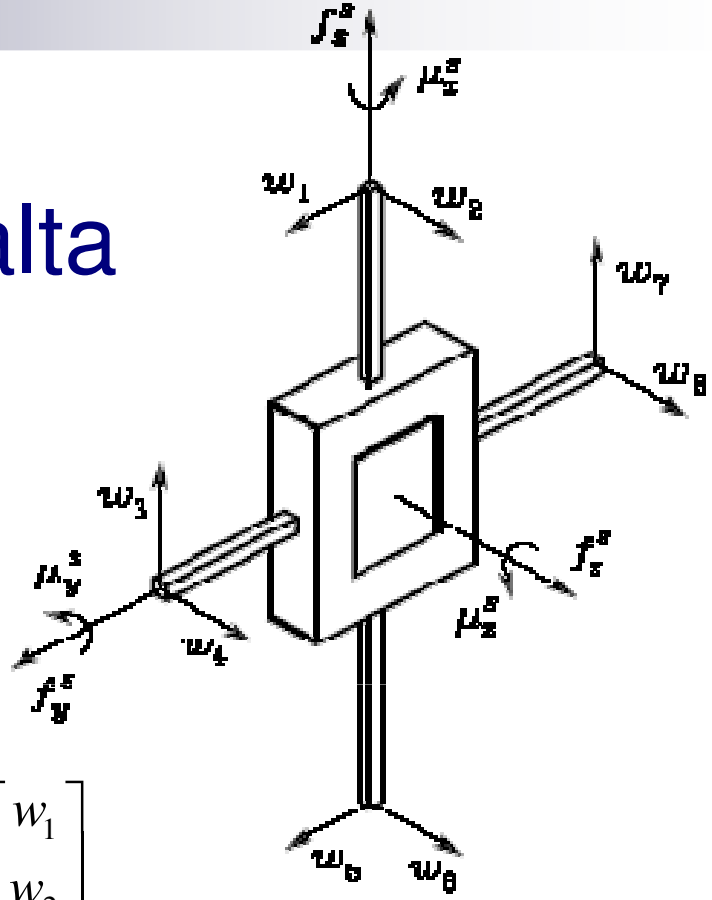


- Strutture meccaniche con direzioni di deformazione preferenziali, date da indebolimenti, su 3 assi
- Strain gauge disposti sugli indebolimenti



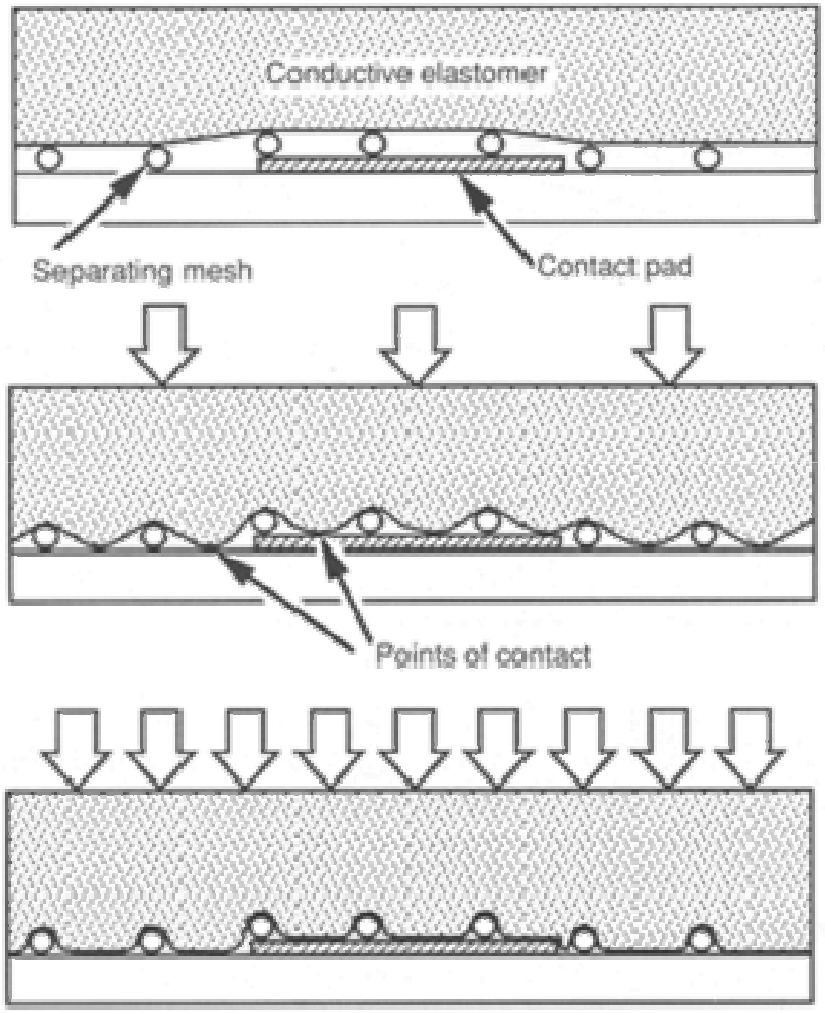
Sensore triassiale di forza/coppia a croce di Malta

- 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

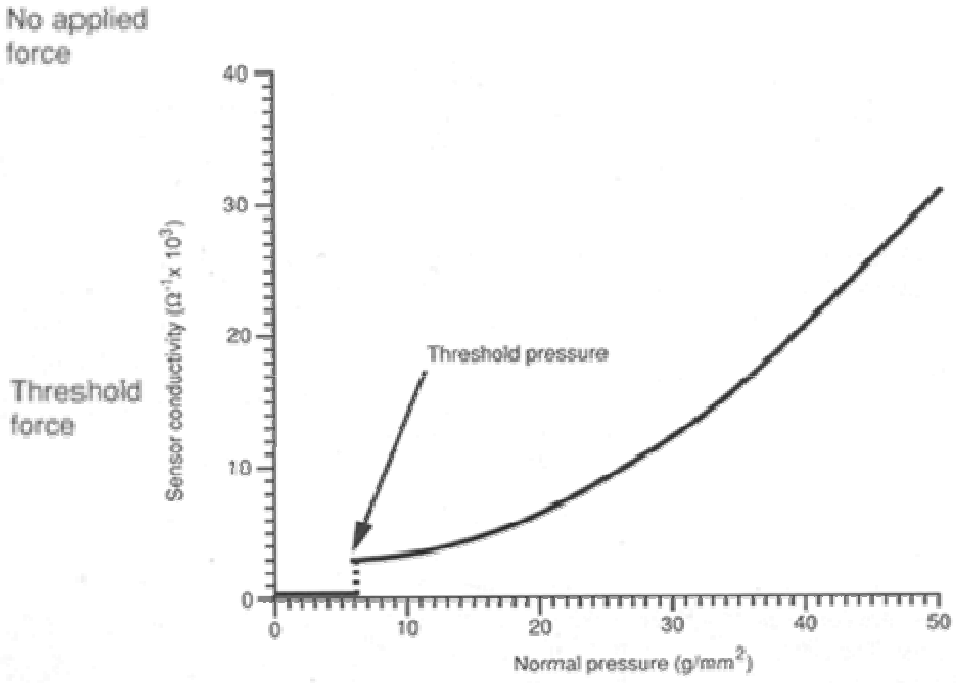


$$\begin{bmatrix} f_x^s \\ f_y^s \\ f_z^s \\ \mu_x^s \\ \mu_y^s \\ \mu_z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 & c_{17} & 0 \\ c_{21} & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & c_{34} & 0 & c_{36} & 0 & c_{38} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & c_{48} \\ 0 & c_{52} &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

Sensore resistivo di Hillis



256 unità
Area: 1 cm^2
Sensibilità: 1-100 g

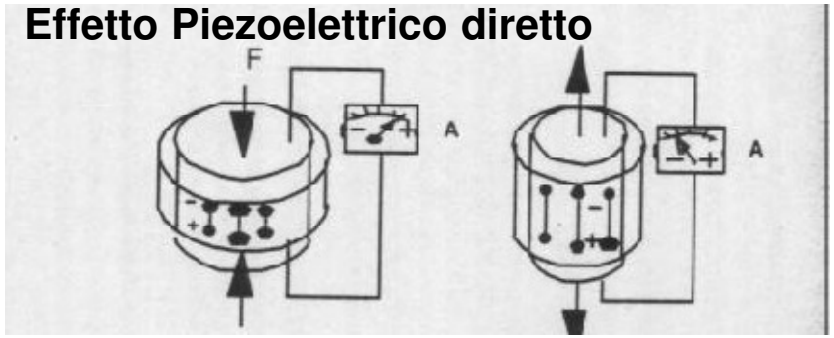


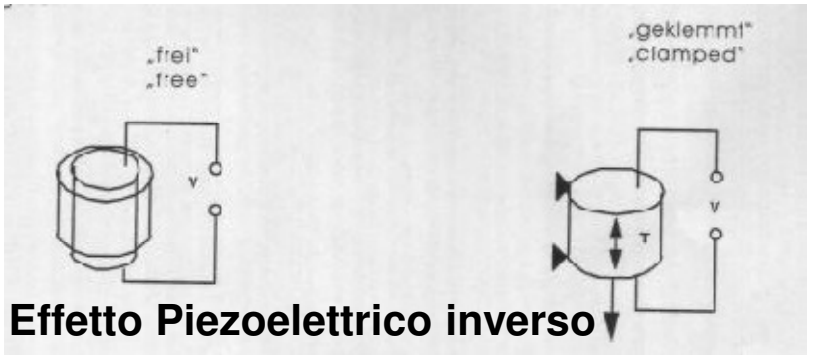
Variazione della resistenza in funzione della forza normale applicata: comportamento non lineare

Sensori Piezoelettrici

Effetto Piezoelettrico (Pierre & Jacques Curie, 1880)

- Fenomeno fisico per cui, sottoponendo a sollecitazioni meccaniche una certa categoria di cristalli (quarzo, piezo-ceramici, 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

Effetto Piezoelettrico

- Le proprietà piezoelettriche di un materiale sono descritte da due costanti fisiche:

$$g = \frac{E}{\sigma} = \left[\frac{V/m}{N/m^2}\right]$$

g = rapporto tra il campo elettrico (E) e lo sforzo meccanico (σ)

$$d = \frac{q}{F} = \left[\frac{C}{N}\right]$$

d = rapporto tra la carica elettrica (q) e la forza (F)

- Legate attraverso la costante dielettrica (ε) del materiale:

$$d = \varepsilon \cdot g$$

- L'interazione tra i fenomeni elettrici e meccanici in un materiale piezoelettrico lineare ed isotropo è descritta dalle seguenti equazioni costitutive:

$$p = \varepsilon \cdot E + d \cdot T$$

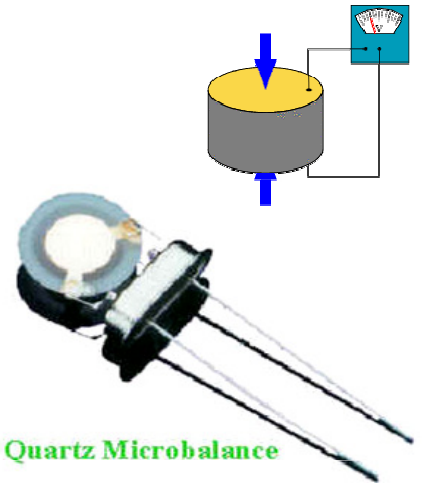
$$S = \frac{\sigma}{Y} + d \cdot E$$

p: polarizzazione (carica/unità superficie)
S: deformazione
σ: sforzo meccanico
Y: modulo di elasticità

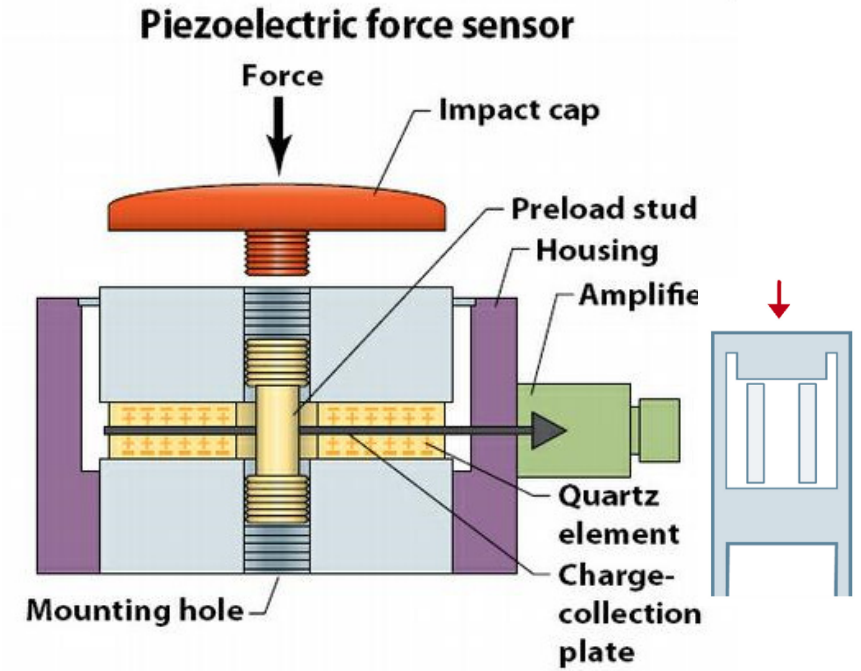
Sensori Piezoelettrici al quarzo

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:

$$n=c/v$$

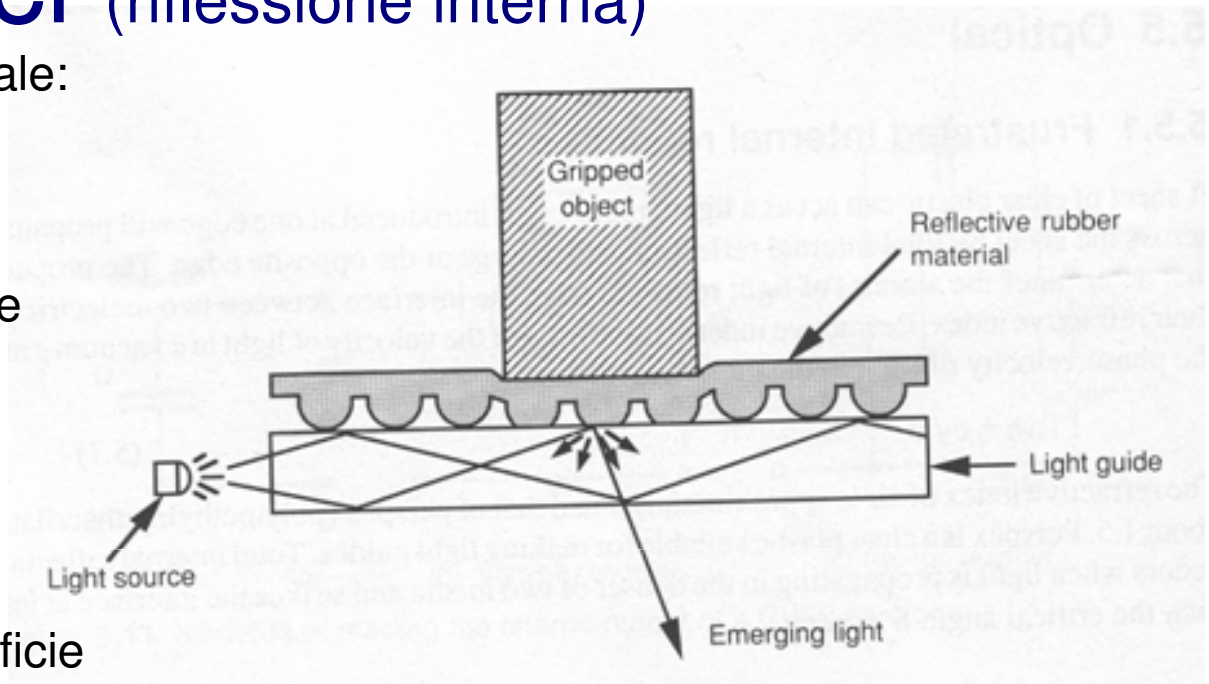
con

c=velocità della luce nel vuoto

v=velocità della luce nel materiale

Angolo critico θ_c:

$\sin \theta_c = n_2/n_1$ con $n_1>n_2$

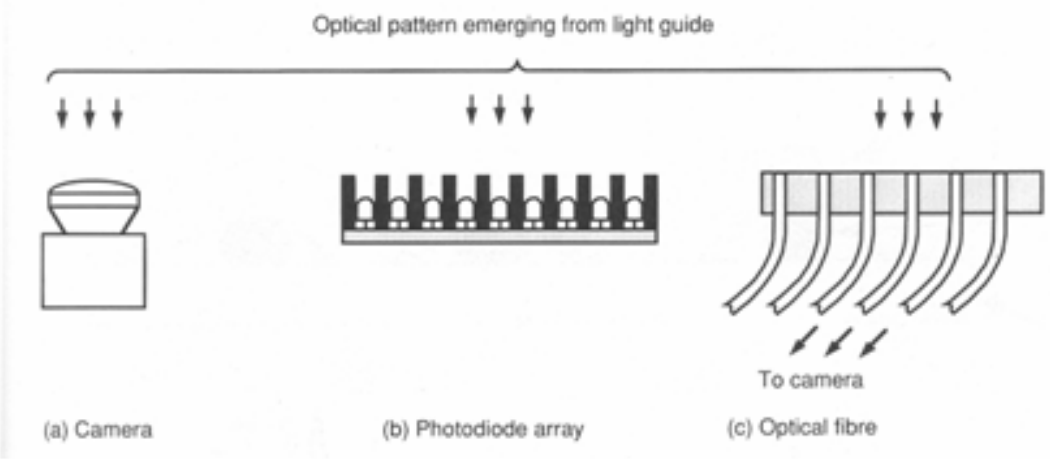


Riflessione interna totale:

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

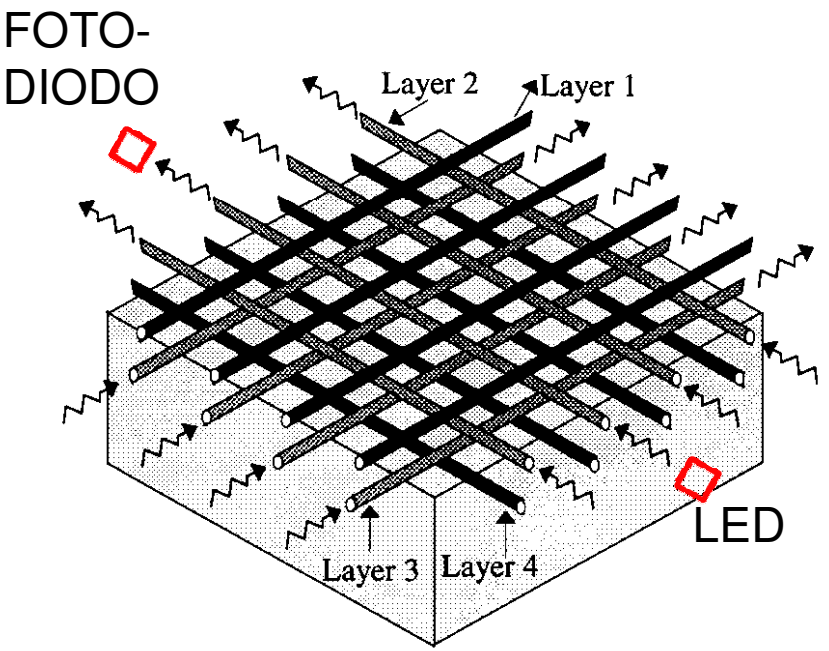
Il contatto di un oggetto esterno sulla superficie della guida ottica impedisce la riflessione interna totale e la luce emerge dal lato opposto della guida



Sensori ottici (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 fotodiodo 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.

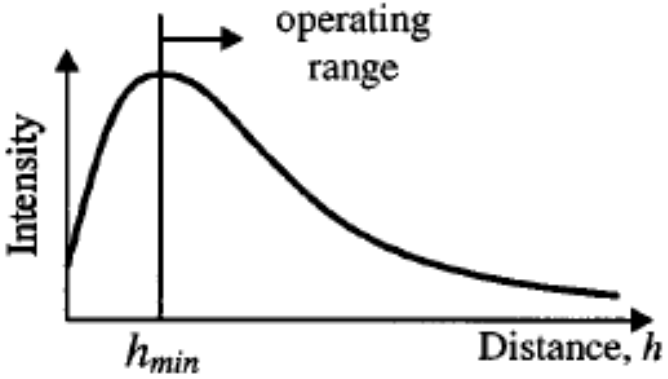


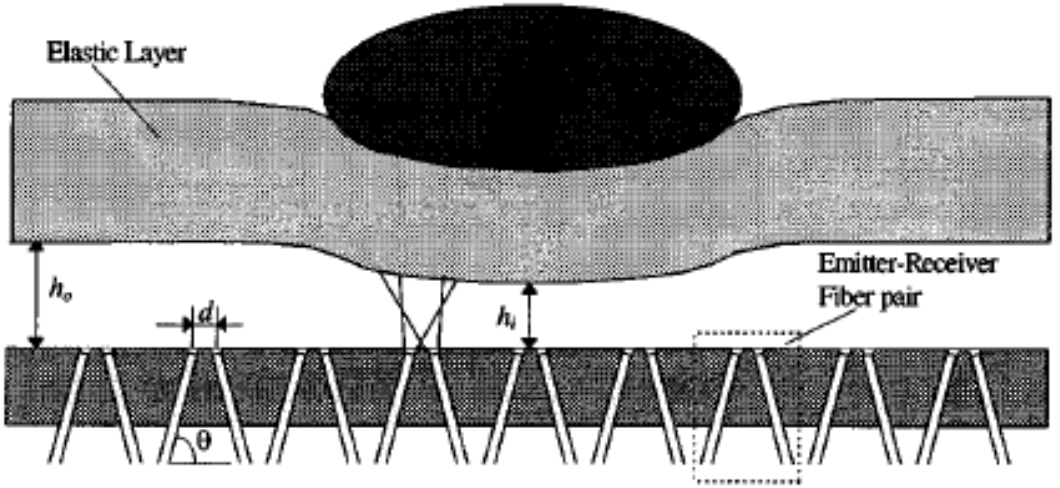
Sensori ottici (modulazione di intensità)

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:

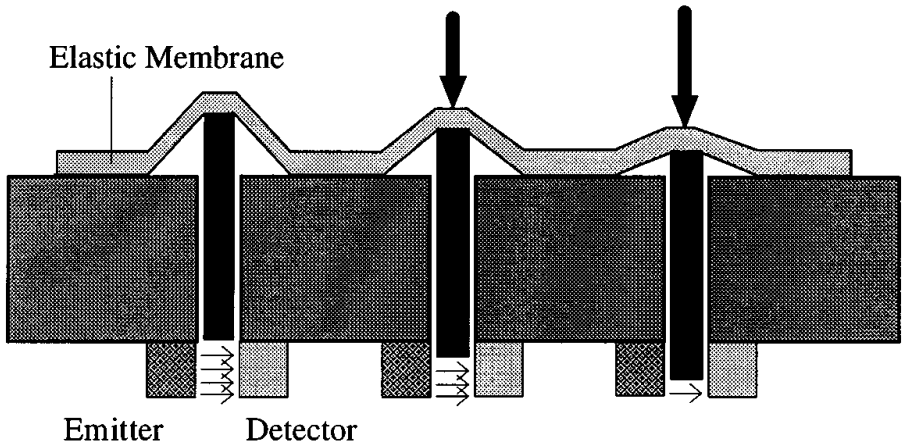
$$h > h_{min}$$



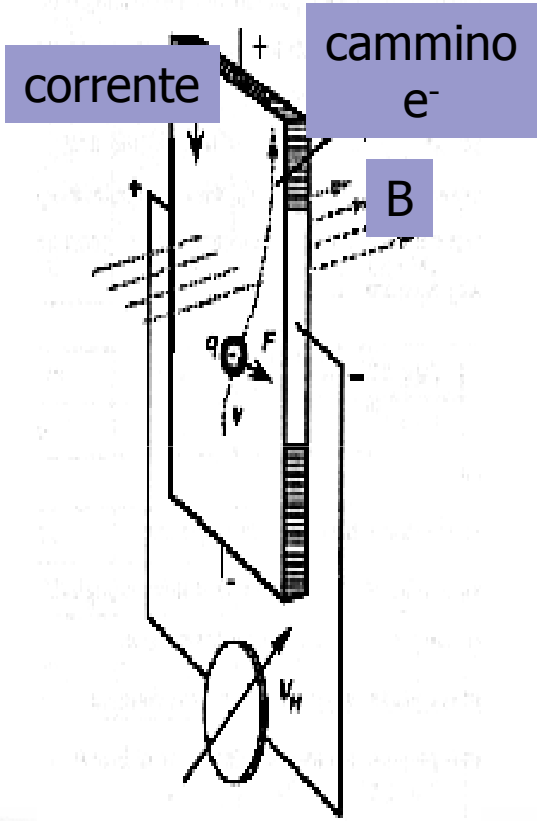


Sensori ottici (ad occlusione)

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.



Sensori magnetici



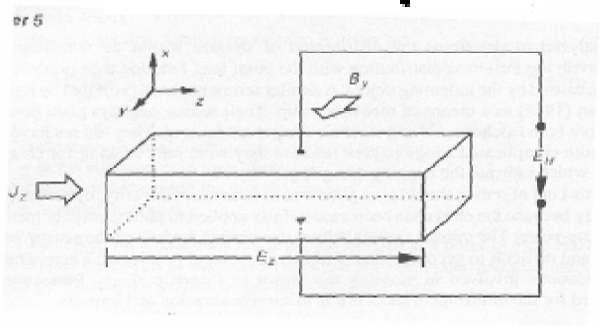
Effetto Hall

(Dr. Edwin Hall, 1879, at Johns Hopkins University, Baltimora)

- In un conduttore a forma di lamina percorso da corrente ***i*** e soggetto ad un campo magnetico di intensità ***B***, si origina una differenza di potenziale V_{Hall} (***potenziale di Hall***) in una direzione perpendicolare sia alla corrente che al campo magnetico.

$$V_{Hall} = \frac{RiB}{d}$$

R = costante o coefficiente di Hall



La tensione di Hall risulta proporzionale all'intensita' di corrente ***i*** e all'intensita‘ del campo magnetico ***B***, mentre e' inversamente proporzionale allo spessore della lamina ***d***:

Sensori magnetici a effetto Hall

Caratteristiche generali

- Buona versatilità
- Elevata sensibilità

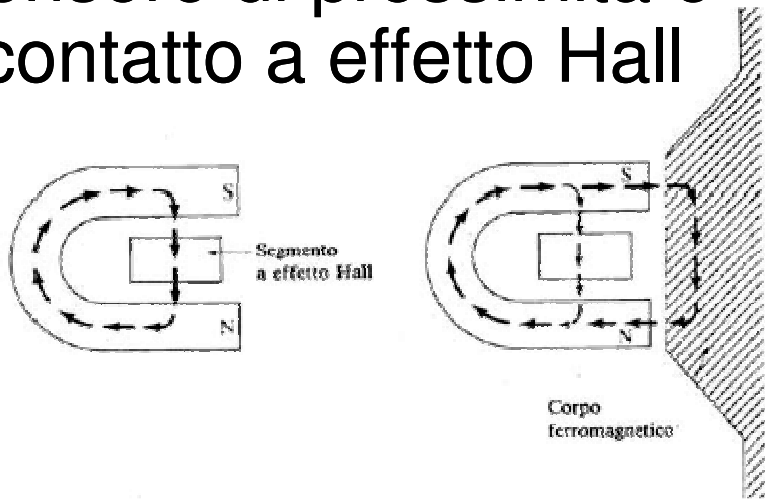
  (anche alla direzione del campo magnetico)
- Voltaggio in output ~ μV
- Lunga vita utile
- Elevata velocità (superiore 100kHz)
- No parti mobili
- Ampio range di temperatura

  (da -40 fino +150℃)
- Elevata ripetibilità

Sensori magnetici a effetto Hall

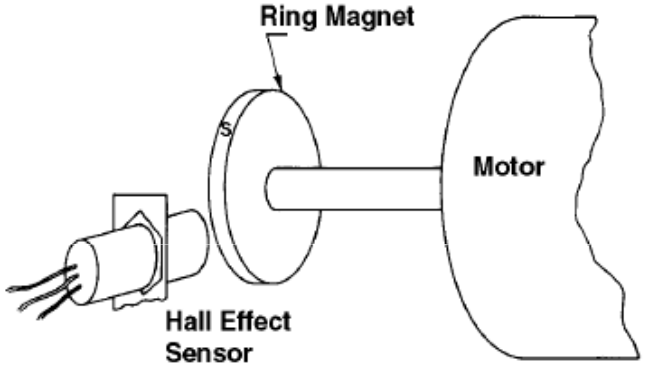
Applicazioni

- Sensore di prossimità e di contatto a effetto Hall



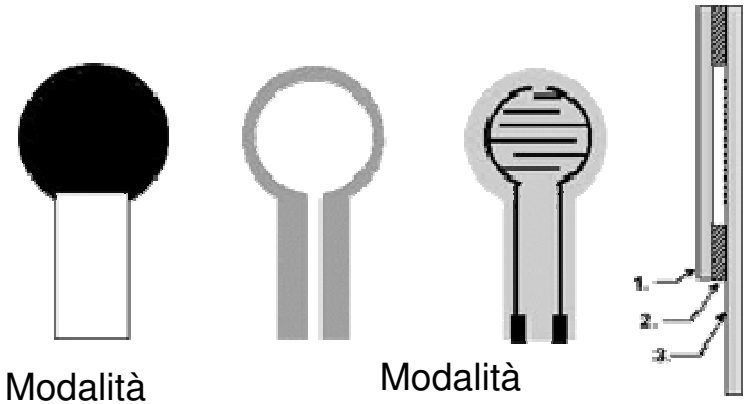
- Un magnete permanente genera il campo magnetico.
- Il contatto con un oggetto ferromagnetico modifica il campo magnetico
- L'effetto Hall permette di misurare questa variazione come variazione della differenza di potenziale

- Sensore di posizione a effetto Hall



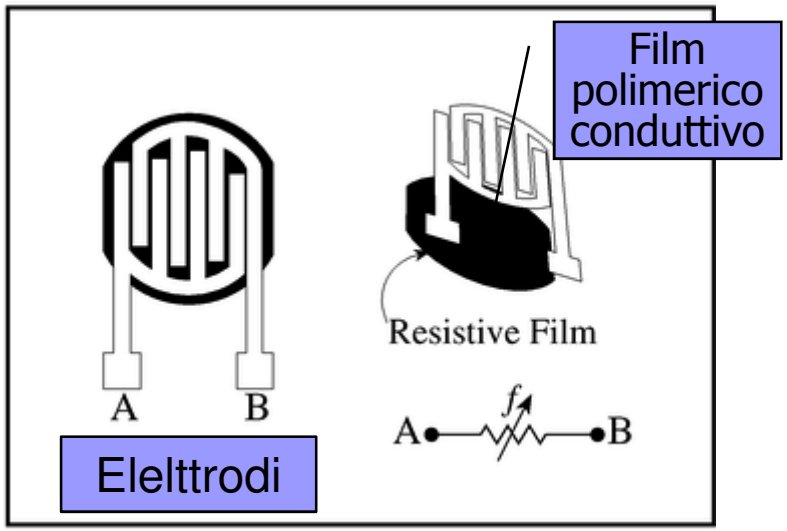
- Pulsanti elettrici ad azionamento manuale, a volte impiegati in apparecchiature elettroniche:
- Pigiando il pulsante viene spostato un piccolo magnete in corrispondenza del sensore Hall, il quale genera un impulso logico privo di rimbalzi

FSR – Force Sensing Resistors

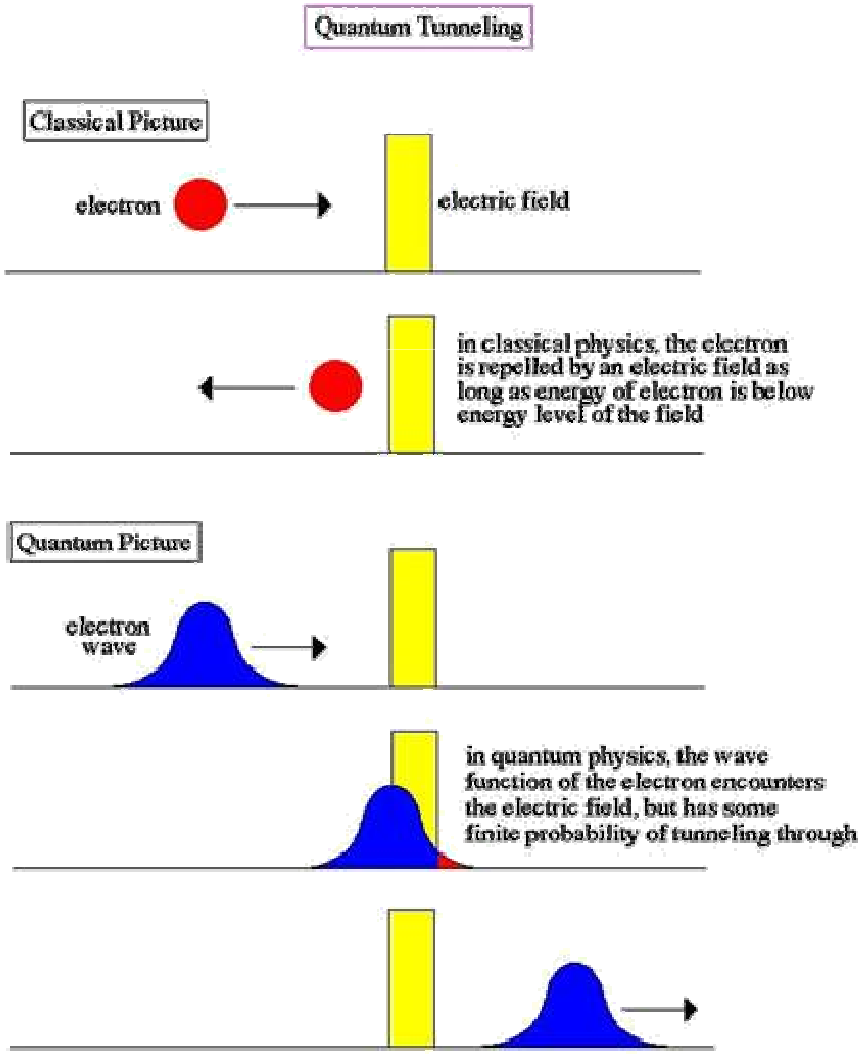


Dispositivo a film polimerico che presenta resistenza decrescente per forze applicate crescenti

- Bassa accuratezza
- Bassa sensibilità
- Bassa isteresi
- Economici

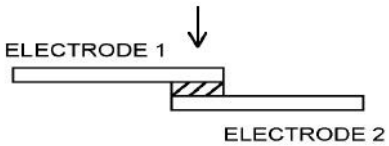


Sensori QTC (Quantum Tunneling Composites)

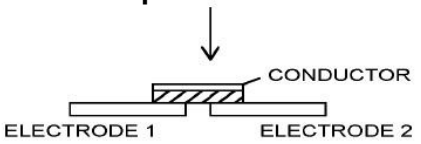


- I QTC possono trasformarsi da perfetti isolanti a conduttori simili ai metalli quando deformati
- La deformazione può risultare da compressione, taglio o stiramento
- La risposta dei QTC può essere modulata sullo spettro delle forze applicate
- La transizione da isolante a conduttore segue una curva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

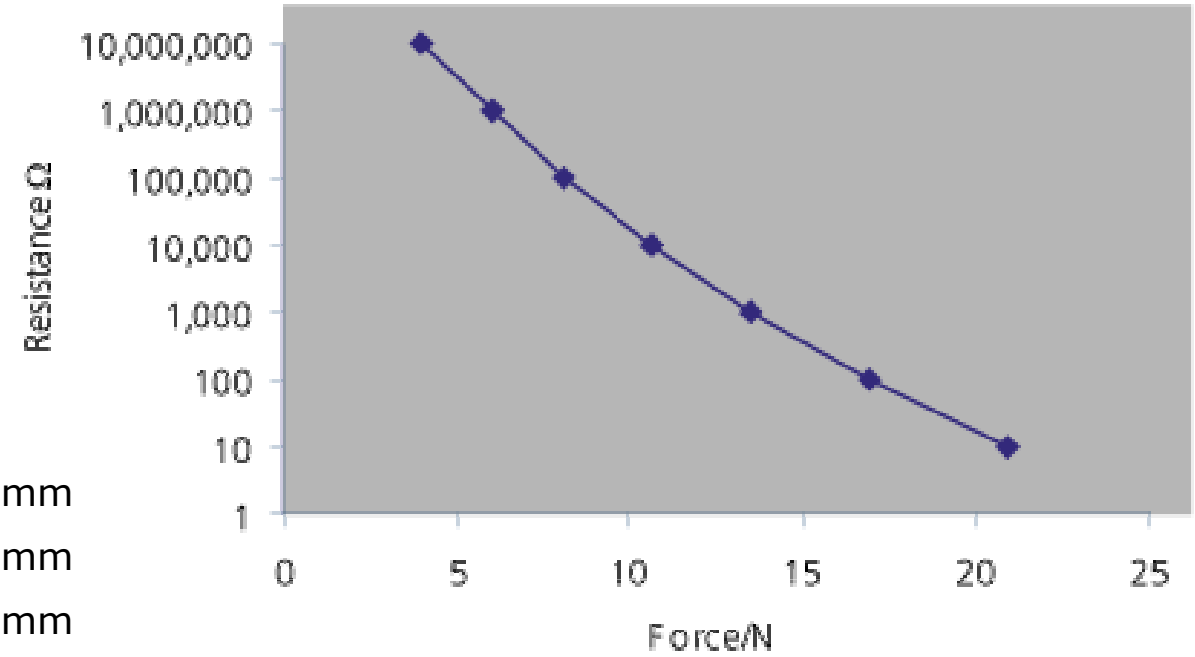
Configurazione sandwich



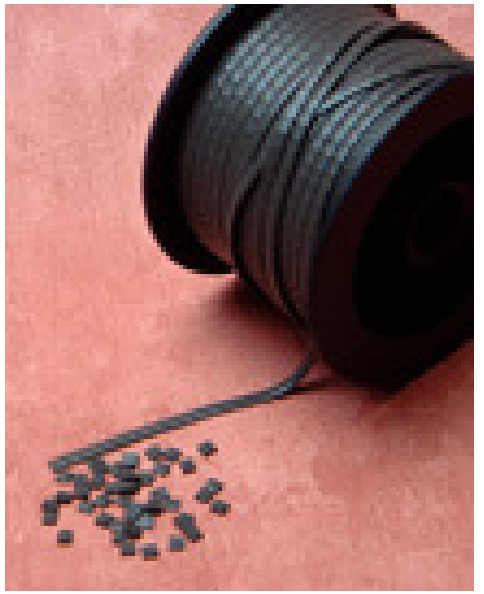
Configurazione ponte



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



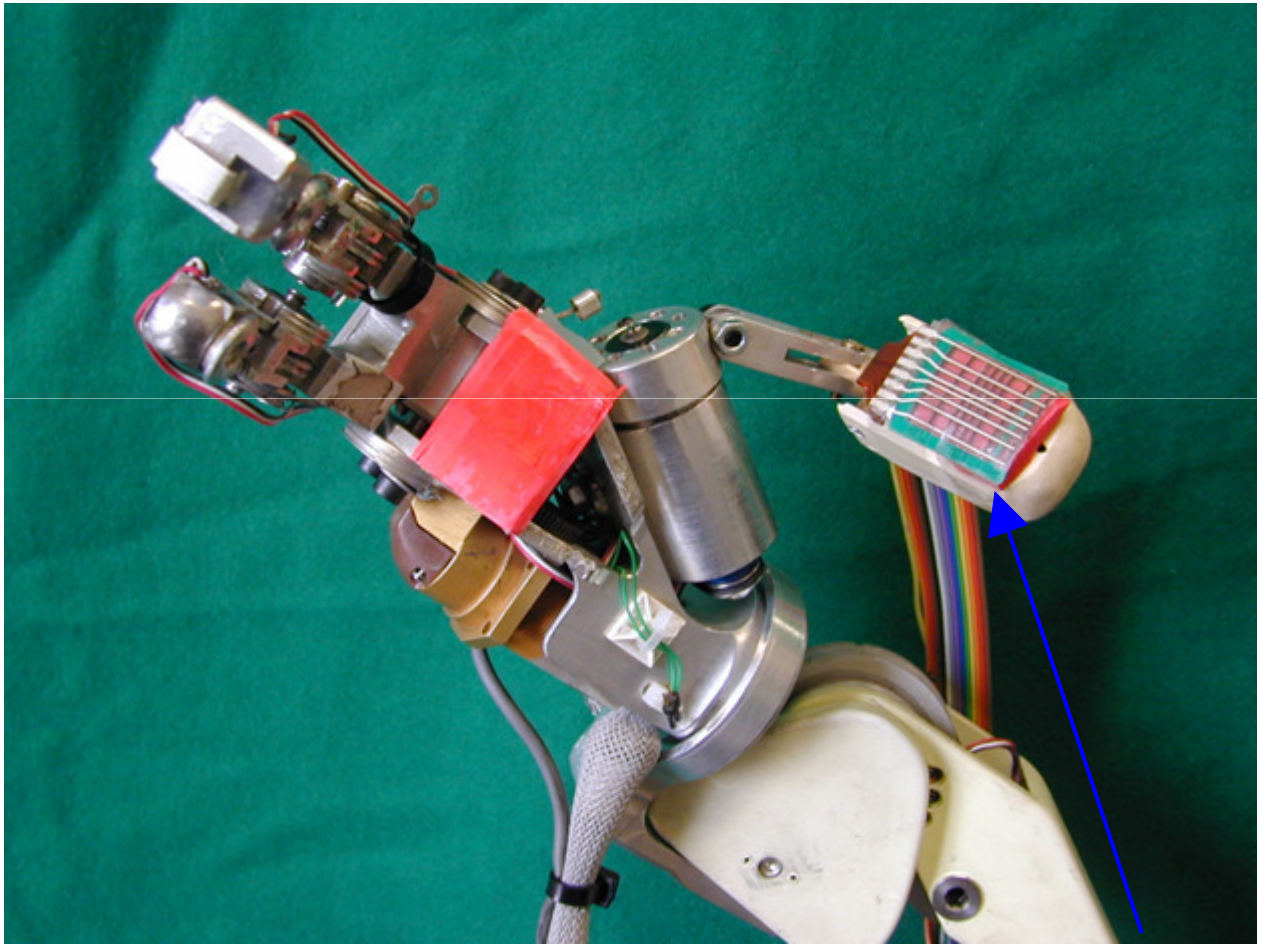
Sommario della lezione

- 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:*

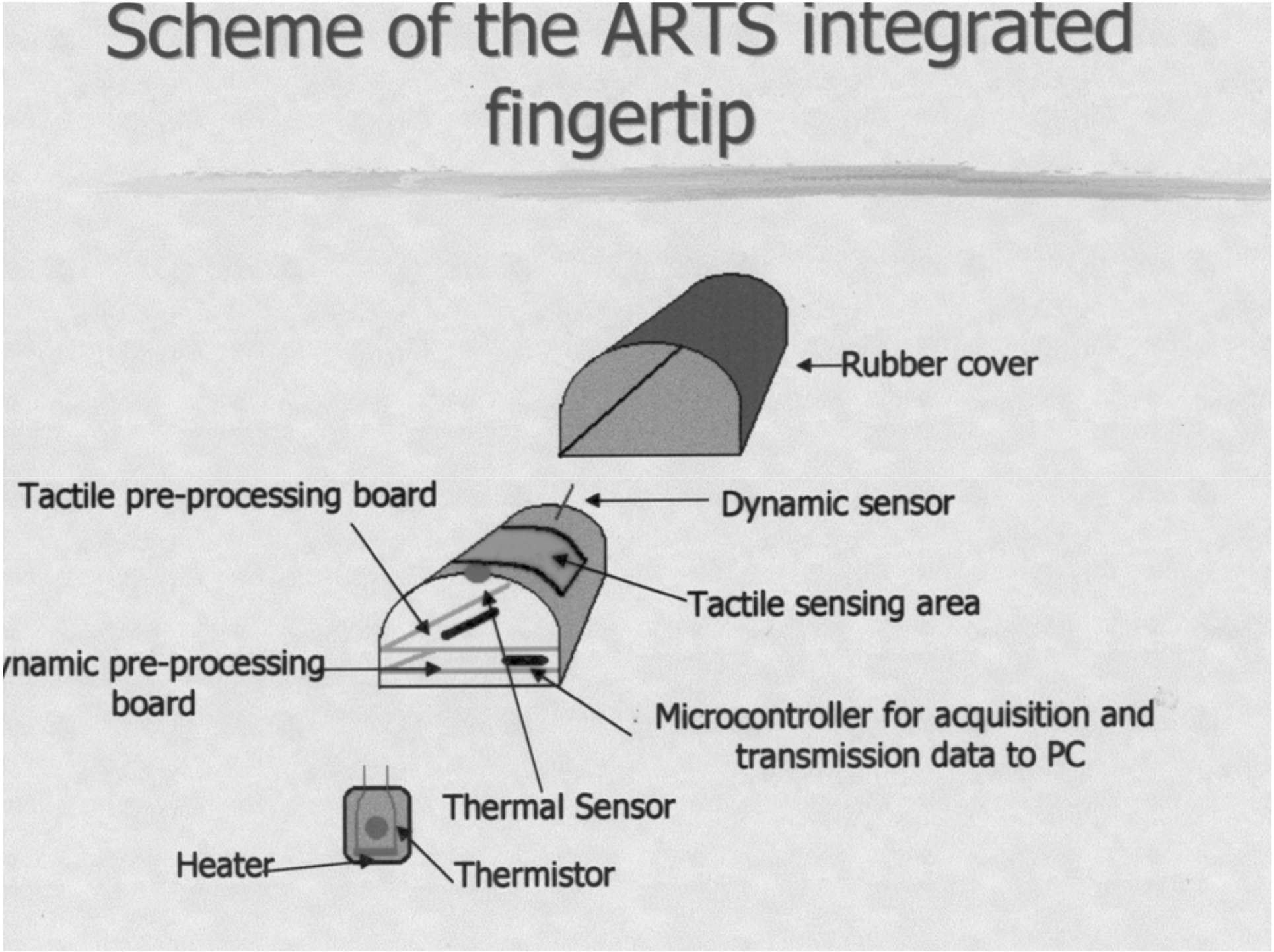
Russel, "Robot Tactile Sensing", Prentice Hall

Sensori Tattili: ARTS Tactile Sensor



ARTS Tactile Sensor

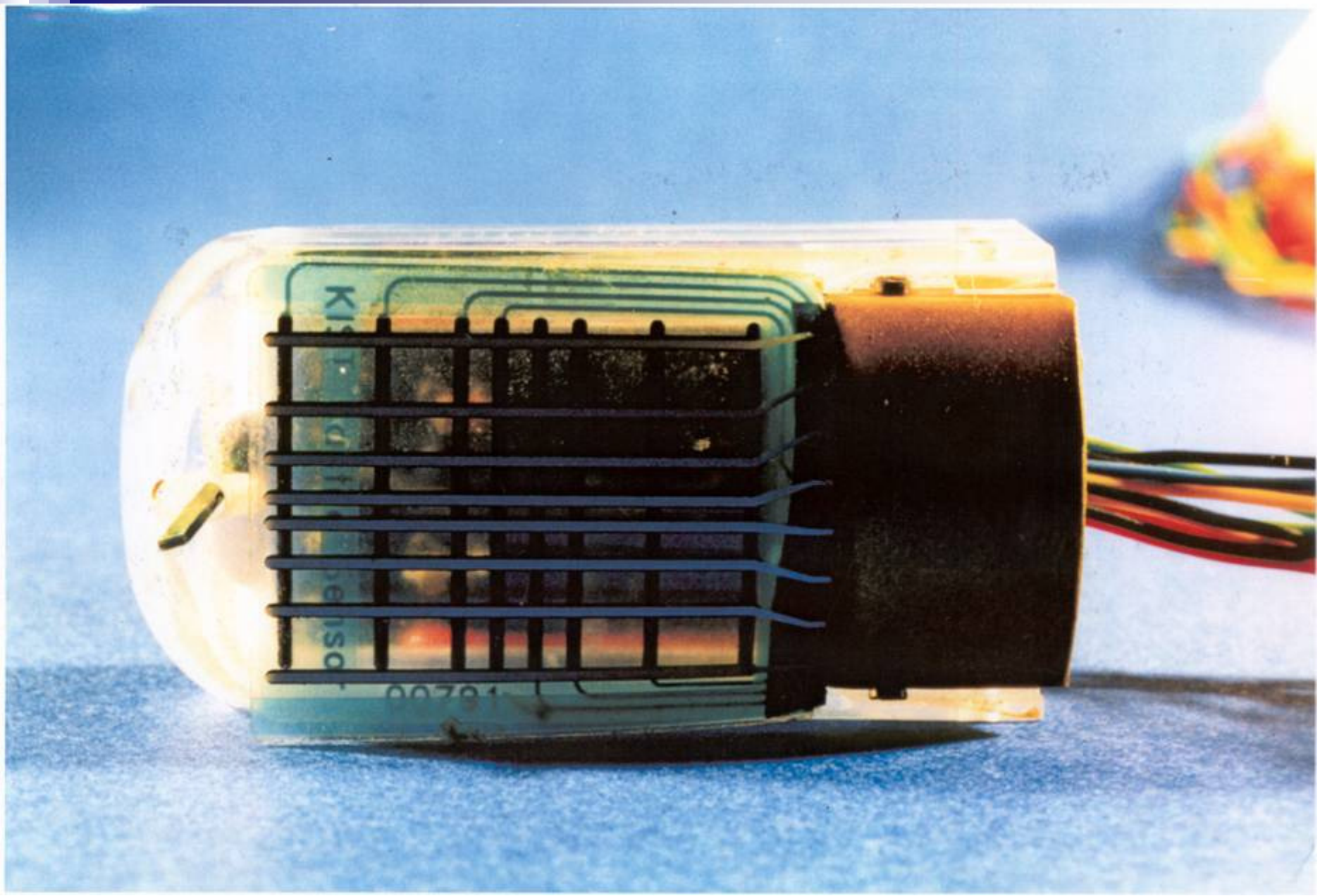
Scheme of the ARTS integrated fingertip



The ARTS integrated fingertip

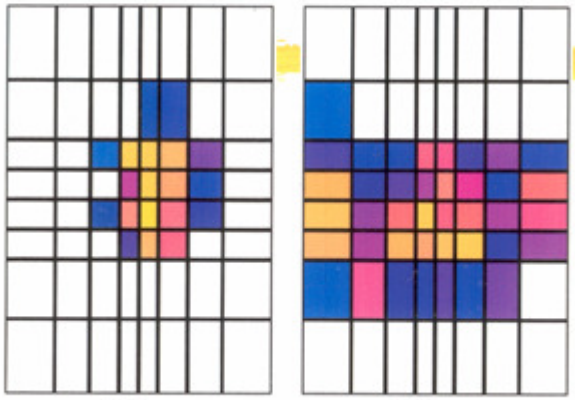
Tactile Sensor Performance	
Force resolution	0.1 N (approx.)
Linearity & Hysteresis	± 12% Fs
Uniformity	± 15% Fs @ 3N

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)



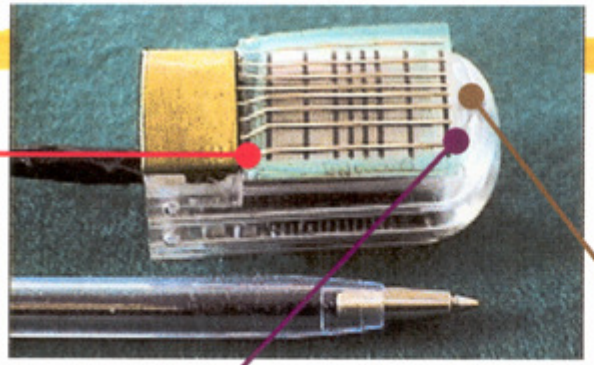
Polpastrello sensorizzato

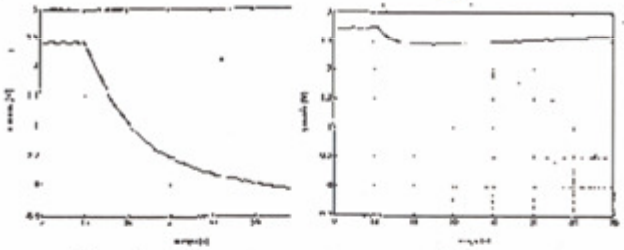
ARTS Lab, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa



(a) (b)

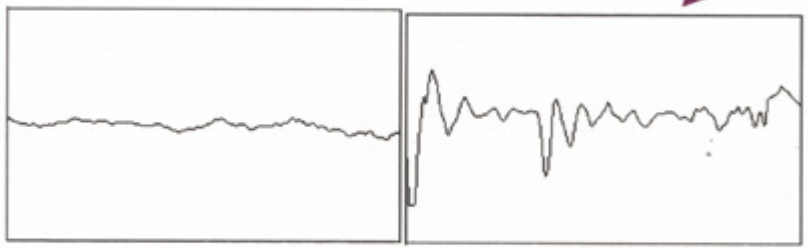
Immagine tattile acquisita durante la presa di oggetti (a) sperici e (b) cilindrici





(a) (b)

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

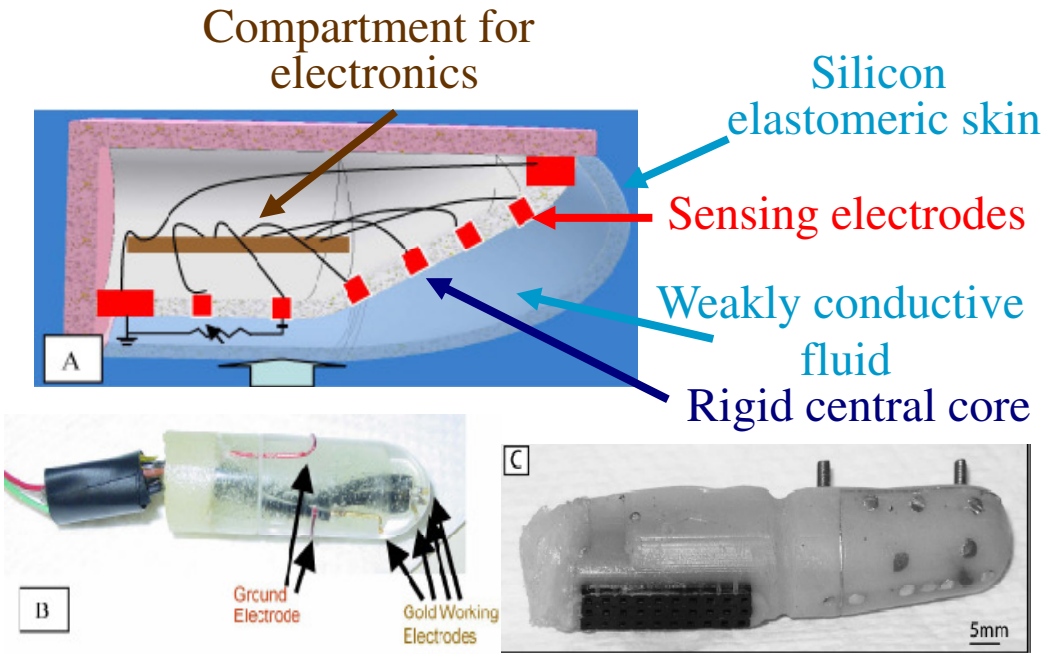


(a) (b)

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

Biomimetic Tactile Sensor Array

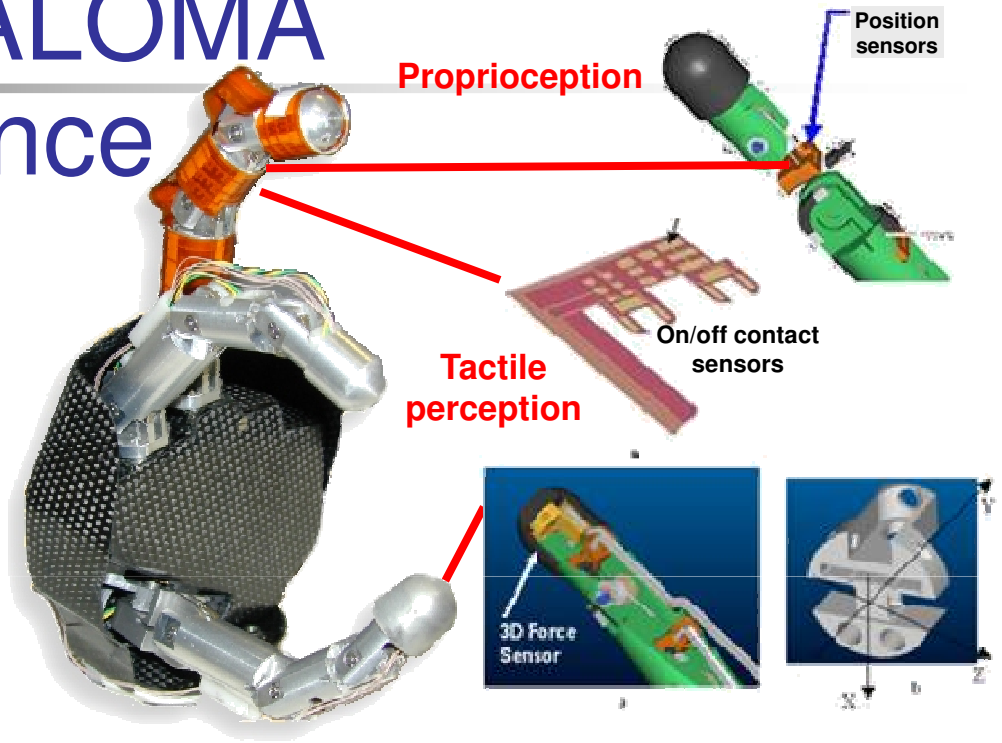
- Rigid core surrounded by a weakly conductive fluid contained within an elastomeric skin
- The sensor uses the deformable properties of the finger pad as part of the transduction process
- Multiple electrodes are mounted on the surface of the rigid core and connected to impedance-measuring circuitry 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

Published on 'ADVANCED ROBOTICS' in 2008 by:
N. Wettels, V.J. Santos, R.S. Johansson and G.E. Loeb
from University of South Carolina and Umea University

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.

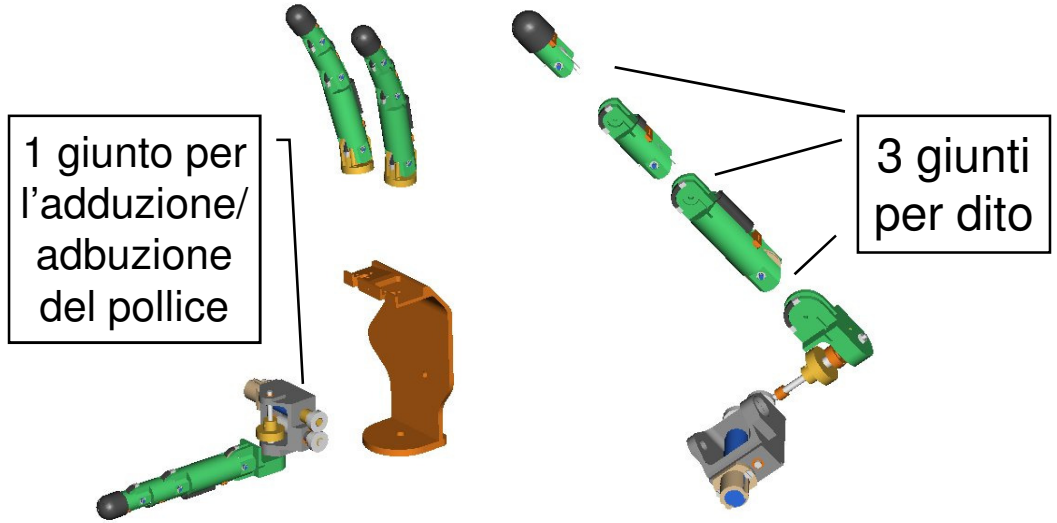
Proprioceptive System

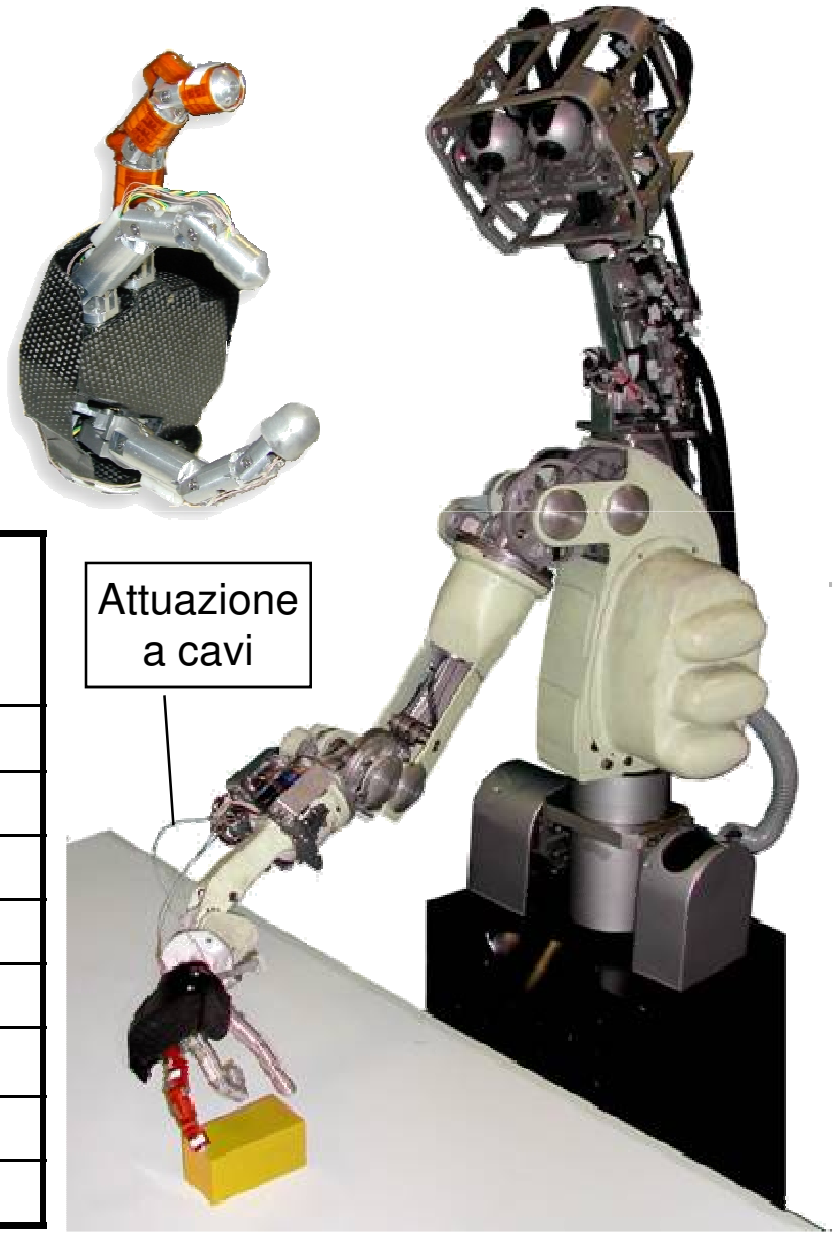
- 3 position Hall-effect sensors, one per phalanx, for each finger
- 4 motor encoders
- 3 force tension sensors providing the tension of the actuation cable

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 phalange
  - 1 on the intermediate phalanx
  - 1 on the proximal phalanx

Polpastrello tattile per una mano robotica





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

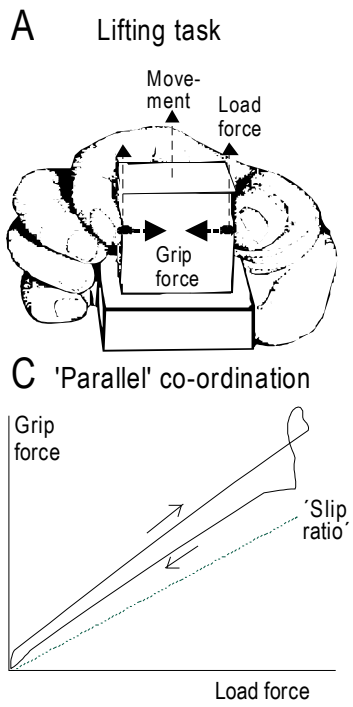
APPROACH

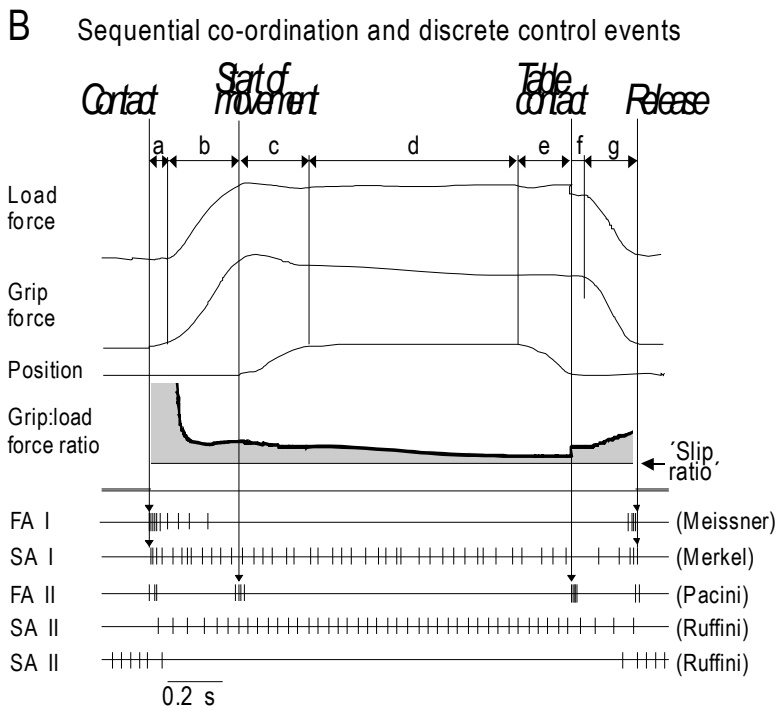
- To have a COMPLETE SYSTEM for tactile sensing
- To focus on sensory signals that belong to basic human grasping and manipulation

Prototypical task:

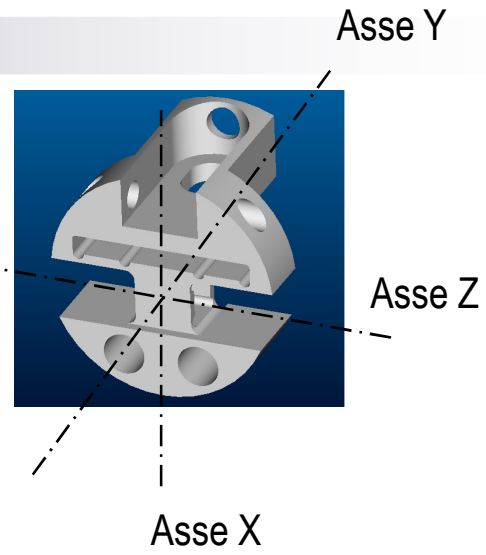
grasping, lifting and replacing an object

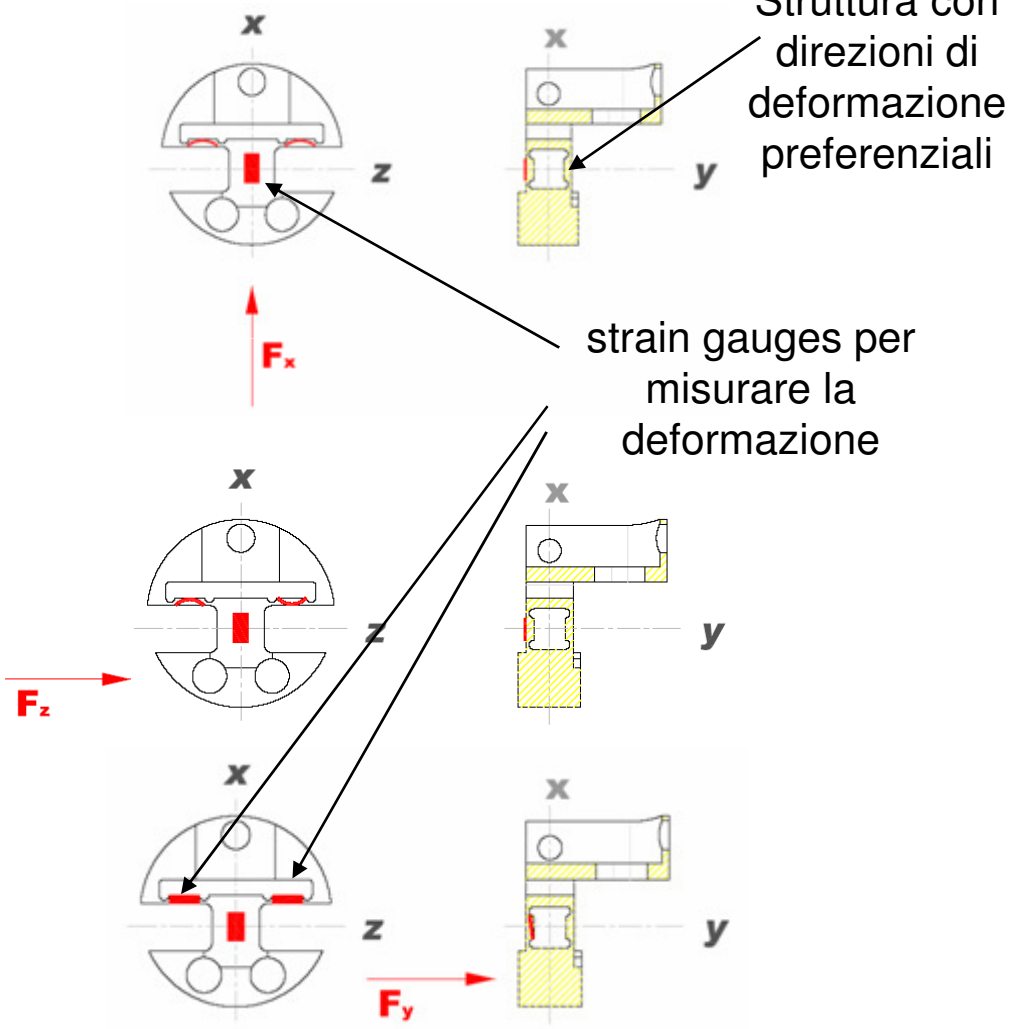
Biomimetic sensors are considered not as precision devices but as a SYSTEM able to extract qualitative or semi-quantitative information





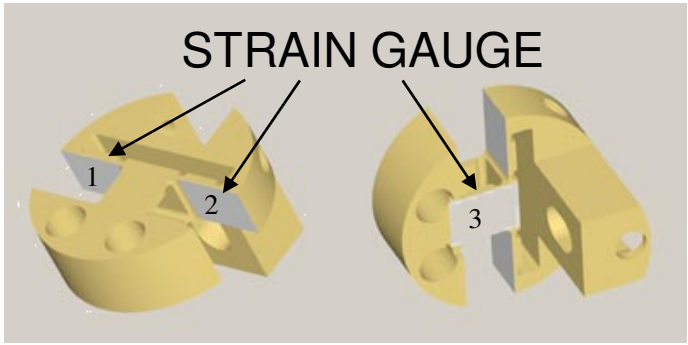
Sensore di forza triassiale nel polpastrello

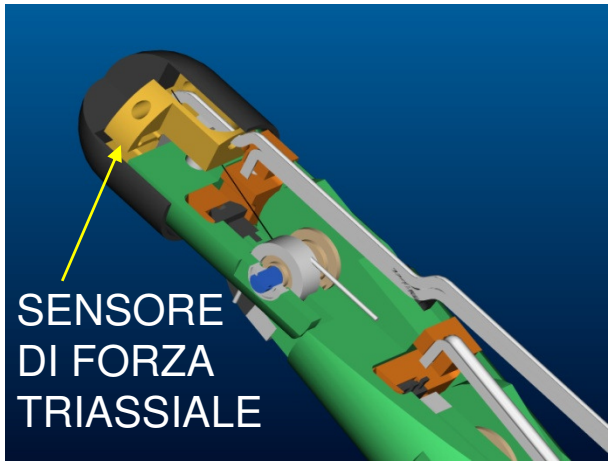




Struttura con direzioni di deformazione preferenziali

strain gauges per misurare la deformazione



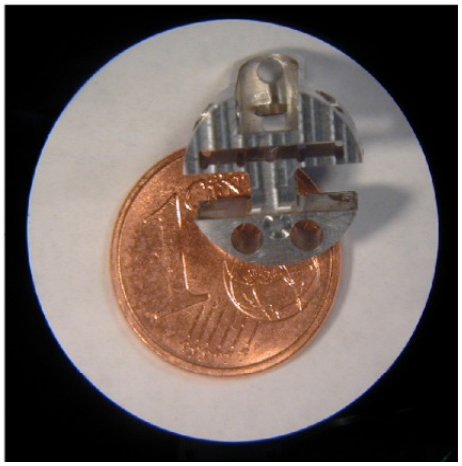


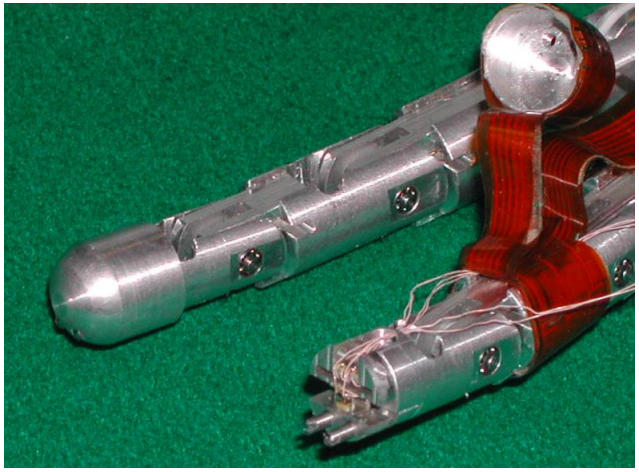
Sensore di forza triassiale nel polpastrello

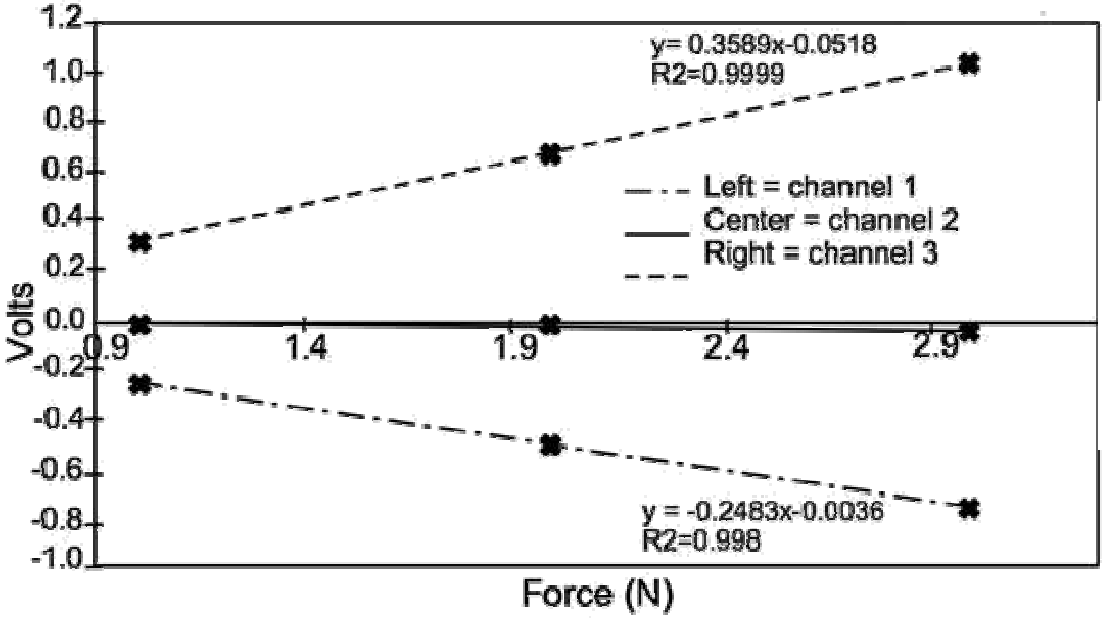
materiale: alluminio

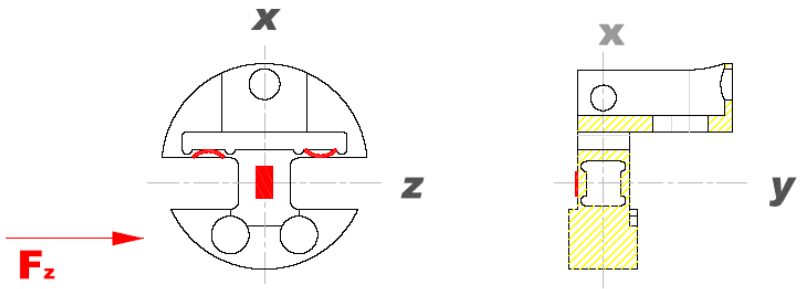
dimensioni: ϕ=12 mm

h= 9,5 mm

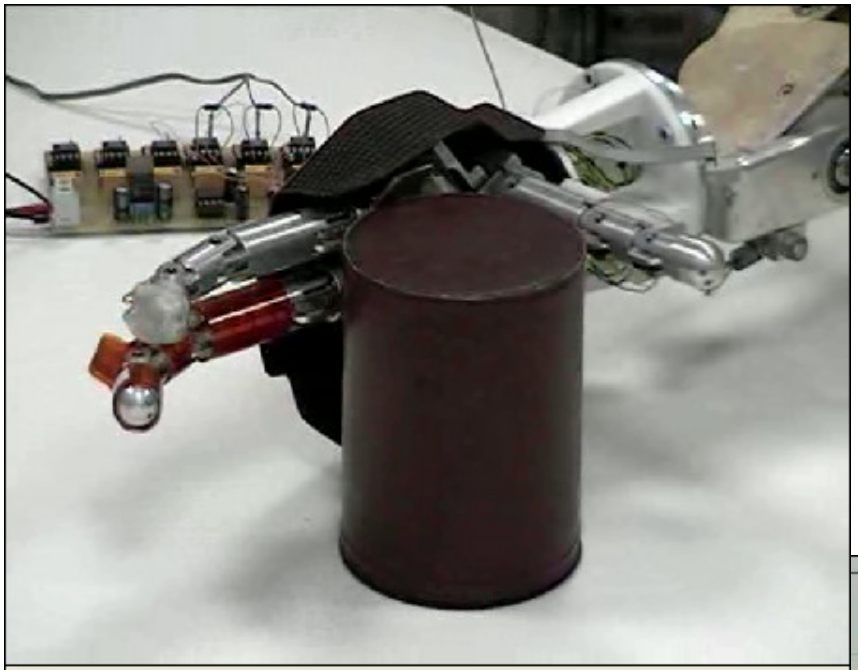




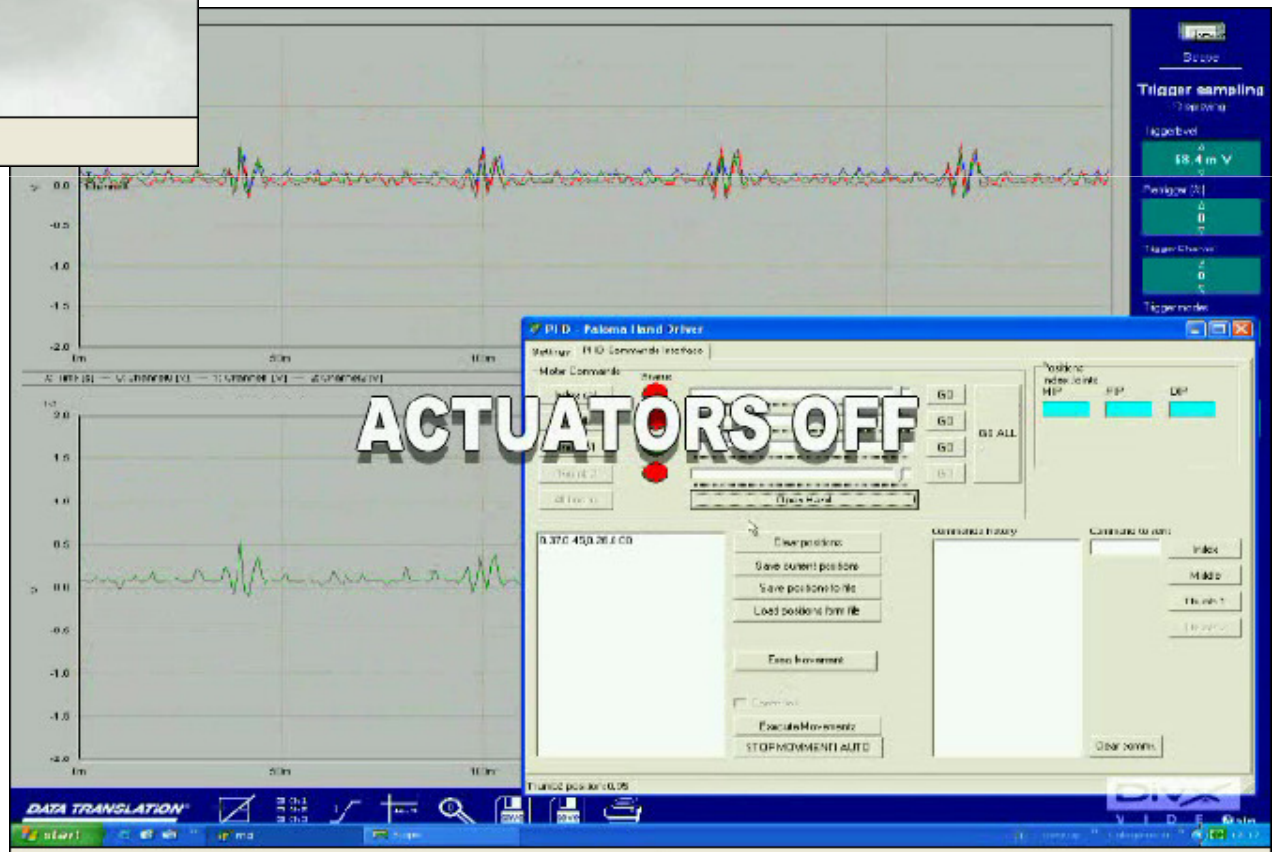




3D Force Sensor output



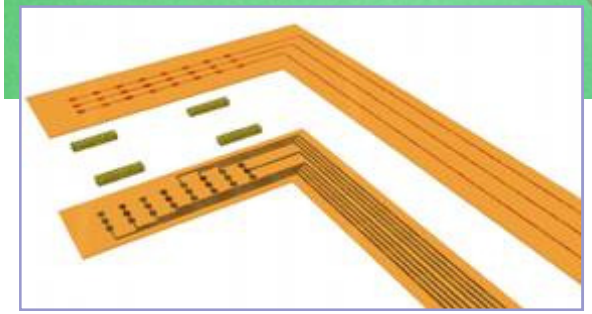
presa oggetto.avi



3D record.avi

Contact making and breaking between object and fingertips

New On/Off Contact Sensors

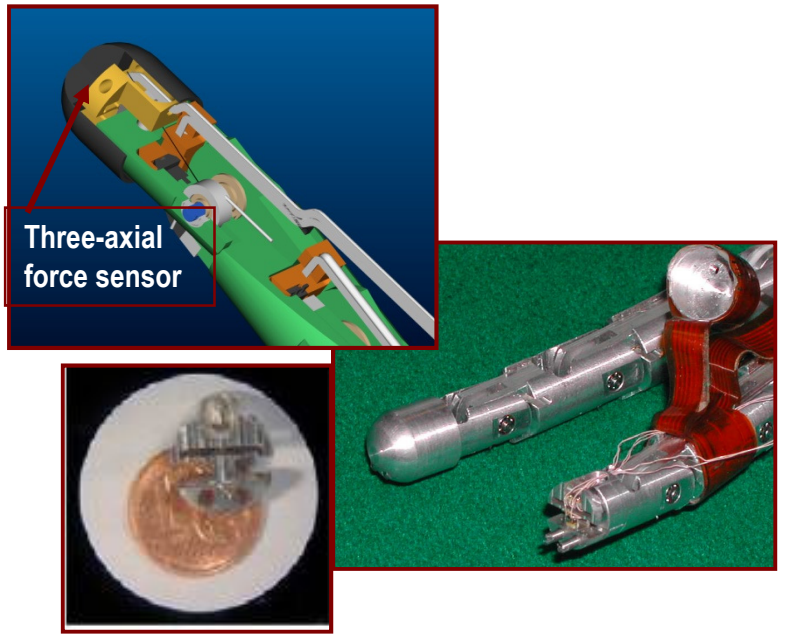


Distribution on anthropomorphic hand (Total of 80 taxels)

- 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

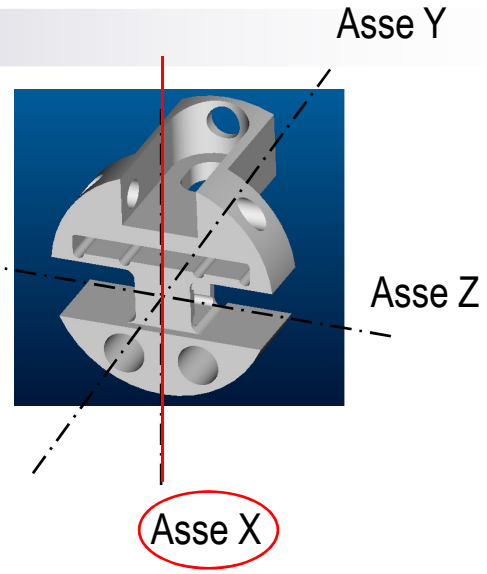
Three-Axial Force Sensor

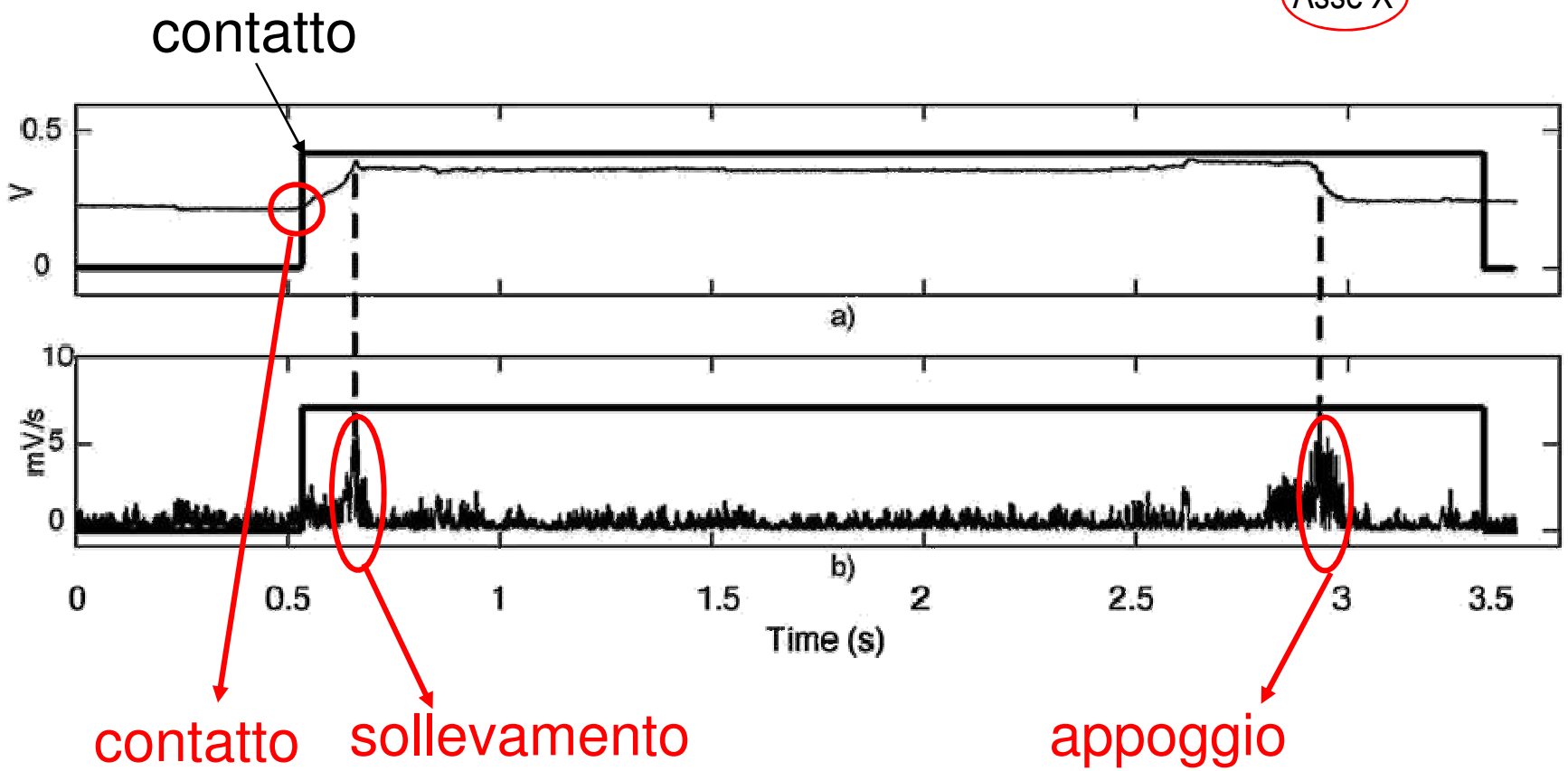


- The three-axial sensor can trigger the necessary signals during the object lift-off and replacement emulating the response of the FA-II mechanoreceptors

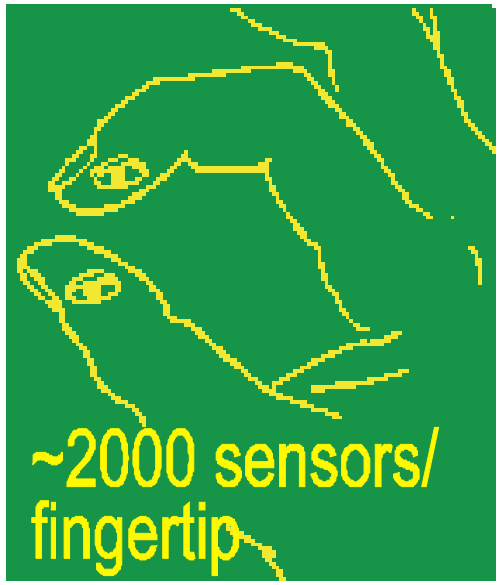
- One of the sensor outputs is sufficient to detect the sequential phases of the lifting task

Comportamento del polpastrello tattile nel compito di presa prototipale

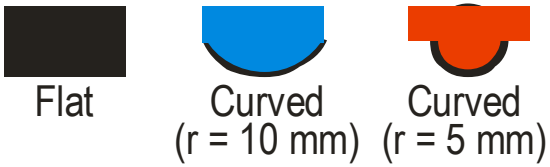




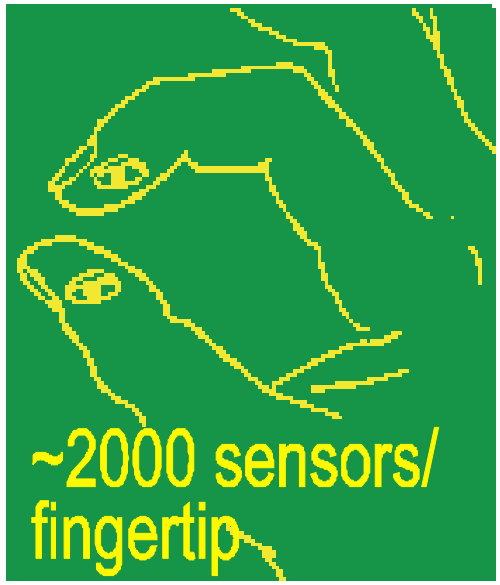
Funzionalità del sensore di forza triassiale rispetto al polpastrello



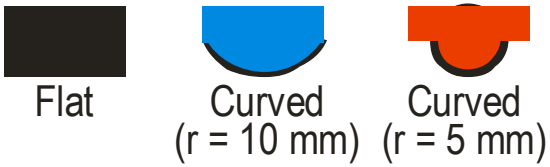
- Forza sul polpastrello:
  - intensità
  - direzione
- Forma locale del contatto (curvatura della superficie dell'oggetto)
- Eventi di controllo tattile:
  - scivolamenti
  - inizio e fine del contatto
  - inizio e fine del contatto dell'oggetto afferrato con altri oggetti (es. piano di appoggio)



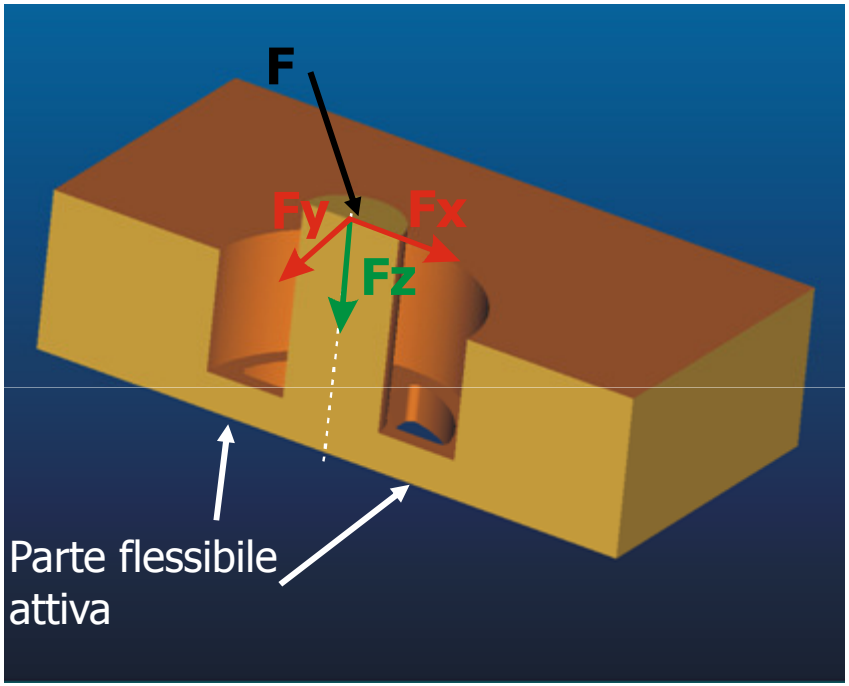
Funzionalità del sensore di forza triassiale rispetto al polpastrello



- 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)



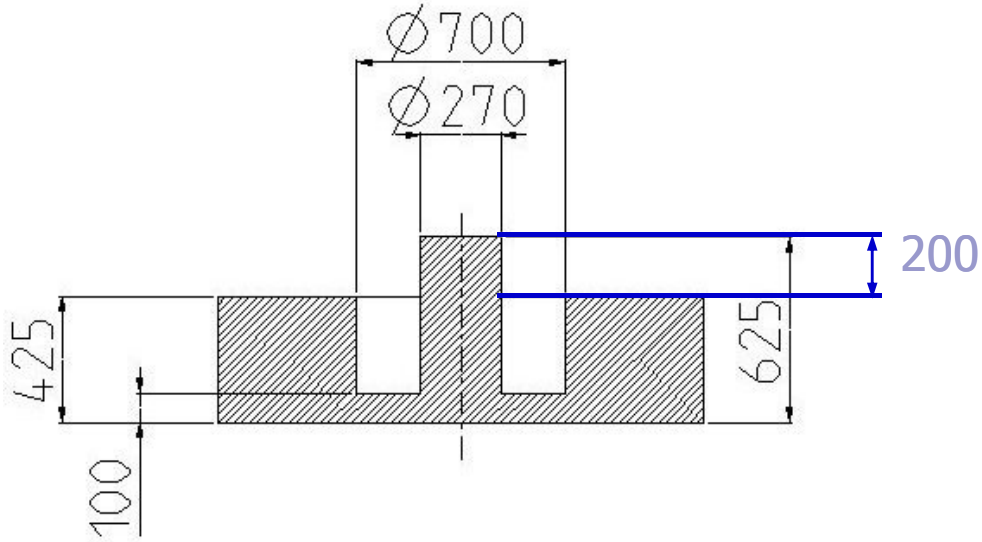
Microsensore di forza triassiale



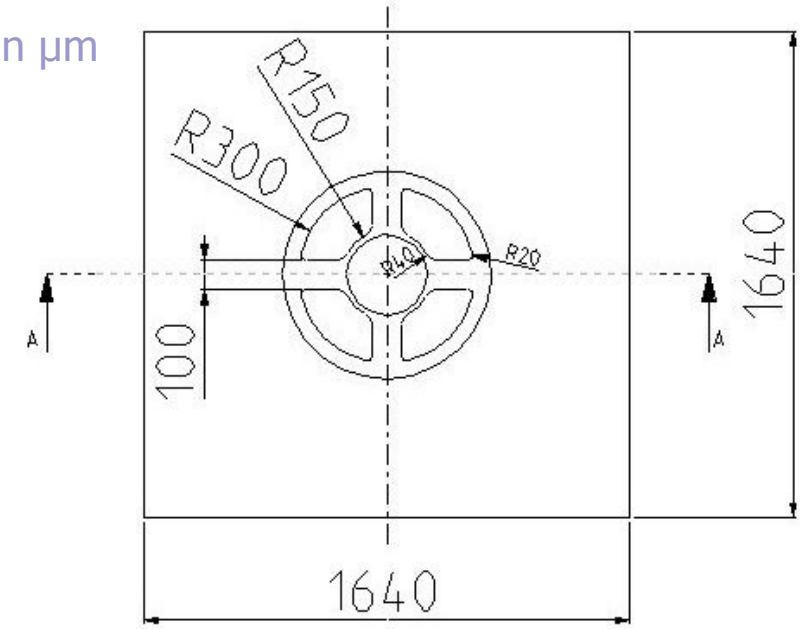
Sezione del modello 3D del sensore

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

Dimensioni del sensore

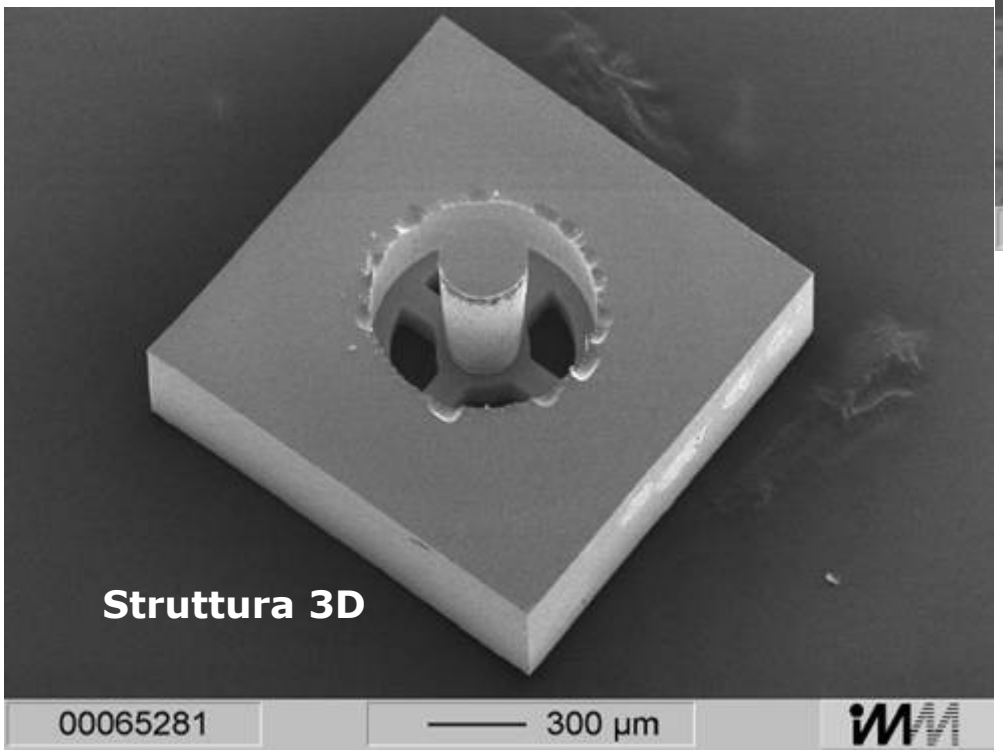


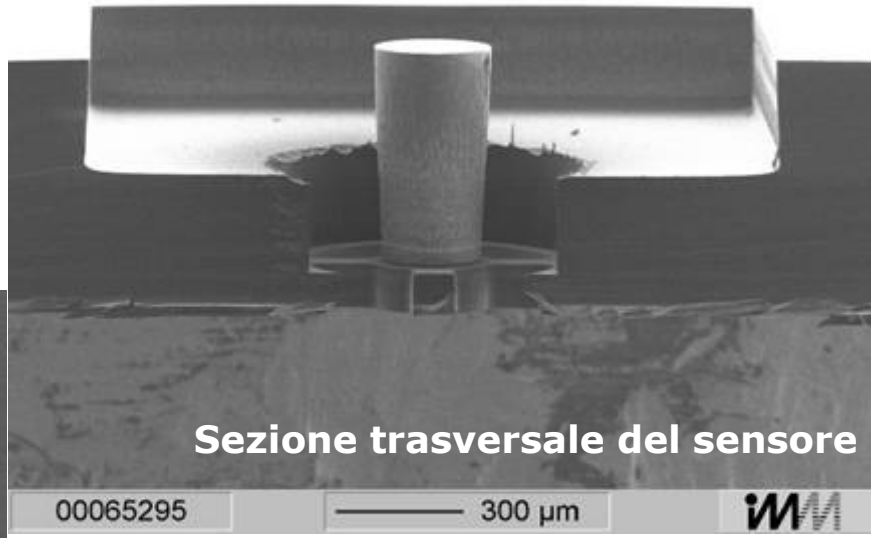
Dimensioni in µm



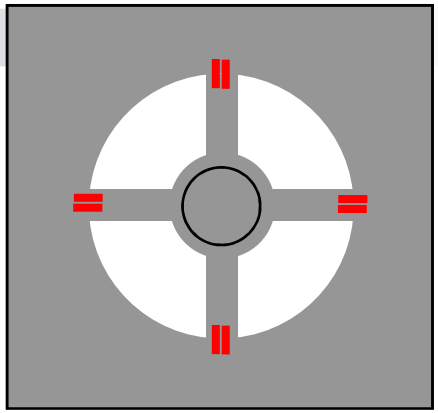
- Forma a croce, quattro braccia perpendicolari - alta sensibilità alle forze tangenziali
- Cilindro centrale per trasferire il carico alle braccia - blocco di silicio cilindrico integrato totalmente col resto della struttura

Struttura del sensore





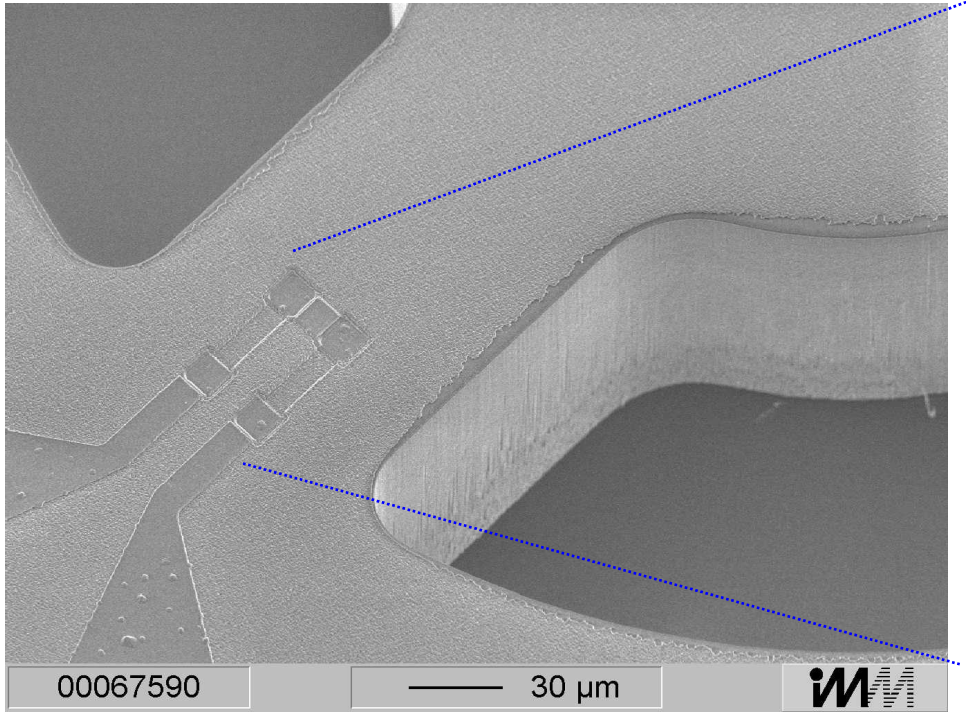
Piezoresistori

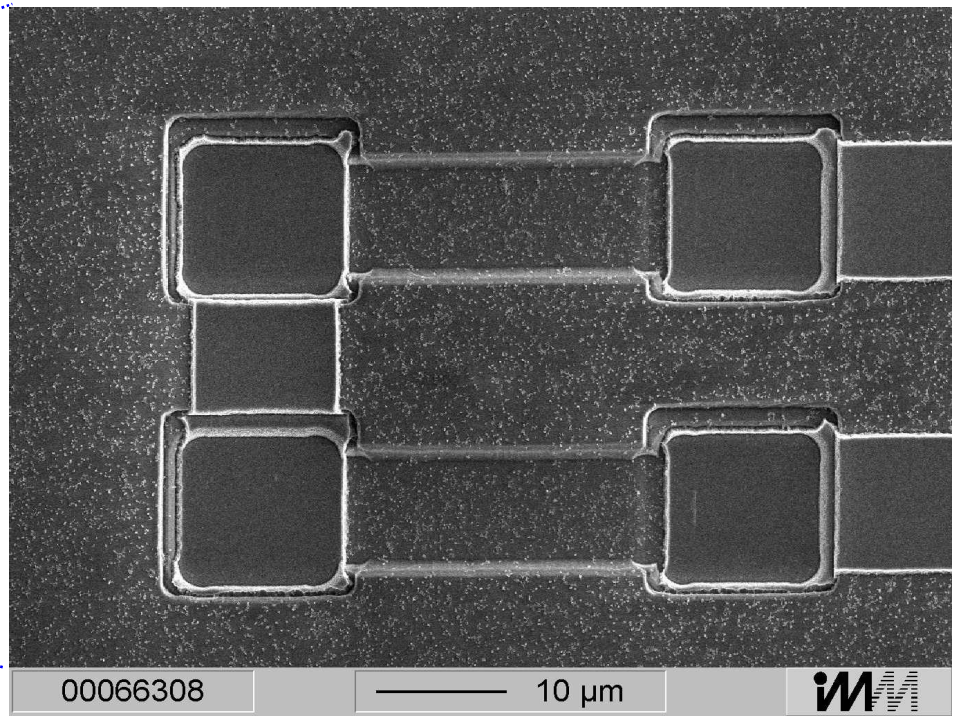


$$G = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \cancel{1+2\nu} + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$$

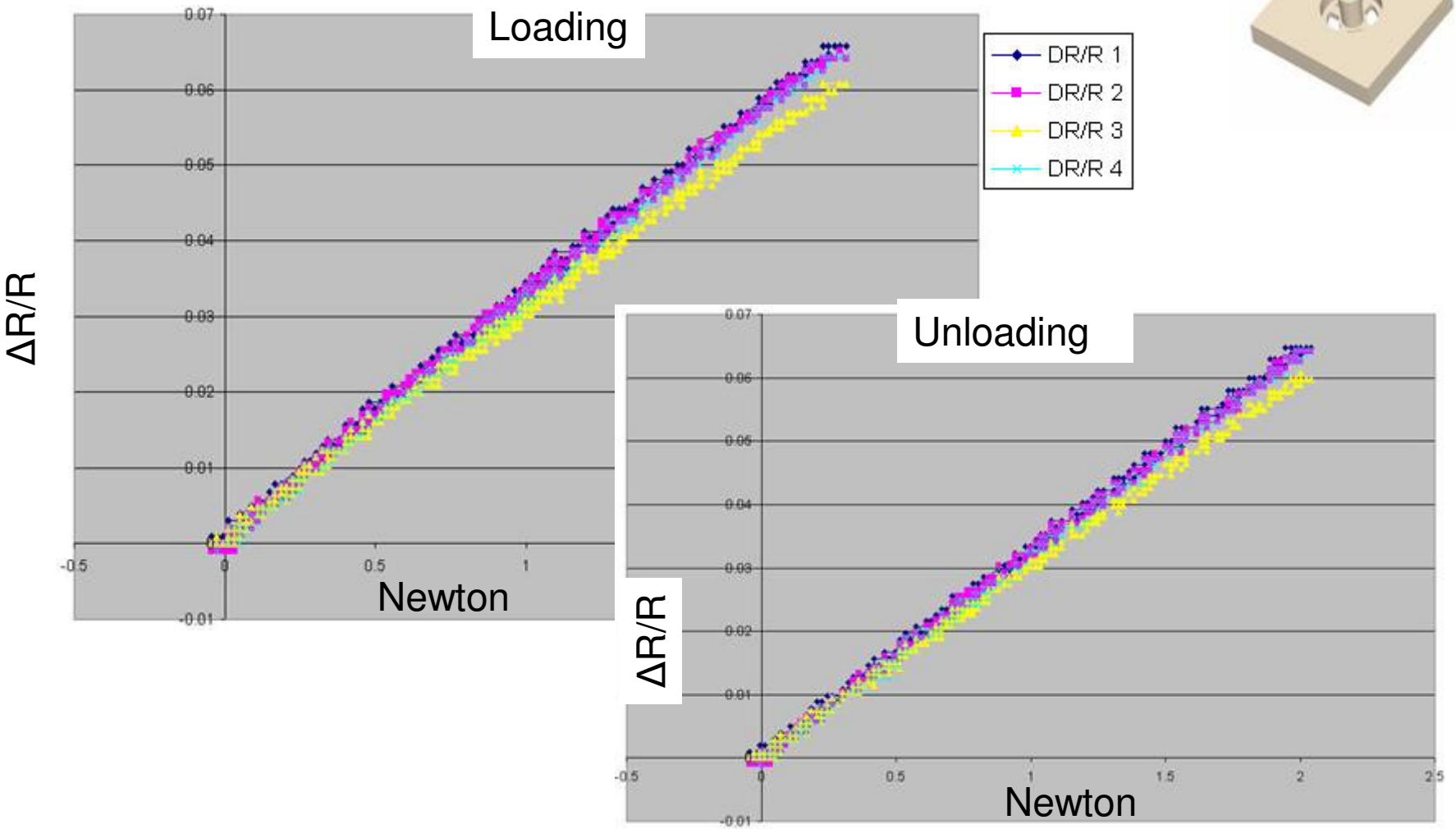
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\pi}{2}\sigma_l$$

Nei semiconduttori 1+2v trascurabile

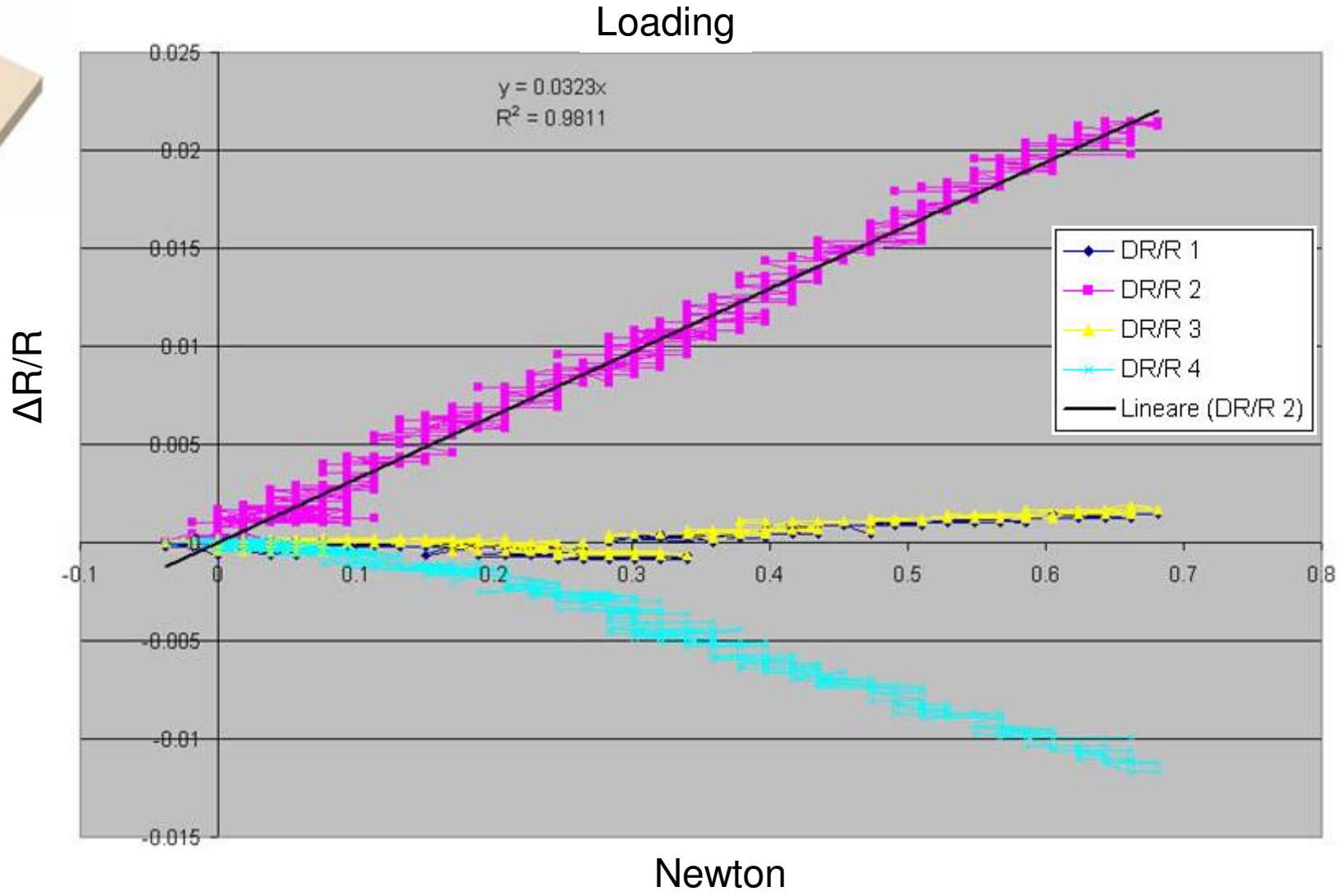




Risposta ΔR/R dei 4 piezoresistori rispetto a una forza normale

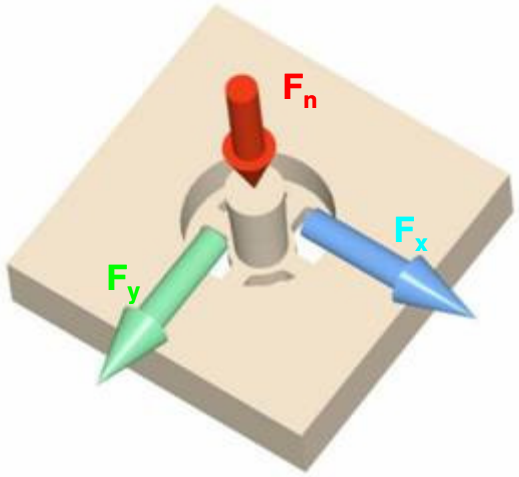


Risposta ΔR/R dei 4 piezoresistori rispetto a una forza tangenziale



Misura della forza

$$F = K\frac{\Delta R}{R}$$



F_n forza normale

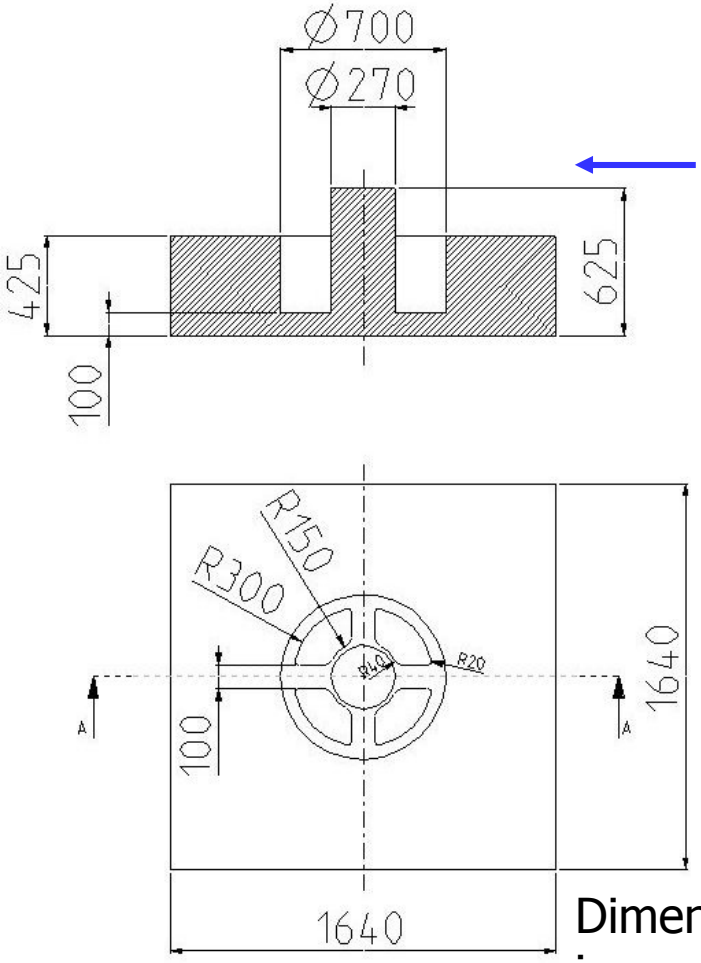
F_x e F_y componenti tangenziali

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.

$$K = \begin{pmatrix} -1.71 & 15.65 & -8.57 & -16.70 \\ -16.75 & 2.83 & 11.75 & 14.97 \\ 3.18 & 5.86 & 20.78 & 33.81 \end{pmatrix} N$$

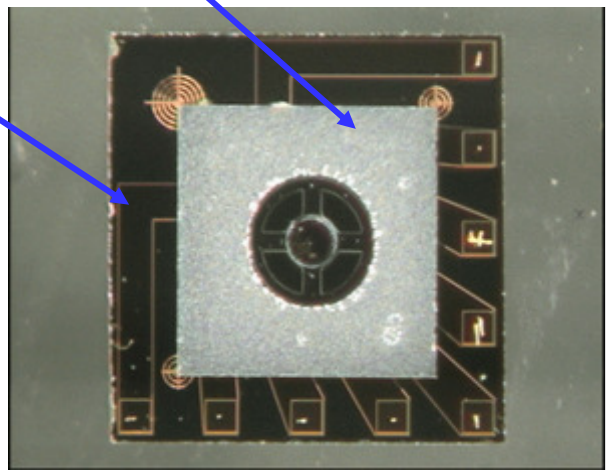
Dimensioni finali



Dimensioni in µm

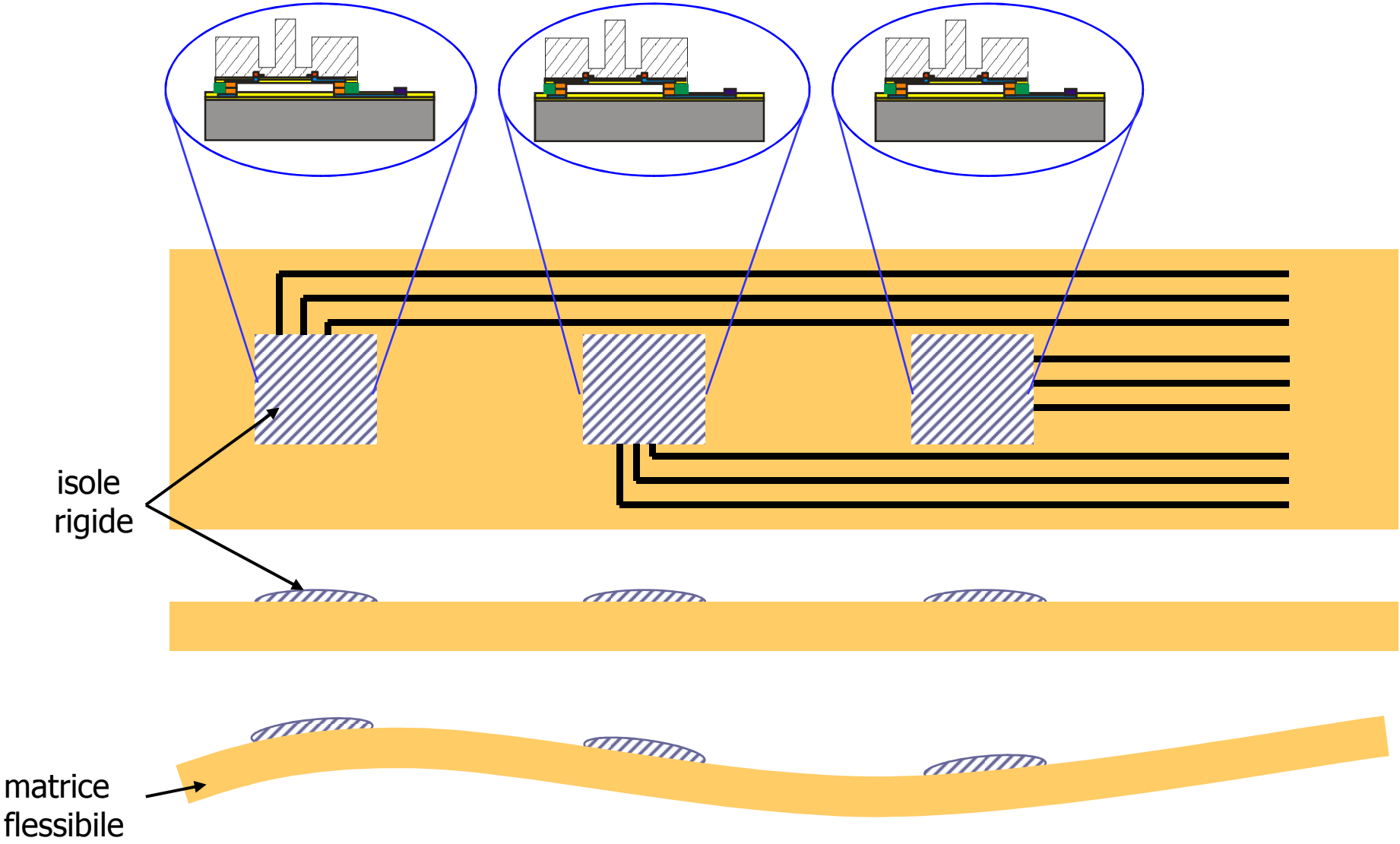
Chip A (Sensor Chip):
1,5 x 1,5 mm

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



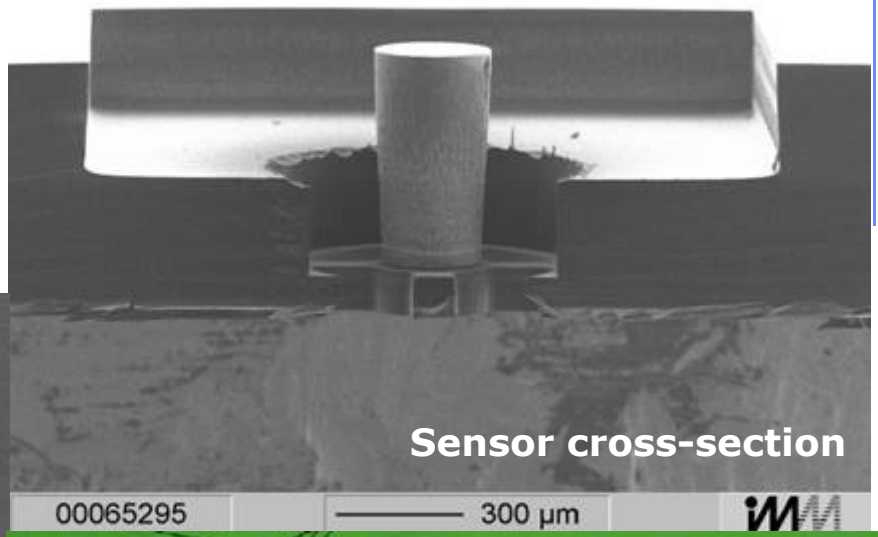
Dimensioni finali del sensore:
2300µm x 2300µm x 1300µm

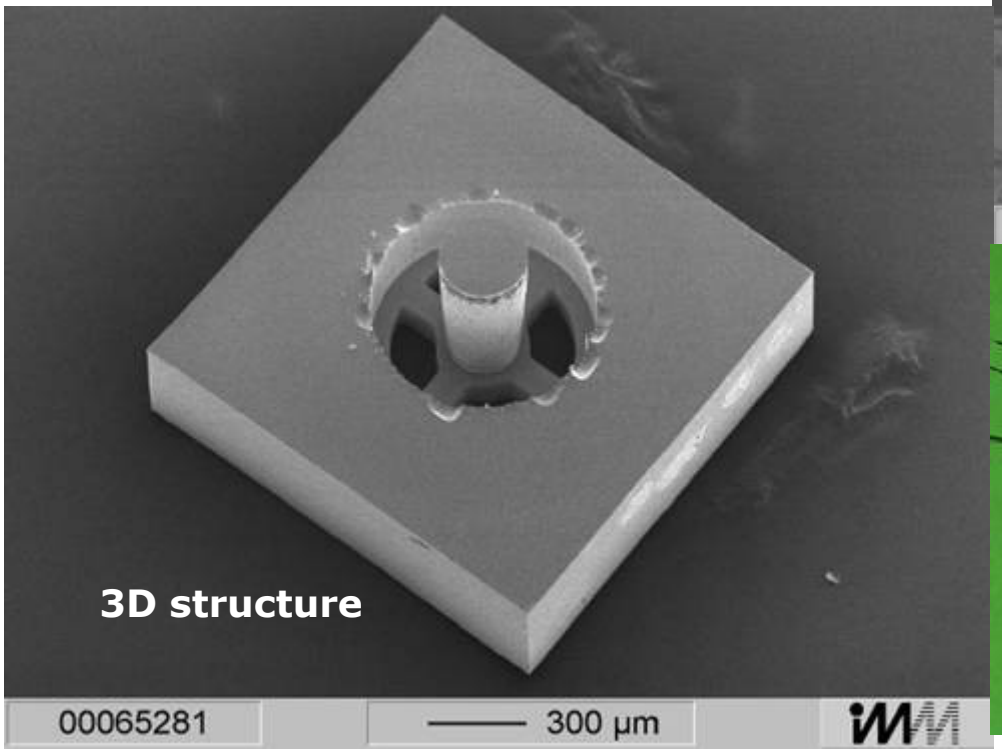
Possibile integrazione su una pelle flessibile

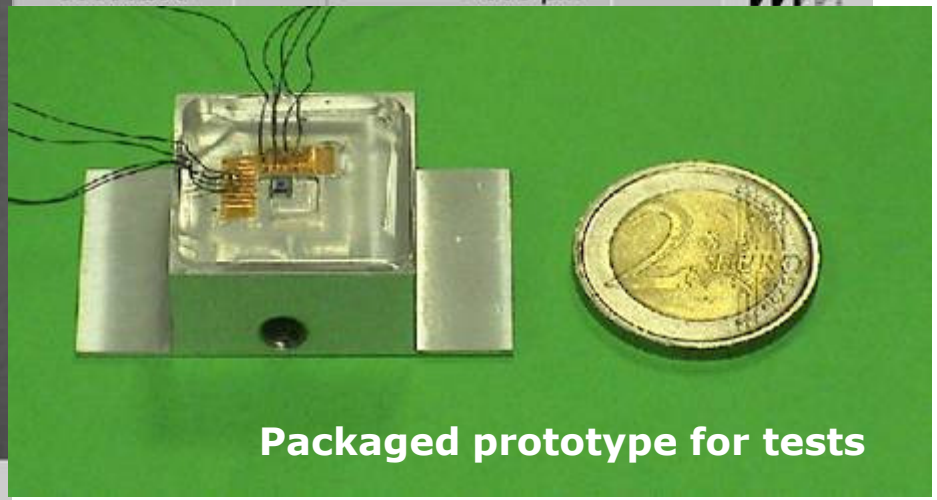


Work in progress for development of a smart skin

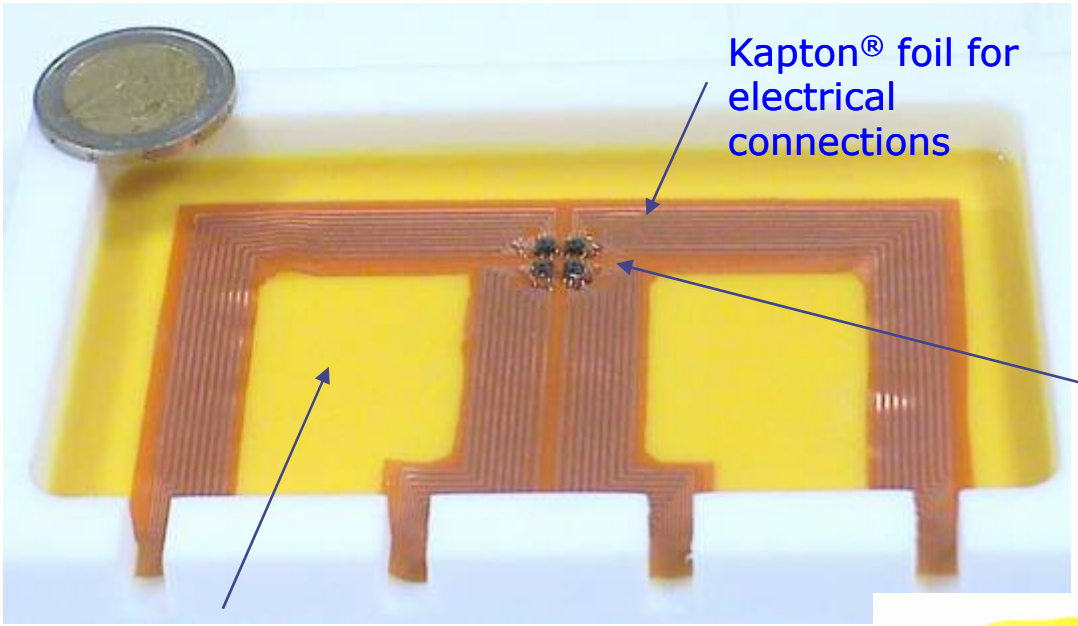
applied forces





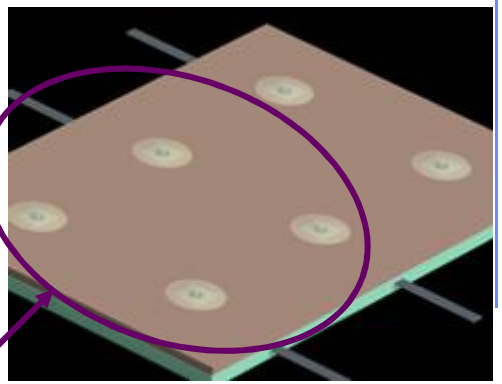


Work in progress for development of a smart skin

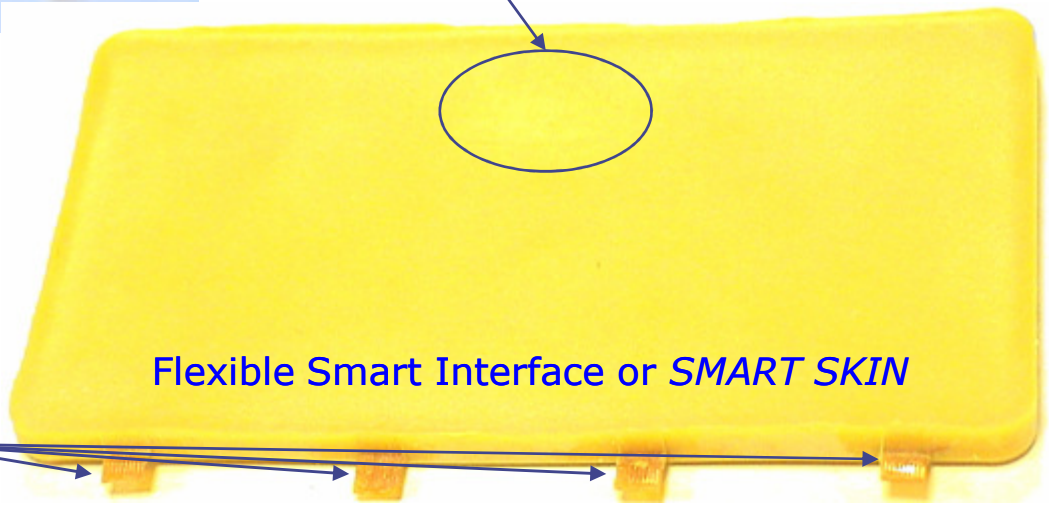


Kapton® foil for electrical connections

Soft polyurethane for circuit embedding



2 x 2 SENSOR ARRAY



Flexible Smart Interface or *SMART SKIN*

Electrical connections to the conditioning electronics

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	Groupings
Compliance Resilience Viscosity	Size Mass	Corner Edge Surface normal	Temperature Thermal conductivity Thermal diffusivity	Electrical conductivity Contact potential	Examples
✓	✓				Forces and torques transmitted between gripper and object
		✓			Image of area of contact between gripper and object
✓	✓	✓			Configuration of robot gripper
			✓		Thermal
				✓	Electrical

Parameters to be measured

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

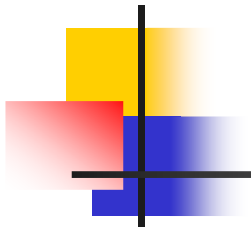
La distanza tra D1 e D2 è una misura della cedevolezza

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



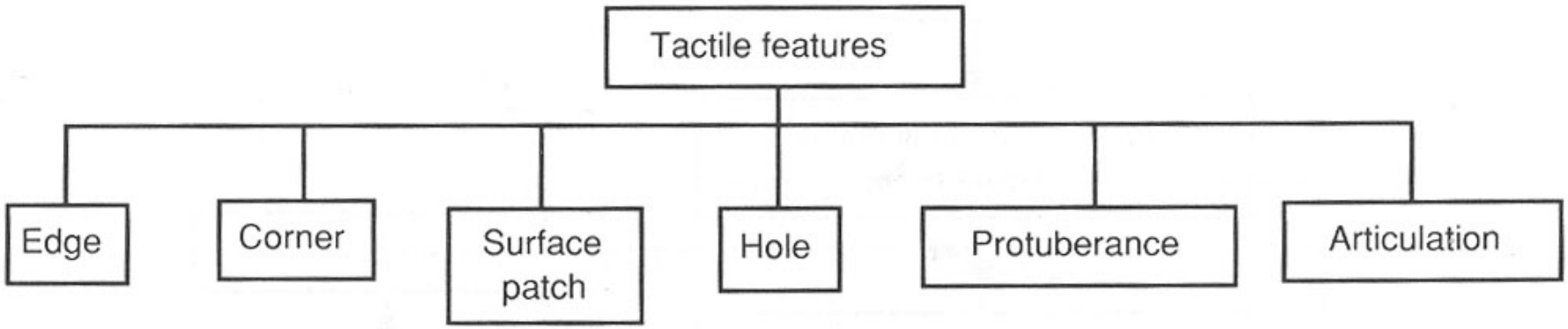
Elaborazione tattile

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

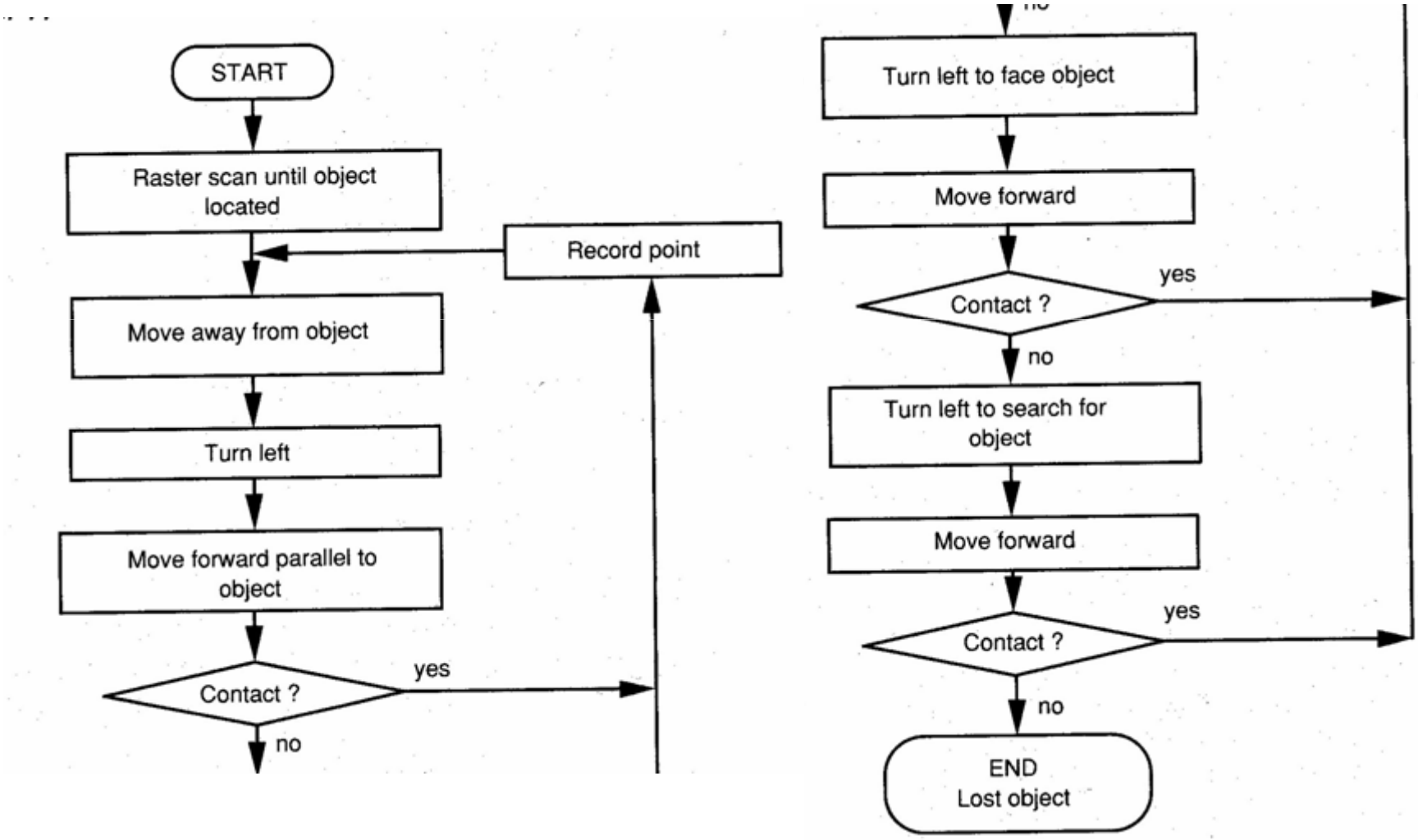
D2-D1 è una misura della viscosità

Caratteristiche tattili

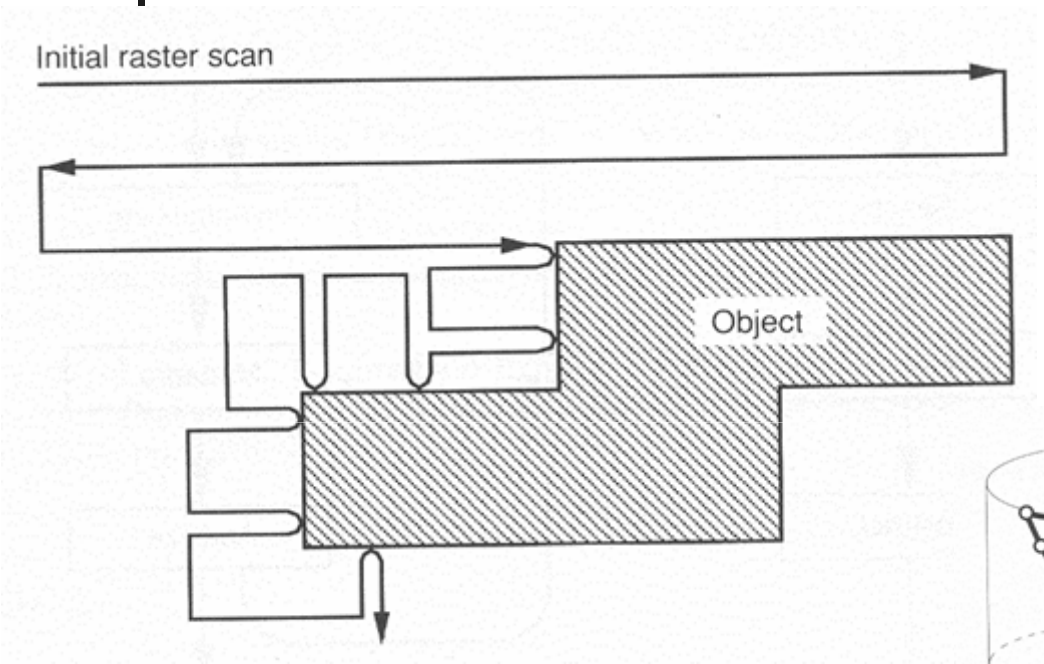


Ulteriori caratteristiche tattili di un oggetto possono essere ottenute mediante una esplorazione attiva condotta tramite opportuni algoritmi che prevedono lo spostamento del sensore (o dei sensori) in un intorno dell'oggetto alla ricerca delle "sensazioni" che permettano una classificazione

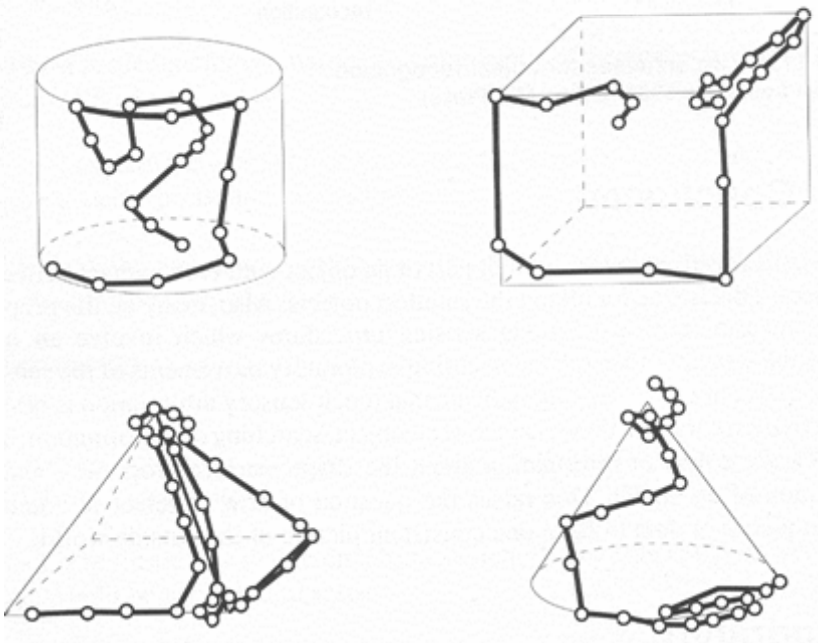
Elaborazione tattile: esempio di algoritmo di esplorazione della forma di un oggetto



Elaborazione tattile

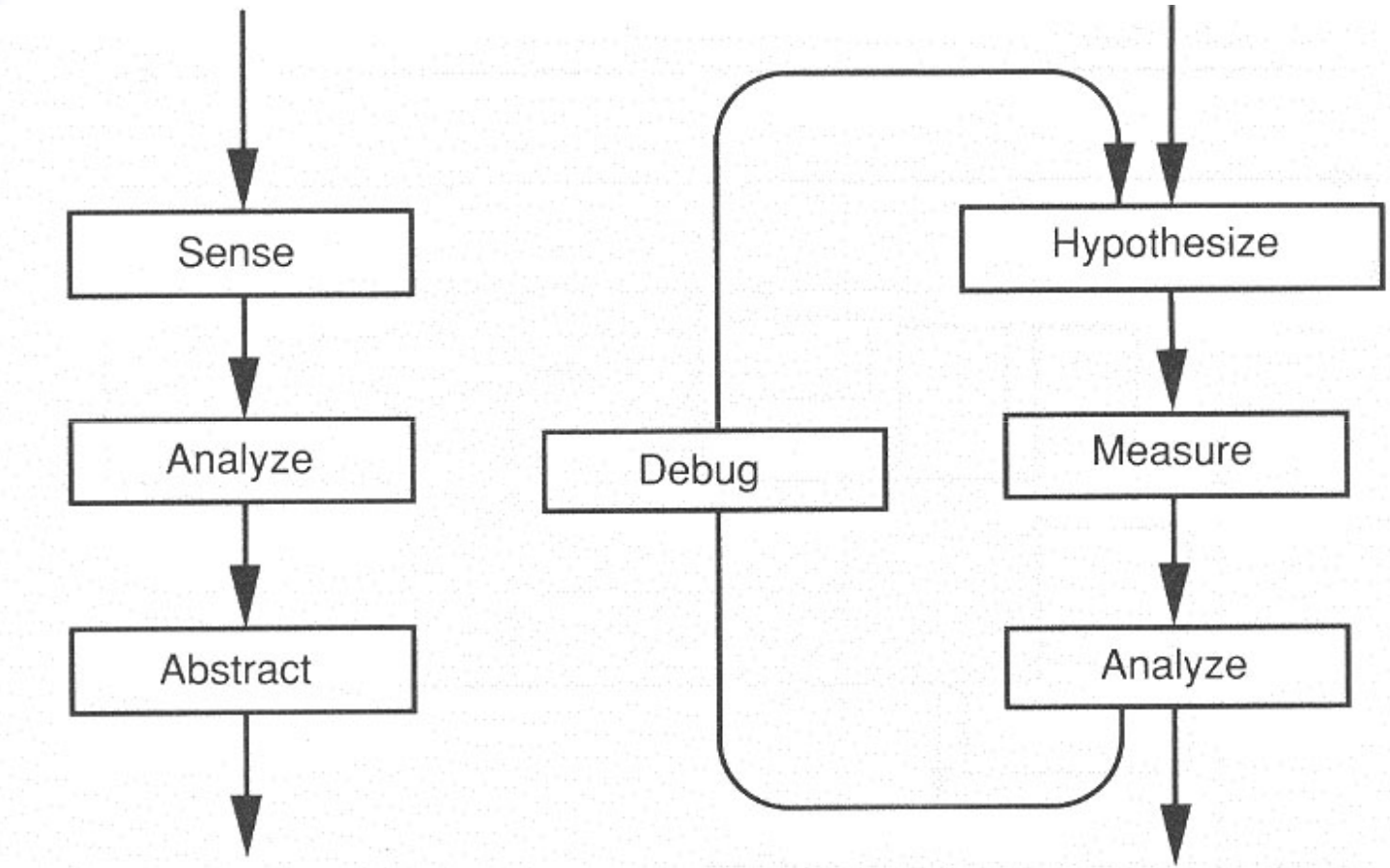


Schematizzazione dell'algoritmo esplorativo



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

Riconoscimento



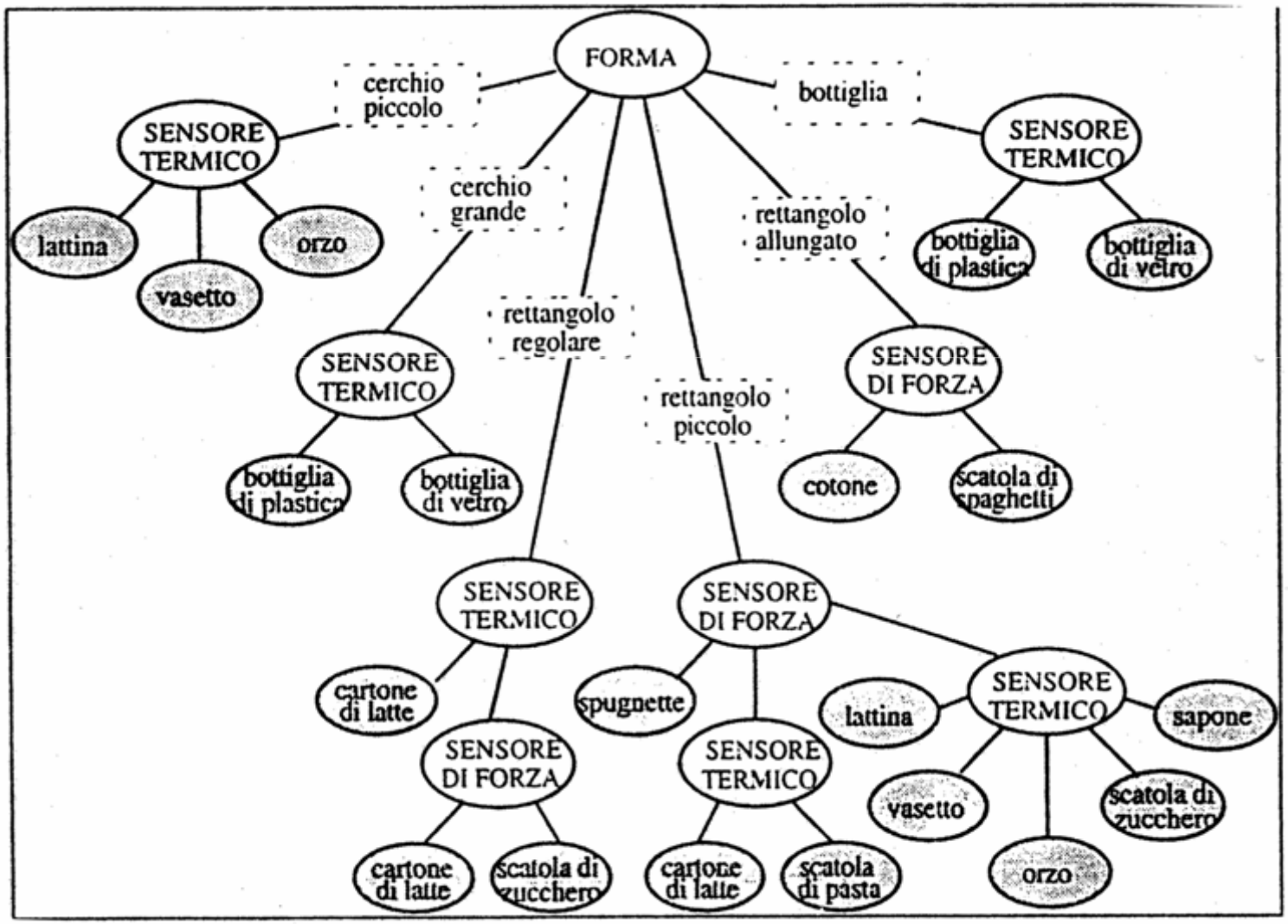
(a) Data-driven object recognition

(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