



---

## ***Corso di Robotica 1***

# **Componenti per la robotica: Sensori esteroceettivi**

Prof. Alessandro De Luca

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA  
E SISTEMISTICA ANTONIO RUBERTI



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Sommario

---

- sensori di forza
  - estensimetri e deformazione delle trasmissioni
  - sensore 6D di forza/coppia (F/T) al polso
  - RCC
- sensori di prossimità/distanza
  - infrarossi
  - a luce strutturata
  - ultrasuoni
  - laser
- visione
- esempi di dotazione sensoriale nei robot
- alcuni video con applicazioni



## Deformazione e forza/coppia

- informazione indiretta attraverso la misura della **deformazione** di un elemento elastico soggetto alla forza/coppia
- componente di base è l'estensimetro (*strain gauge*): sfrutta la variazione di resistenza  $R$  di un conduttore al variare della lunghezza  $L$  e della sezione  $S$

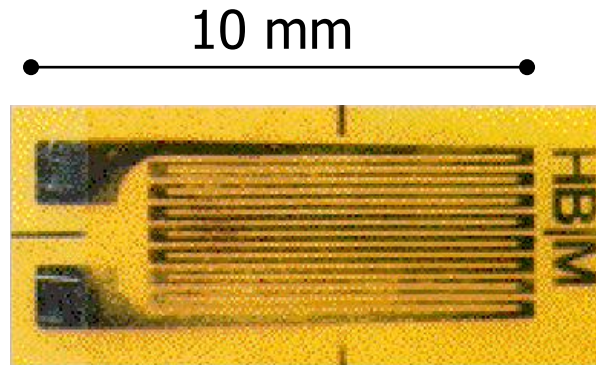
$$\frac{\partial R}{\partial L} > 0 \quad \frac{\partial R}{\partial S} < 0$$

$$\frac{\partial R}{\partial T} \text{ piccola}$$

↑  
temperatura



# Estensimetri

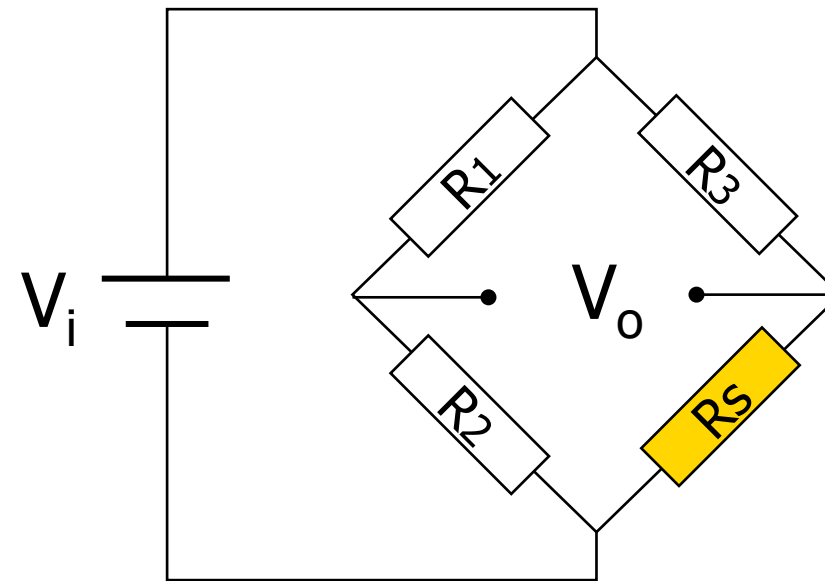


←→  
asse principale di misura

$$\text{Gauge-Factor} = GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

(tipicamente  $\approx 2$ )

se  $R_2$  ha la stessa dipendenza di  $R_S$  da  $T$ ,  
le variazioni termiche si compensano automaticamente

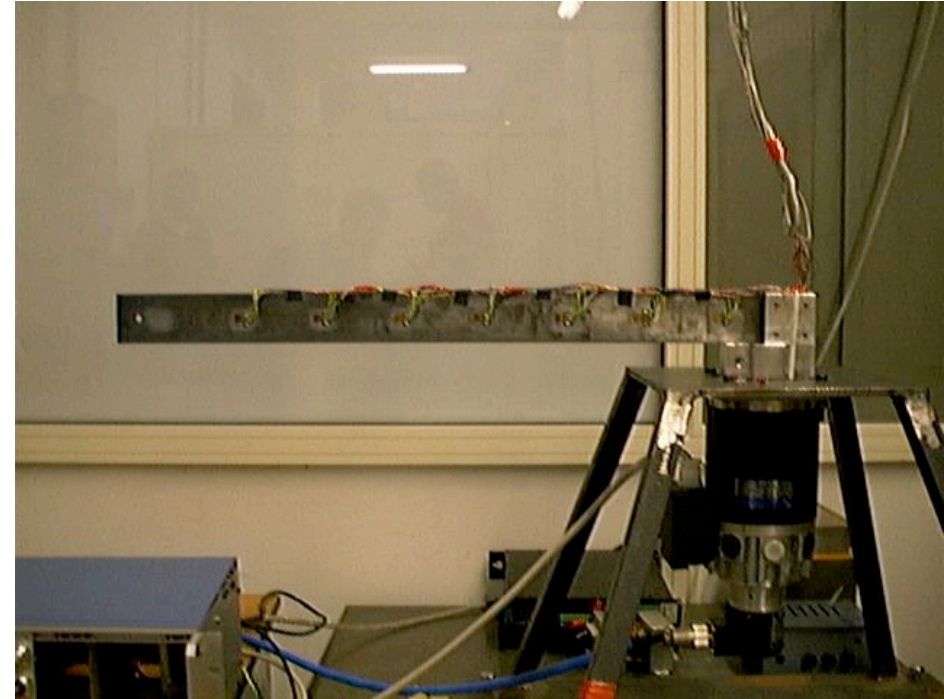
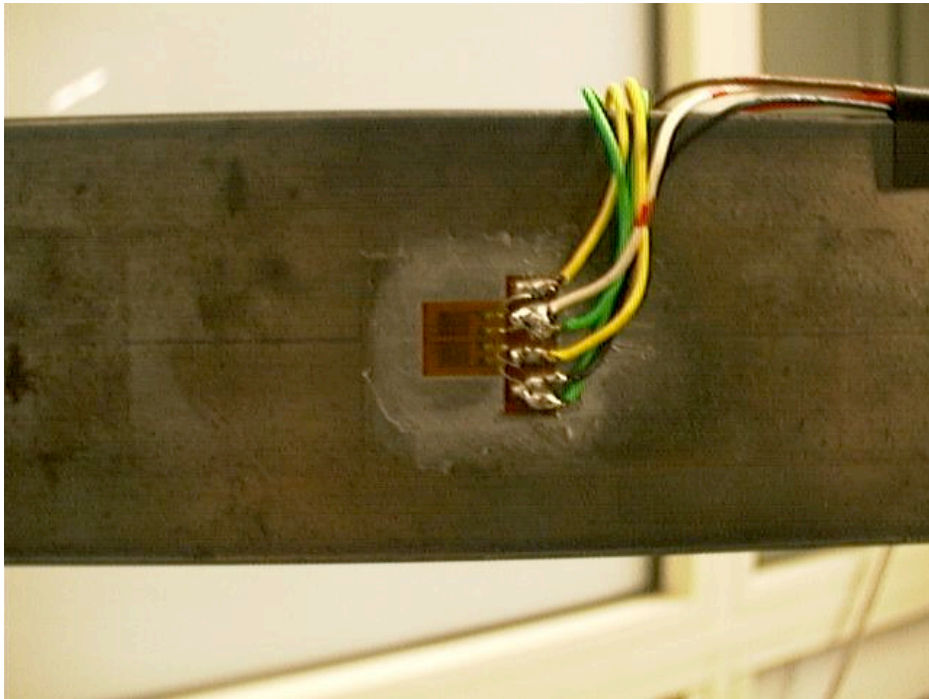


collegamento a ponte  
di Wheatstone

$$V_o = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_S}{R_3 + R_S} \right) V_i$$

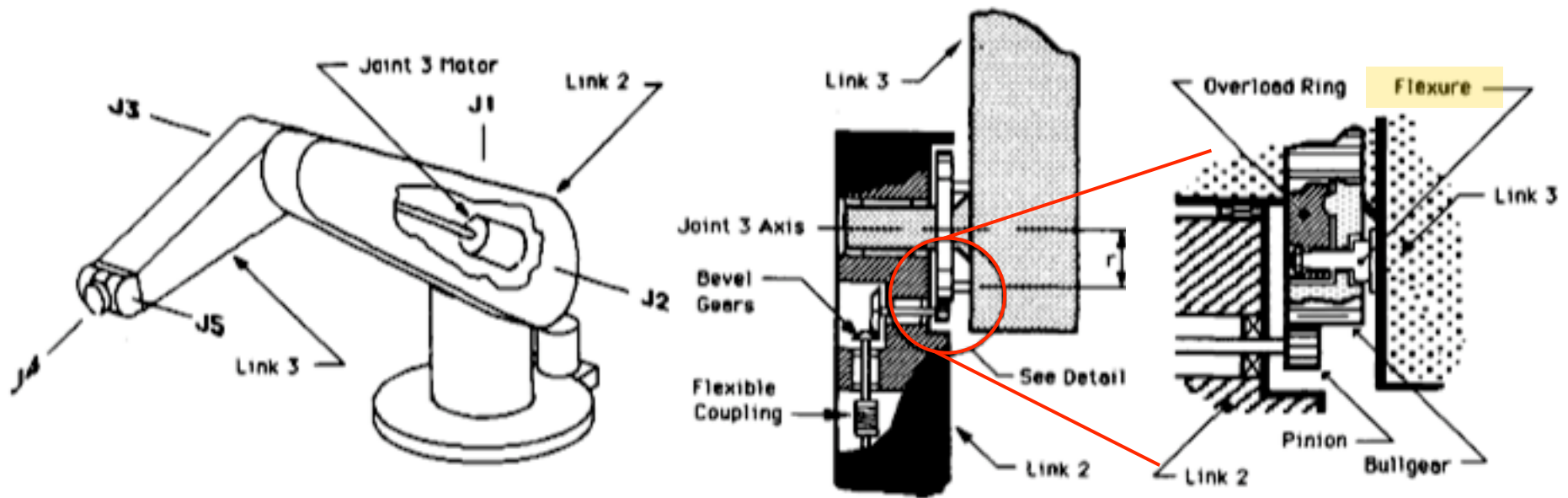


# Estensimetri per bracci flessibili



7 estensimetri montati per la misura della "curvatura" locale della lamina del braccio, soggetto a flessione (bending) durante il moto (questo è un uso **proprioceettivo** del sensore)

# Sensore di coppia al giunto



estensimetro montato per la misura della “deformazione” dell’asse di trasmissione del giunto #3 (gomito) del robot PUMA 500 (questo è un uso **proprioceettivo** del sensore)



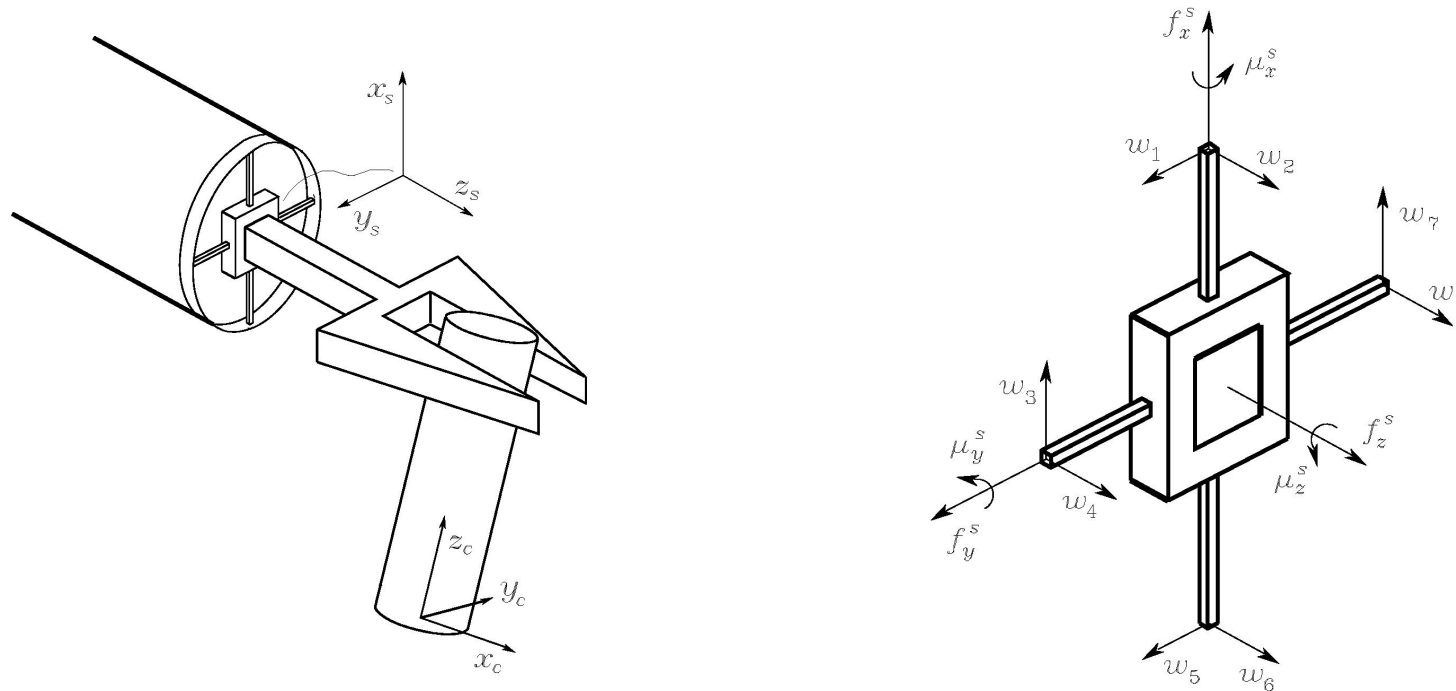
# Sensore di forza/coppia al polso

---

- struttura (esternamente di forma cilindrica) interposta fra ultimo braccio (link) e organo terminale del robot
- connessione realizzata attraverso un certo numero di elementi deformabili sotto l'azione di forza e coppia
- per ogni possibile direzione di forza/coppia deve esserci un elemento che si deforma in modo apprezzabile
- poiché un "disaccoppiamento" perfetto non può essere ottenuto, serve un numero  $N > 6$  di elementi deformabili
- su ogni elemento è incollata una coppia di estensimetri, per ogni direzione rilevante di deformazione, che si deformano in modo opposto (es. in trazione/compressione)



# Configurazione a croce di Malta



- diametri  $\approx 10$  cm
- altezza  $\approx 5$  cm
- (50–500) N (risoluzione 0.1%)
- (5–70) Nm (risoluzione 0.05%)
- frequenza d'uscita  $\approx 1$  KHz

- 4 elementi deformabili
- estensimetri montati a coppie su facce opposte di ogni elemento (8 coppie)
- elementi di ogni coppia sono adiacenti nello stesso ponte di Wheatstone



# Sensore 6D di forza/coppia

- serie di modelli ATI

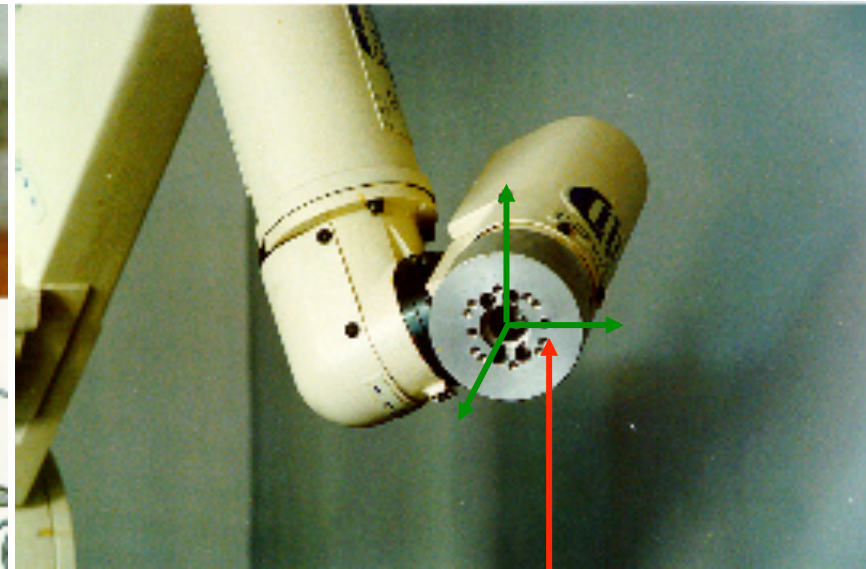
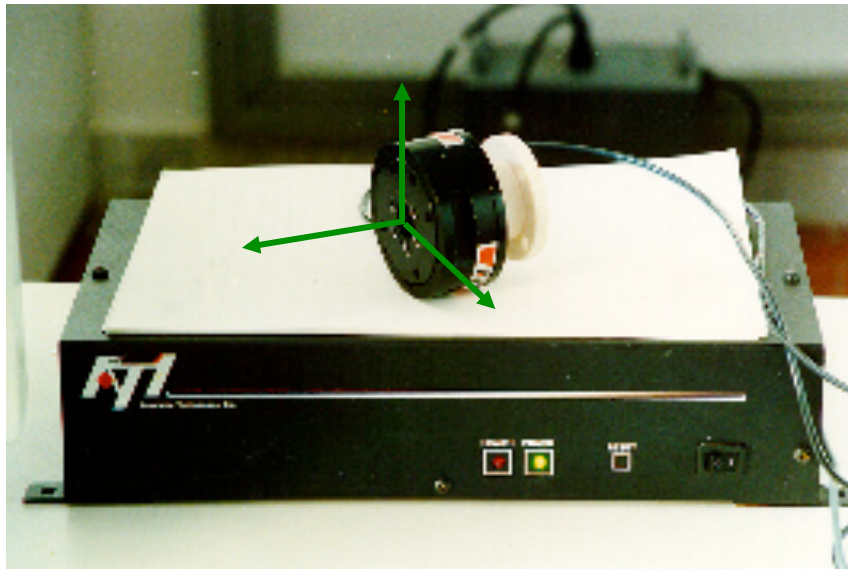


Model	Max Fx,Fy*	Max Tx,Ty*	Weight**	Diameter**	Height**
Nano17	±50 N	±500 N-mm	0.0091 kg	17 mm	14 mm
Nano25	±250 N	±6 N-m	0.064 kg	25 mm	22 mm
Nano43	±36 N	±500 N-mm	0.041 kg	43 mm	11 mm
Mini40	±80 N	±4 N-m	0.05 kg	40 mm	12 mm
Mini45	±580 N	±20 N-m	0.091 kg	45 mm	16 mm
Gamma	±130 N	±10 N-m	0.25 kg	75 mm	33 mm
Delta	±660 N	±60 N-m	0.91 kg	94 mm	33 mm
Theta	±2500 N	±400 N-m	5 kg	150 mm	61 mm
Omega160	±2500 N	±400 N-m	2.7 kg	160 mm	56 mm
Omega190	±7200 N	±1400 N-m	6.4 kg	190 mm	56 mm



# Sensore 6D di forza/coppia

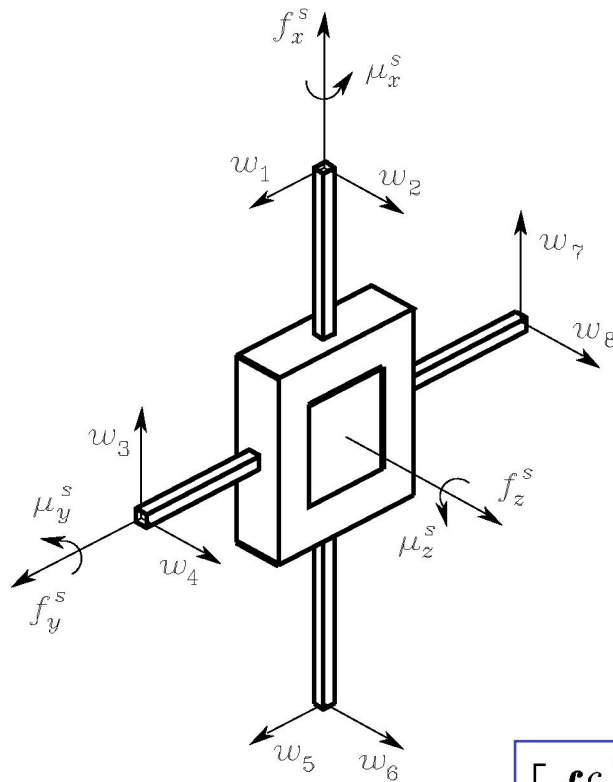
- elettronica di processamento e zona di montaggio sul robot (Comau Smart 3, cinematica 6R)



flangia finale  
(sul link 6 del manipolatore)



# Calibrazione del sensore di forza/coppia



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

forza/coppia nella terna  
solidale al sensore

matrice di calibrazione

uscite dei ponti di  
Wheatstone

$$\begin{bmatrix} f_c^c \\ \mu_c^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^c & O \\ S(r_{cs}^c)R_s^c & R_s^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_s^s \\ \mu_s^s \end{bmatrix}$$

trasformazione dalla terna  
del sensore a quella del carico/contatto



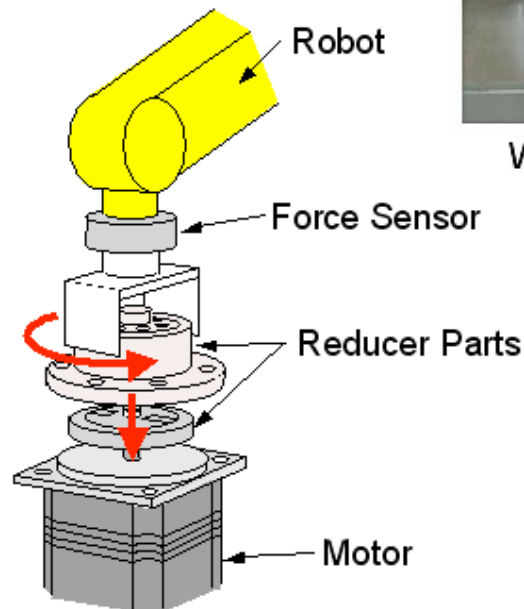
# Usi tipici del sensore di forza/coppia



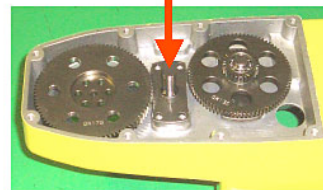
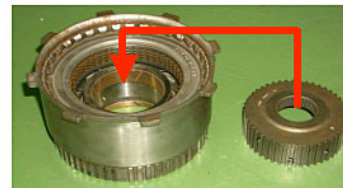
Washstand



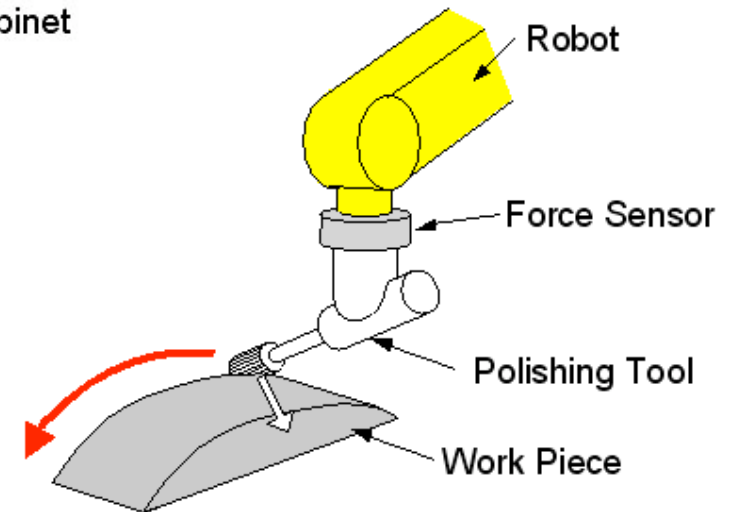
Metal Cabinet



Phase matching by force sensing



Gear Parts



Following with constant pushing force



## Struttura passiva RCC

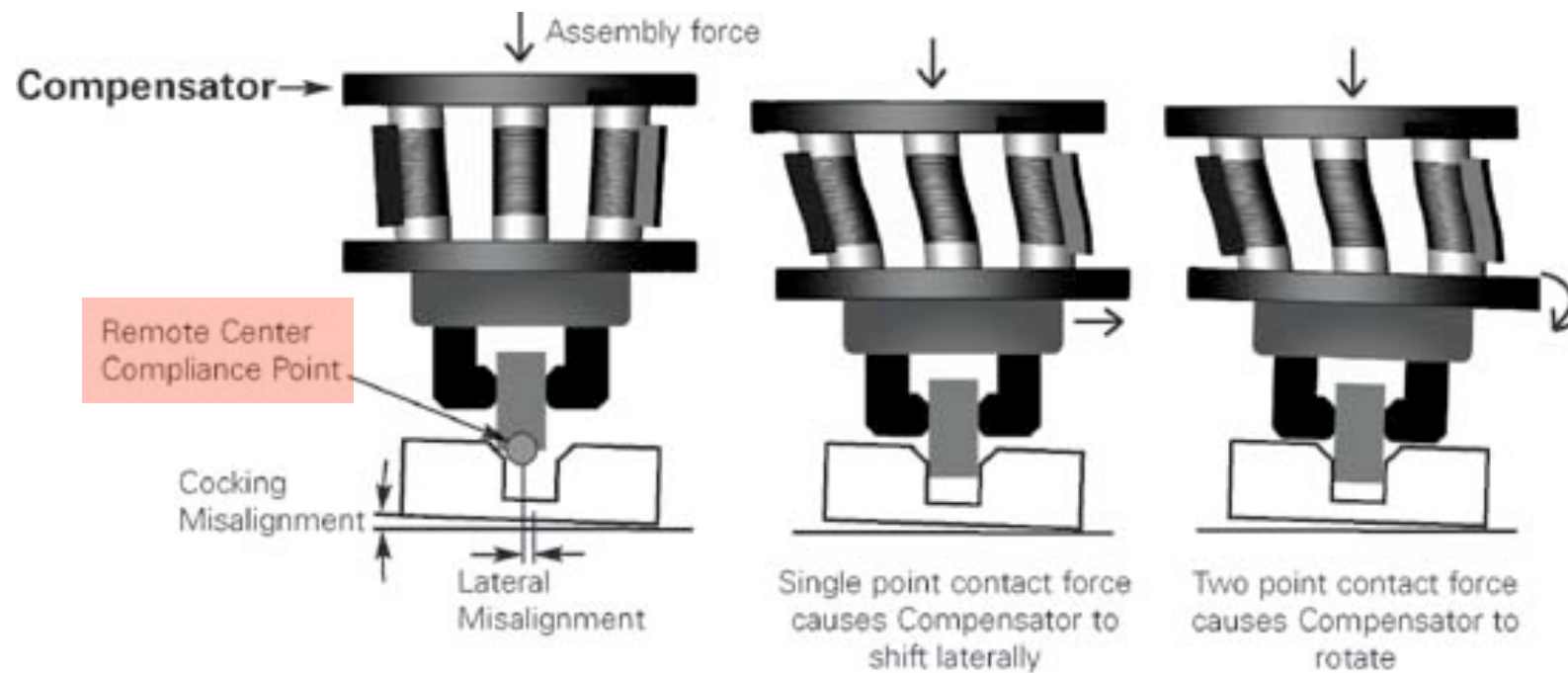
---

- RCC = Remote Center of Compliance
- si posiziona al polso per dare "cedevolezza" passiva all'organo terminale (con robot fermo), in risposta a forze e coppie applicate nel contatto con l'ambiente
- sussiste una risposta "disaccoppiata" di spostamenti lineari/angolari **se** il contatto avviene nel punto RCC



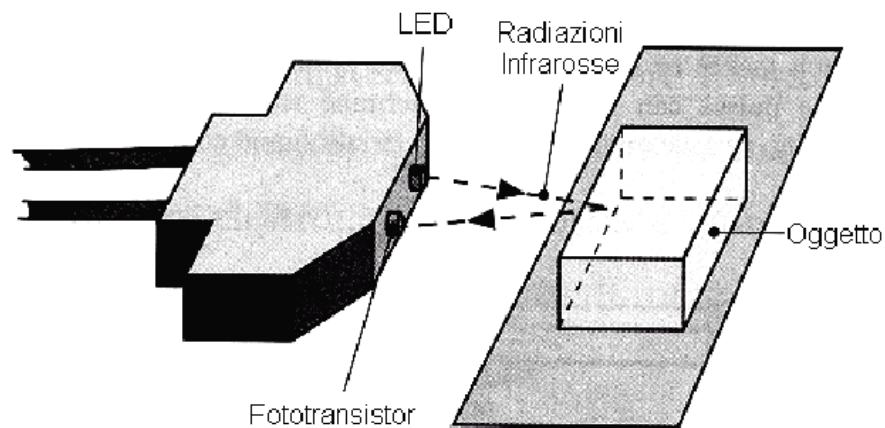


# Assemblaggio con RCC



# Sensori di prossimità/distanza - 1

- **infrarossi:** sfruttano un raggio di luce emesso da una sorgente di luce (LED) captato da un rilevatore (fototransistor), dopo essere stato riflesso da un oggetto
- l'intensità ricevuta è proporzionale alla distanza
- campo tipico: 4-30 cm oppure 20-150 cm
- costo: < 20 Euro



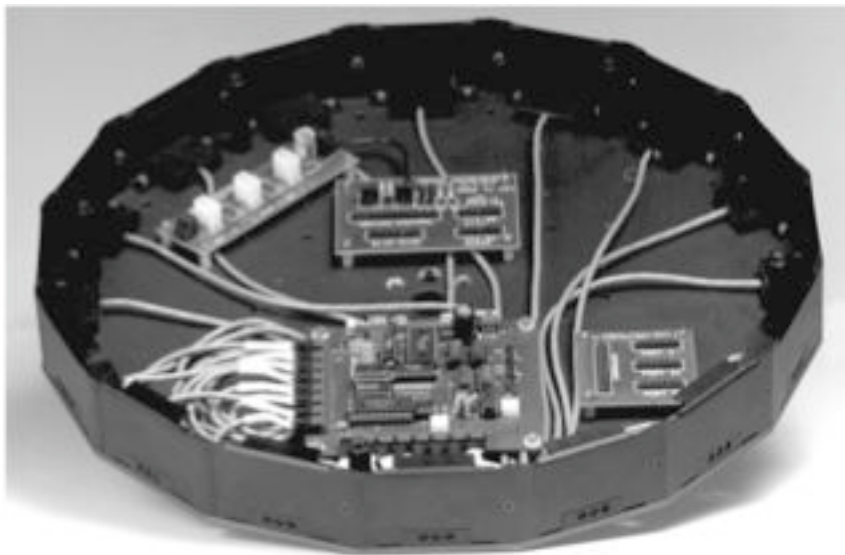
sensore IR SHARP  
GP2



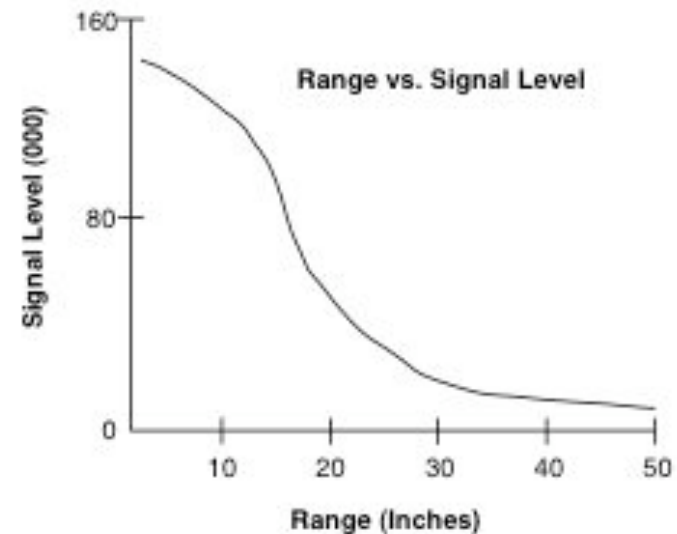


# Sensore a infrarossi

esempio: Sensus 300  
su robot mobile Nomad 200  
(potenza complessiva: 500mA a 12V)



anello con 16 sensori IR

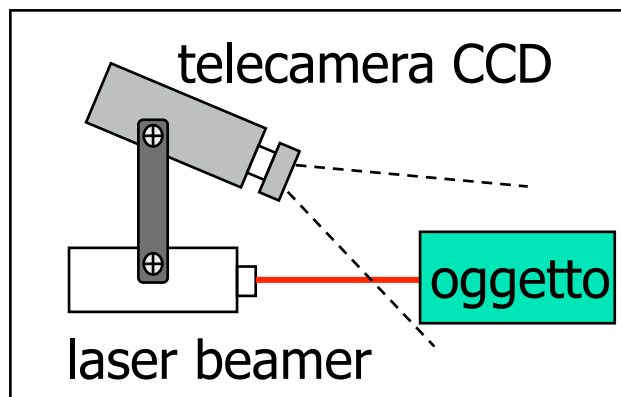


variazione del livello del segnale ricevuto  
in funzione della distanza

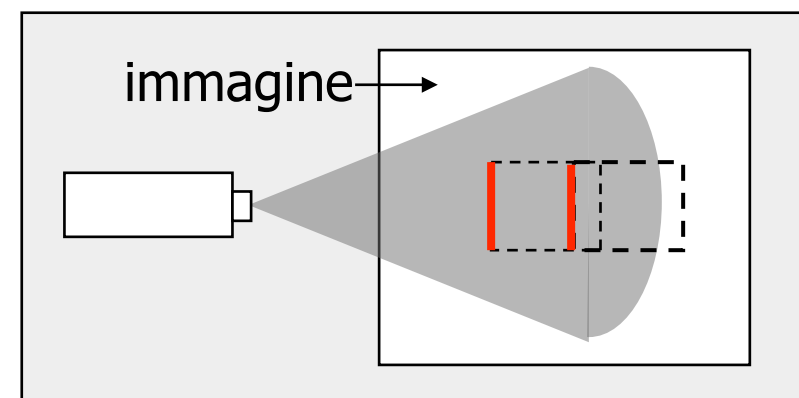


## Sensori di prossimità/distanza - 2

- **luce strutturata:** un laser (sorgente di luce coerente) proietta un piano di luce rossa, la cui intersezione con gli oggetti circostanti viene rilevata da una telecamera
- la posizione dei pixel rossi nell'immagine è legata alla distanza dell'oggetto dal sensore



vista laterale

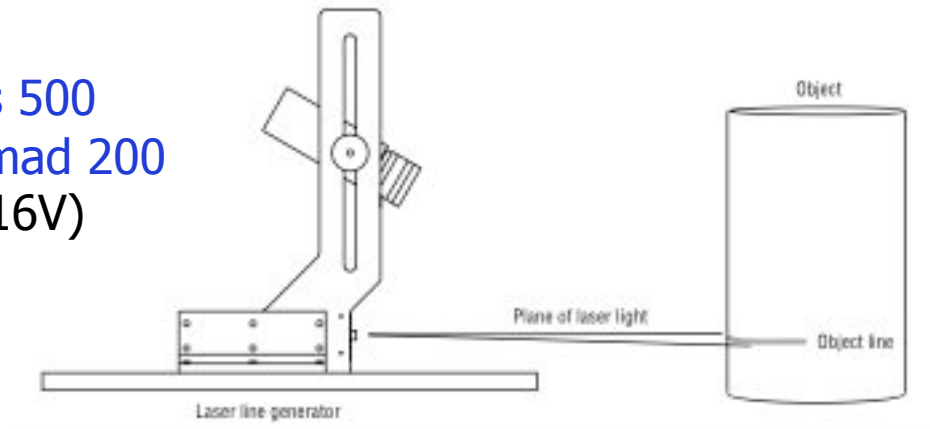


vista dall'alto

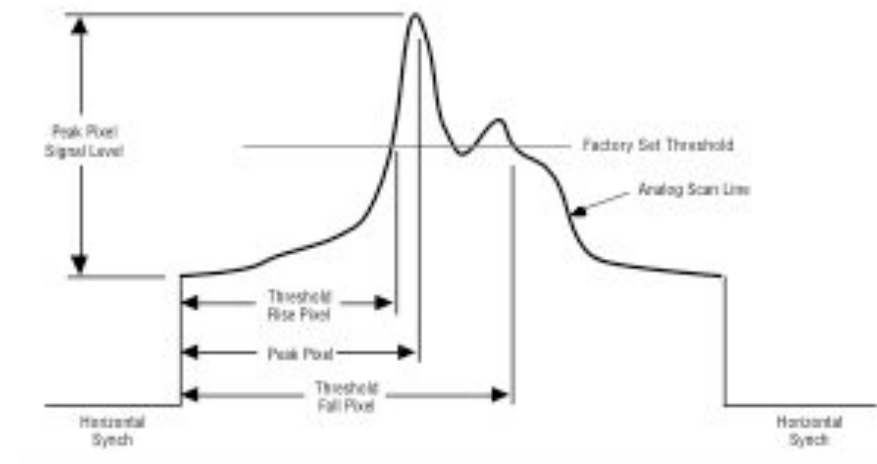
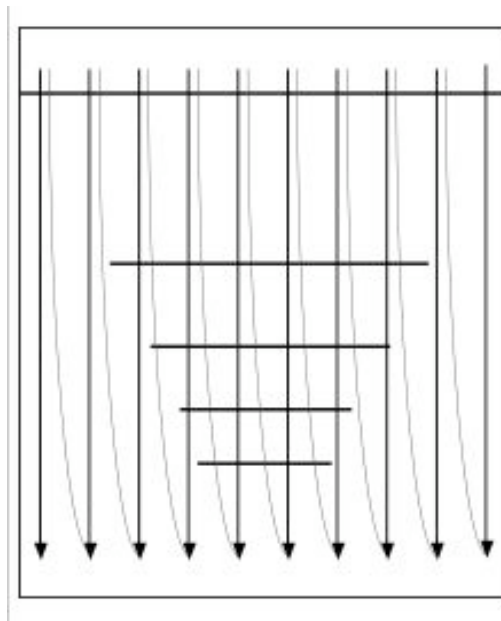


# Sensore a luce strutturata

esempio: Sensus 500  
su robot mobile Nomad 200  
(potenza: 2A a 16V)



camera CCD  
510x490 pixels  
(ruotata di 90°  
rispetto alle  
480 scan lines)



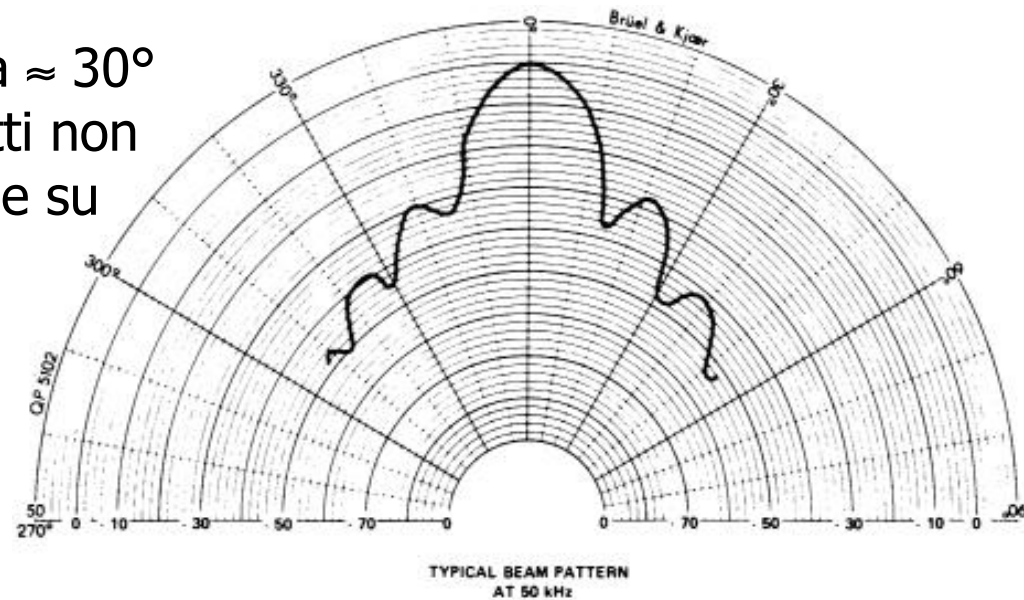
segnale analogico su una scan line  
con livello di soglia (threshold)



## Sensori di prossimità/distanza - 3

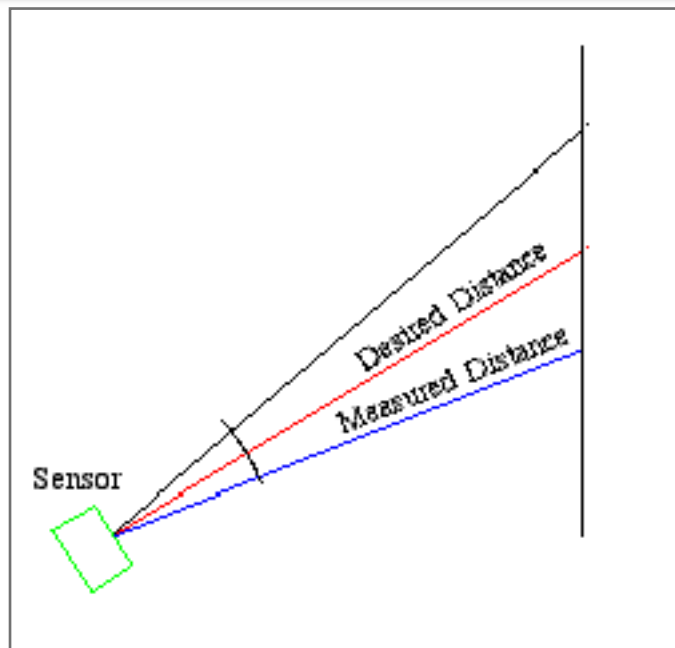
- **ultrasuoni:** utilizzano la riflessione di onde ad ultrasuoni (>20 kHz, tipicamente 50 kHz), generate da un materiale piezoelettrico stimolato da una tensione alternata ( $V \sin \omega t$ )
- la distanza è proporzionale al tempo di volo (TOF) per il percorso sensore-oggetto-sensore

angolo di propagazione dell'onda  $\approx 30^\circ$   
permette di rilevare anche oggetti non frontali (ma con indeterminazione su esatta posizione angolare, lobi energetici)

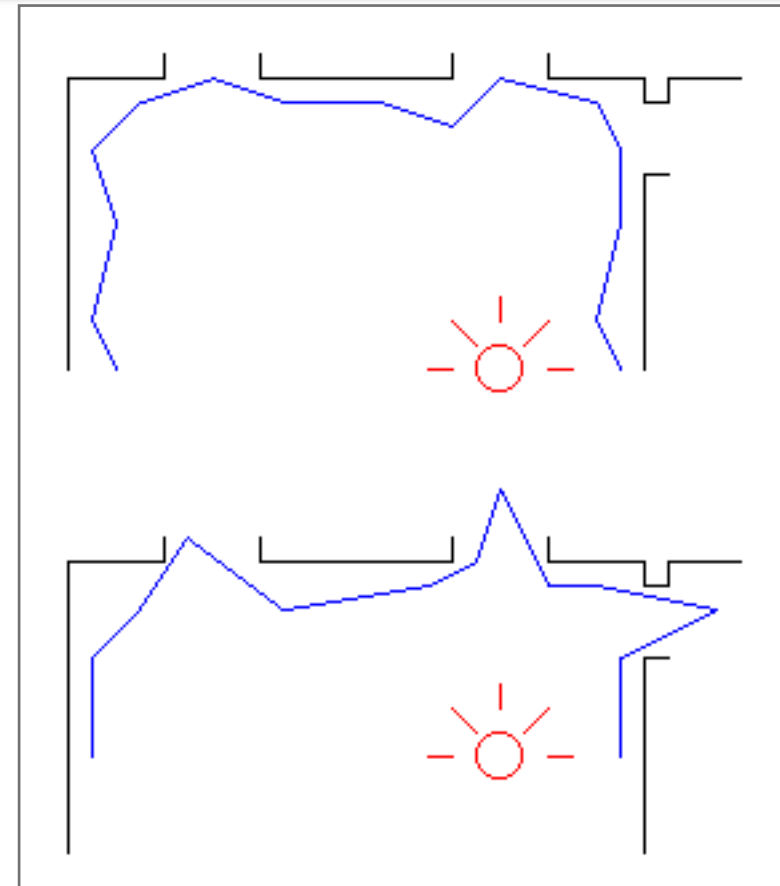


# Sensore a ultrasuoni

alcune problematiche legate all'angolo di propagazione dell'onda

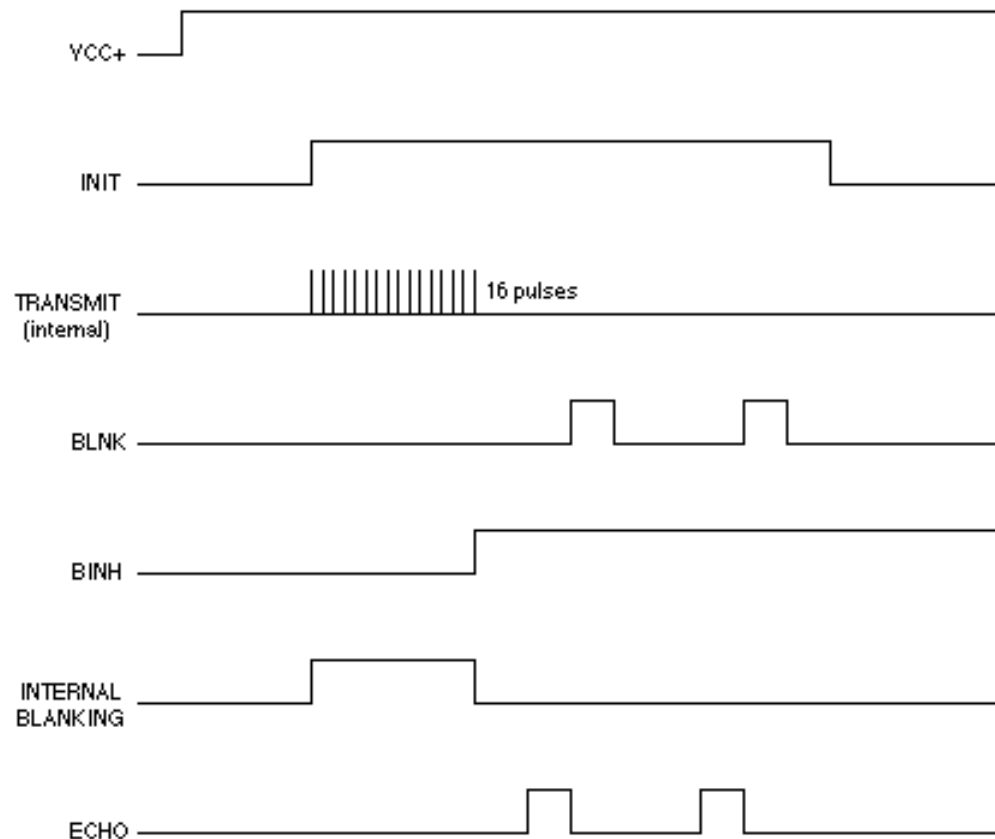


riflessioni multiple  
superfici assorbenti  
superfici speculari (vetri)





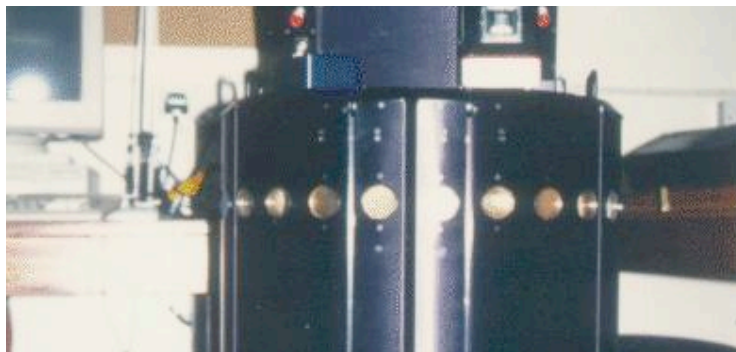
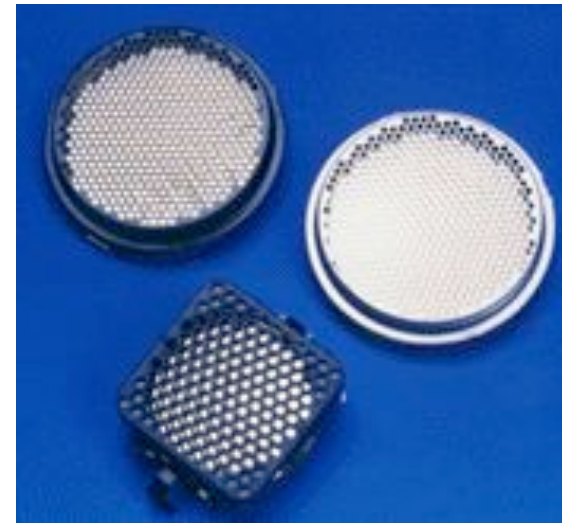
# Limitazioni di range con ultrasuoni



- durante la trasmissione di impulsi sonori la ricezione è disabilitata, perché l'interferenza tra trasmettitore e ricevitore potrebbe dare false letture
- lo stesso si fa dopo la ricezione di un'eco, per non ricevere eco multiple dallo stesso oggetto
- questo limita la distanza minima che può essere rilevata ( $> 0.5$  m)
- a causa dell'angolo di trasmissione, l'energia dell'onda diminuisce con  $d^2$
- per compensare tale effetto, il guadagno del ricevitore viene aumentato progressivamente
- max distanza rilevabile  $\approx 6.5$  m

# Sensore a ultrasuoni Polaroid

- “pacchetto” completo con transceiver e circuiteria
- 3.5 ms di TOF per un ostacolo frontale a 60 cm di distanza
- range: 50 cm - 2.5 m
- costo: < 40 Euro
- tipica disposizione circolare con 16-32 sensori



Polaroid USP3



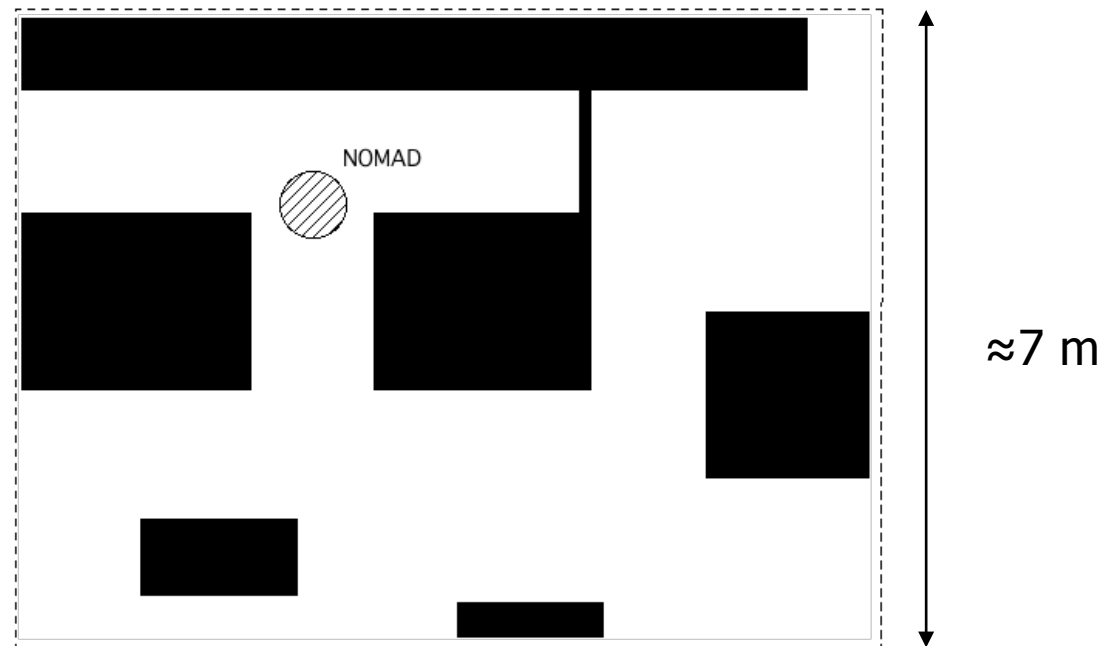
Migatron RPS 409





# Navigazione con sensori a ultrasuoni

- Nomad 200 con (tra gli altri) 16 sensori a ultrasuoni

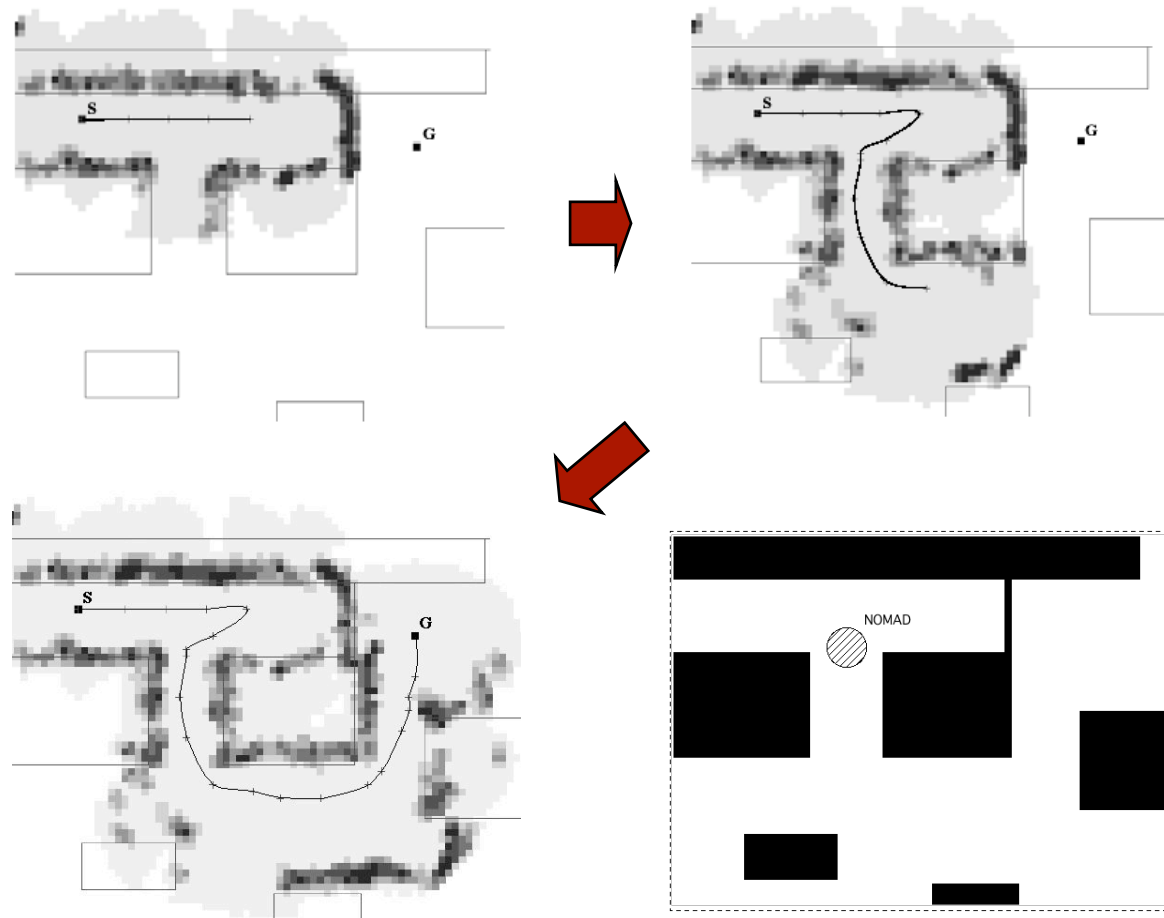


Vista del robot e mappa dell'ex Laboratorio di Robotica DIS, Via Eudossiana 18  
(la mappa è inizialmente non nota al robot)



# Navigazione con sensori a ultrasuoni

- mappa a griglia (unit=10 cm) pesando dati successivi dei sensori US mediante **logica fuzzy**; pianificazione "aggressiva" con algoritmo **A\*** di ricerca su grafo; navigazione **reattiva** con US per evitare ostacoli imprevisti



confronto con  
mappa vera



# Sensore laser scanner

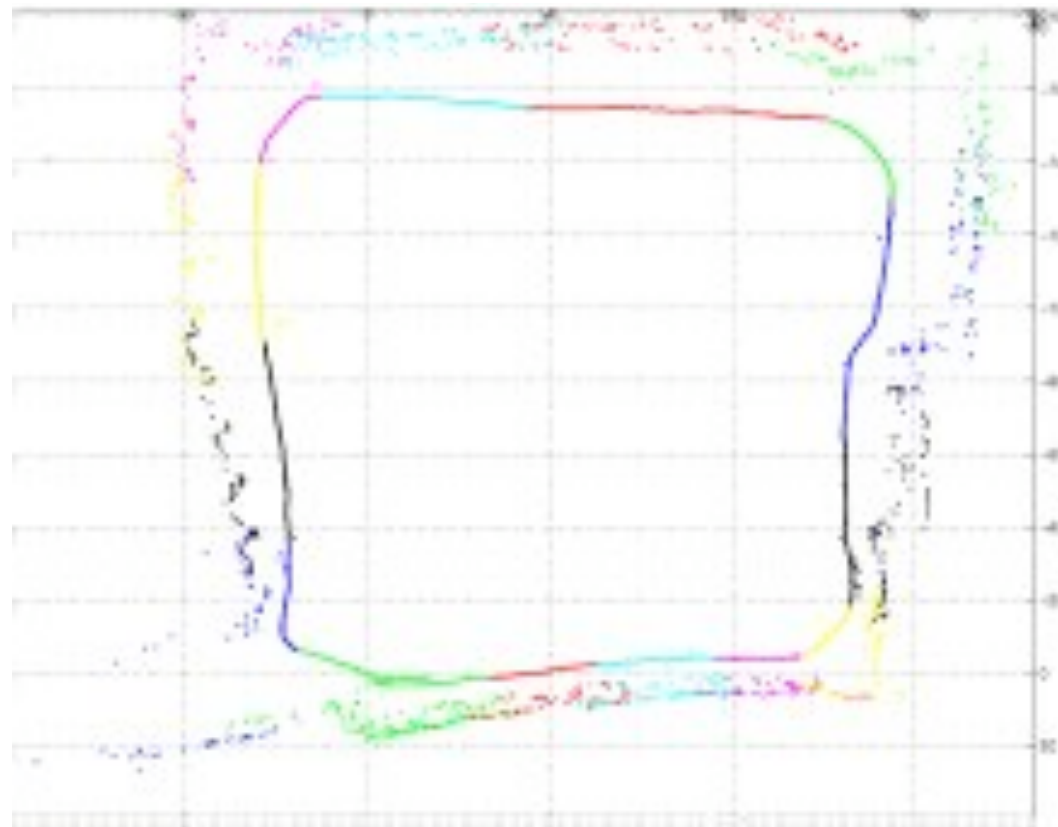
- scansione bidimensionale dell'ambiente (radar laser)
- applicazioni interne
- Sick LMS 200
  - campo visivo ampio: max 180°
  - elevata risoluzione angolare: 0.25°-0.5°-1° (modificabile)
  - tempo di risposta: 53-26-13 msec (dipende dalla risoluzione)
  - grandi distanze: da 10 m fino a 50-80 m
  - accuratezza:  $\pm 15$  mm
  - interfacce: RS-232, RS-422
  - costo elevato: 5000 Euro





# Localizzazione e mappatura

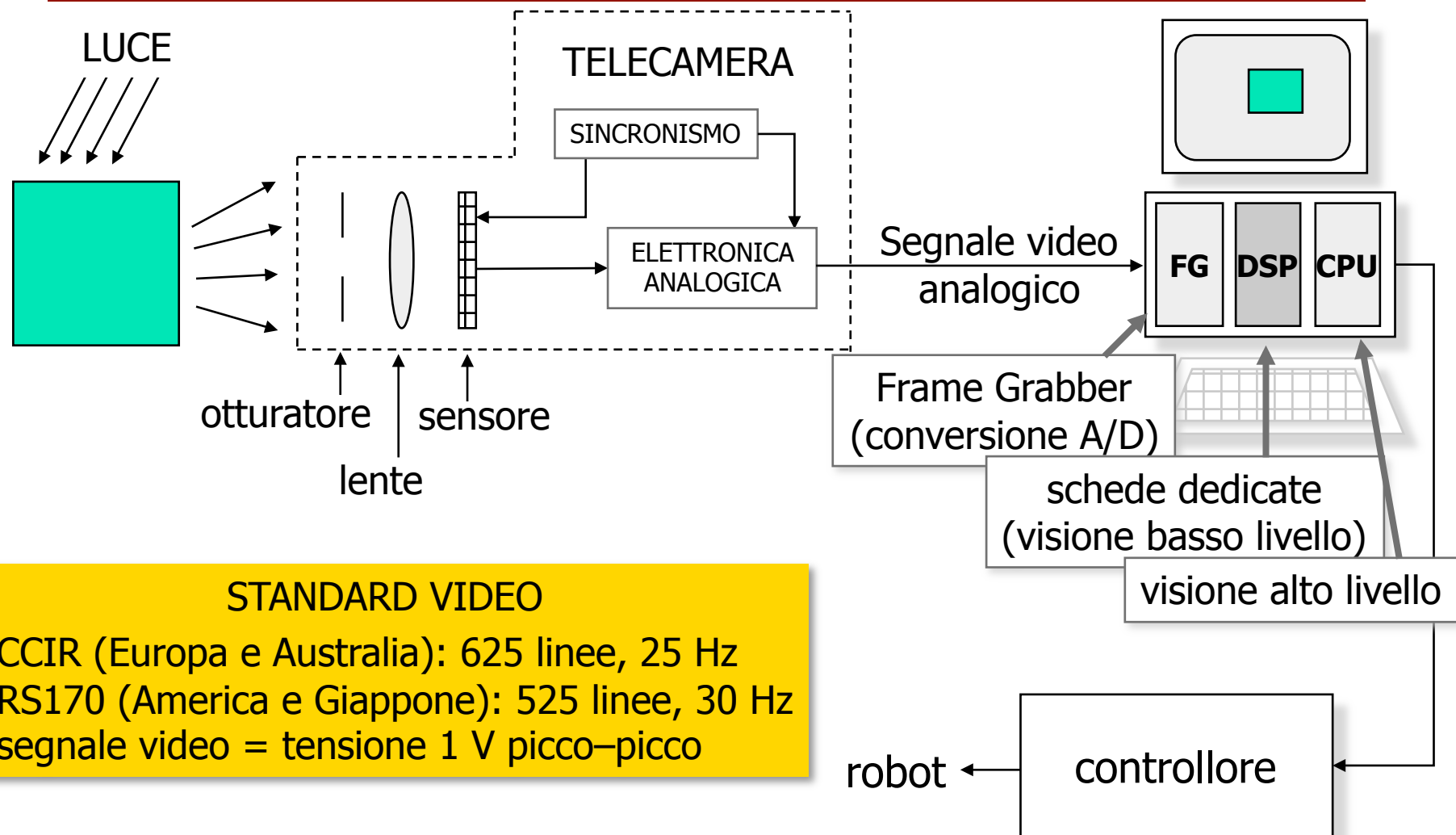
- SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) con sensore laser scanner montato su robot mobile



≈ 50 m



# Sistemi di visione



**STANDARD VIDEO**  
CCIR (Europa e Australia): 625 linee, 25 Hz  
RS170 (America e Giappone): 525 linee, 30 Hz  
segnale video = tensione 1 V picco-picco



# Sensori per la visione

---

- matrici (campionamento spaziale) di elementi fotosensibili capaci di trasformare energia luminosa in energia elettrica
- **CCD** (Charge Coupled Device): pixels di materiale semiconduttore accumulano carica libera se colpiti da fotoni (effetto fotoelettrico) e vengono letti in un processo sequenziale di read-out (circuiteria esterna) che trasforma la carica in tensione
- **CMOS**: ogni pixel è un fotodiodo (fornisce direttamente un segnale elettrico proporzionale all'intensità luminosa, con possibilità di accesso diretto)



# CMOS versus CCD

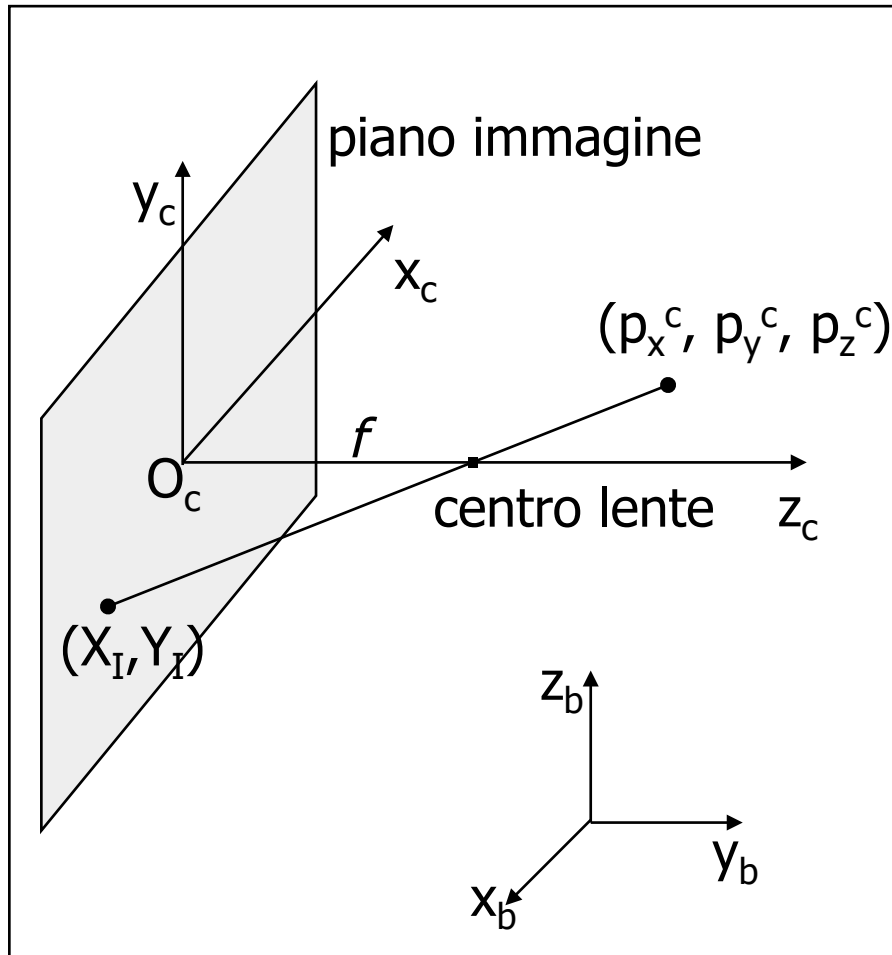
---

- sensibile riduzione costi di produzione di videocamere CMOS
- maggiori risoluzione geometrica dei sensori
  - CMOS: 1M pixel, CCD: 768 x 576 pixel
- maggior velocità
  - 1000 vs. 25 immagini/s
- possibilità di integrare funzioni "intelligenti" su un solo chip
  - sensore + frame grabber + visione basso livello
- accesso random ai singoli pixel
  - gestione flessibile della ROI, Region Of Interest
- immagini di qualità possibilmente inferiore rispetto a CCD
  - sensibilità e rumore
- tecnologia "giovane"





# Trasformazione prospettica



in pixel

$$X_I = \frac{\alpha_x f p_x^c}{f - p_z^c} + X_0 \rightarrow x_i / z_i$$
$$Y_I = \frac{\alpha_y f p_y^c}{f - p_z^c} + Y_0 \rightarrow y_i / z_i$$

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ z_I \end{bmatrix} = \Omega \begin{bmatrix} p_x^c \\ p_y^c \\ p_z^c \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & X_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & Y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/f & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

matrice  
di calibrazione

$$H = \Omega T_b^c$$

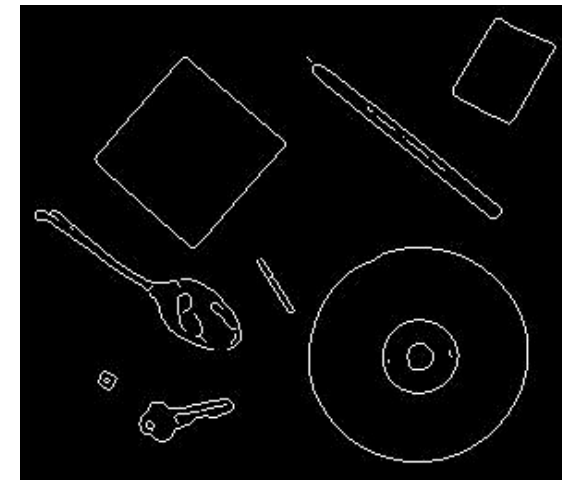
parametri **intrinseci** e **estrinseci**



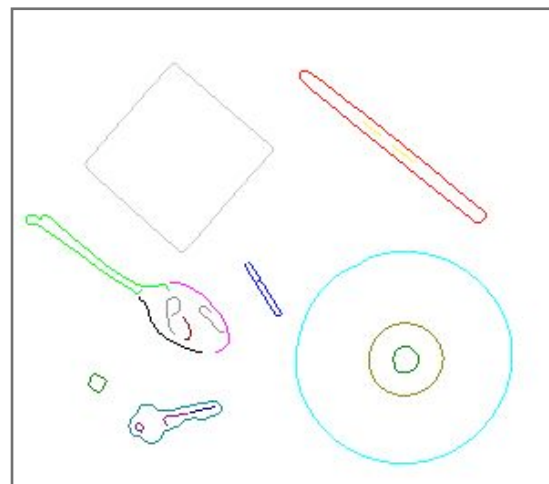
# Visione di basso livello



immagine originale

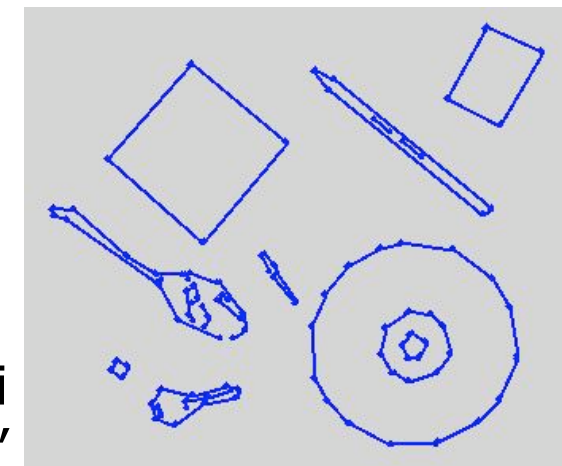


edge detection



pixels adiacenti  
sugli edges sono  
collegati ed  
etichettati con  
differenti colori

segmenti lineari  
"fitted to edges"



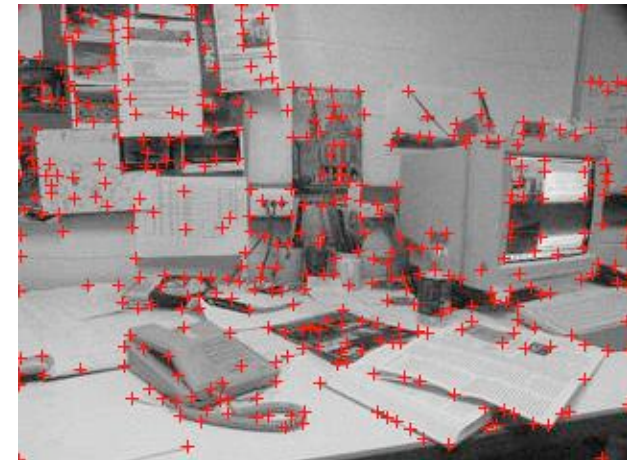


# Visione di alto livello



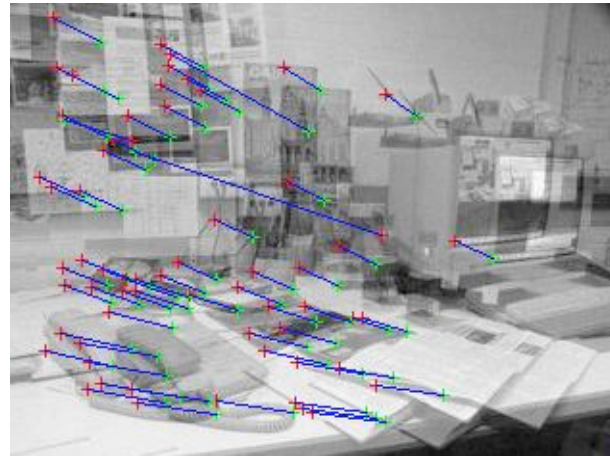
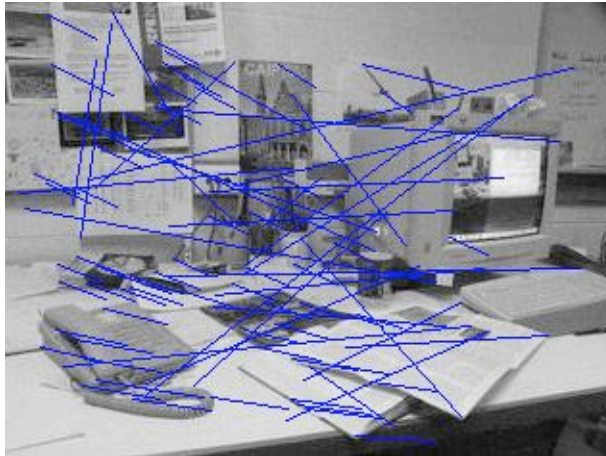
**obiettivo:** trovare la "matrice fondamentale" (trasformazione da un'immagine all'altra)  
**applicazione:** localizzazione

"corners" nelle due immagini (in generale "features")





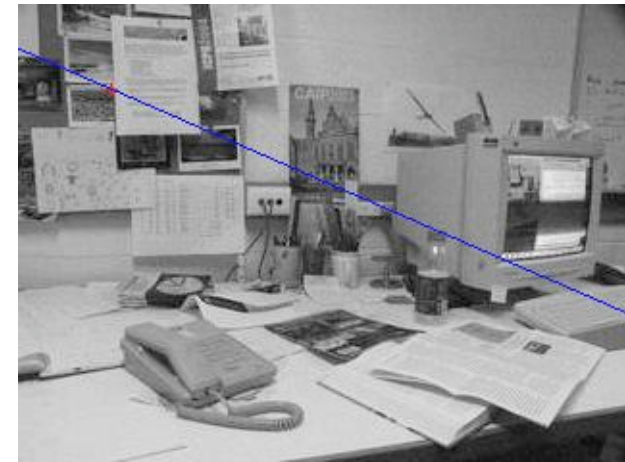
## Visione di alto livello (cont)



**sn:** ipotesi di corrispondenza (usate per trovare la "best fitting fundamental matrix")

**dx:** corrispondenze incoerenti eliminate

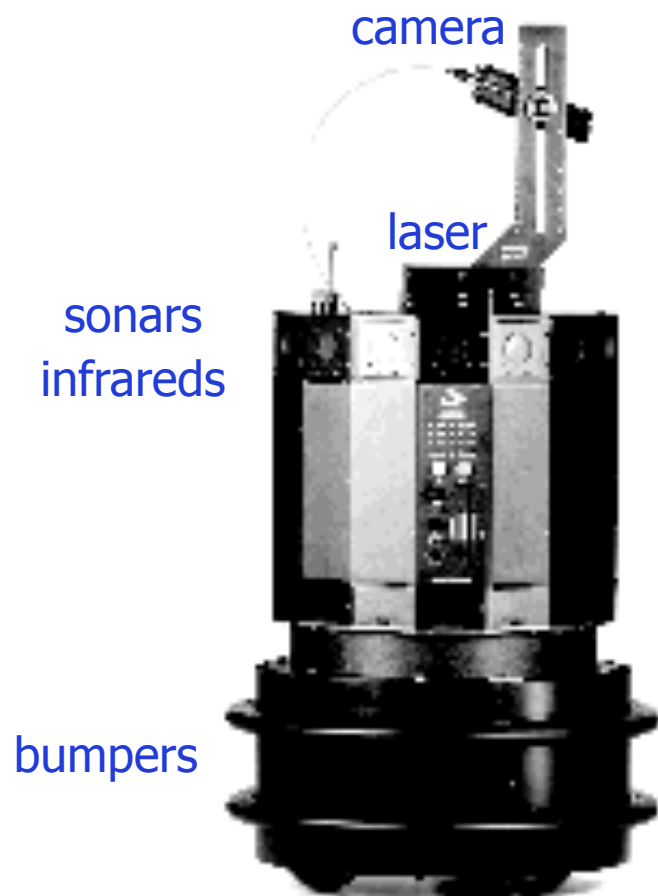
rette corrispondenti nelle due immagini







# Robot mobile Nomad 200



- structured light vision system (laser + CCD camera)
  - 480 scan lines/frame, 30 frames/sec
  - campo: 45-300 cm
- 16 sonar sensors (Polaroid 50KHz)
  - 25° di apertura
  - campo: 40-640 cm, accuratezza 1%
- 16 infrared sensors
  - campo:  $\leq 60$  cm, letture ogni 2.5 msec
- 20 pressure-sensitive bumpers
- radio-ethernet communication



# Robot mobile Magellan Pro

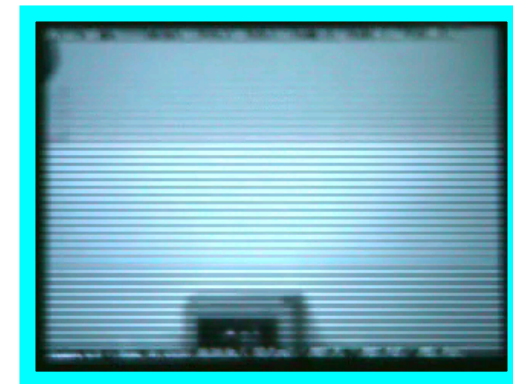
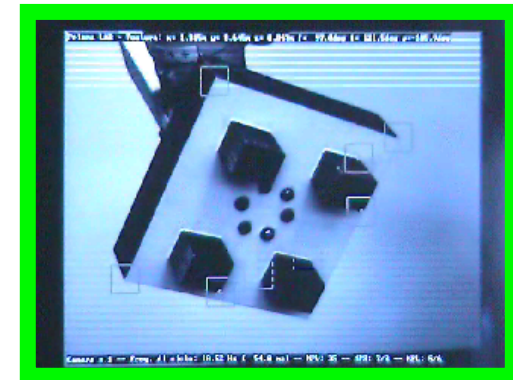
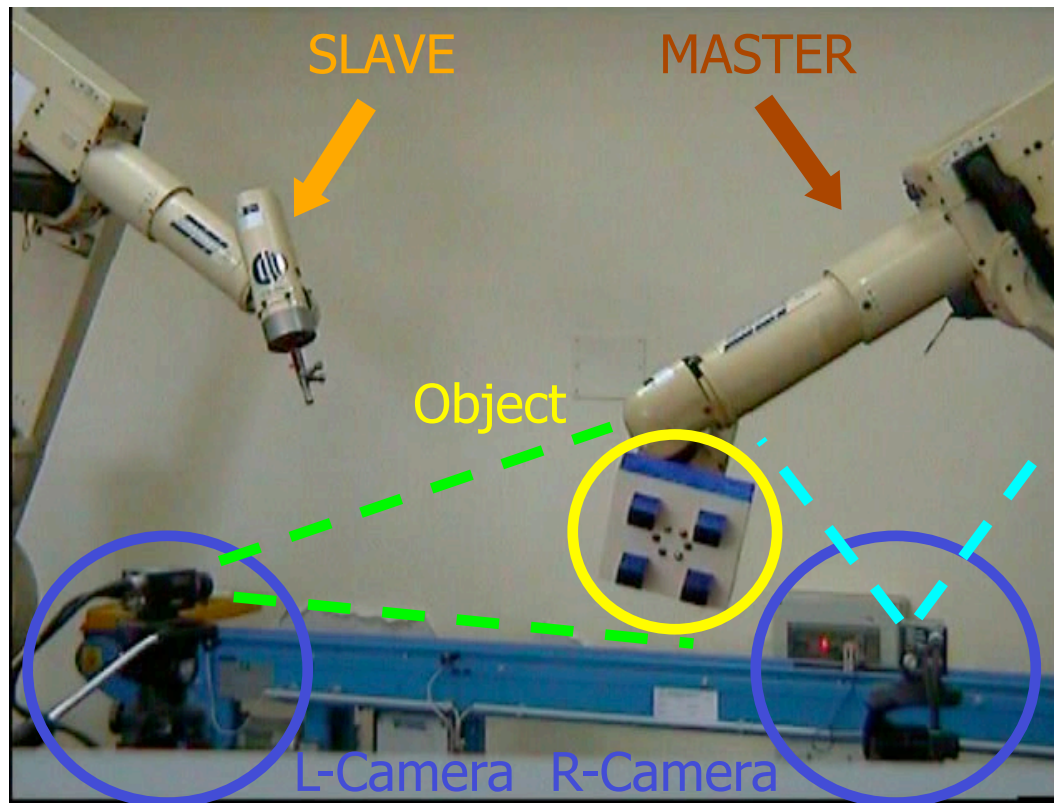
---



- pan-tilt color camera
- 16 sonar sensors
- 16 infrared sensors
- 16 pressure-sensitive bumpers
- ethernet radio-link
- **disponibile nel LabRob del DIS**

# Manipolatori e sistemi di visione

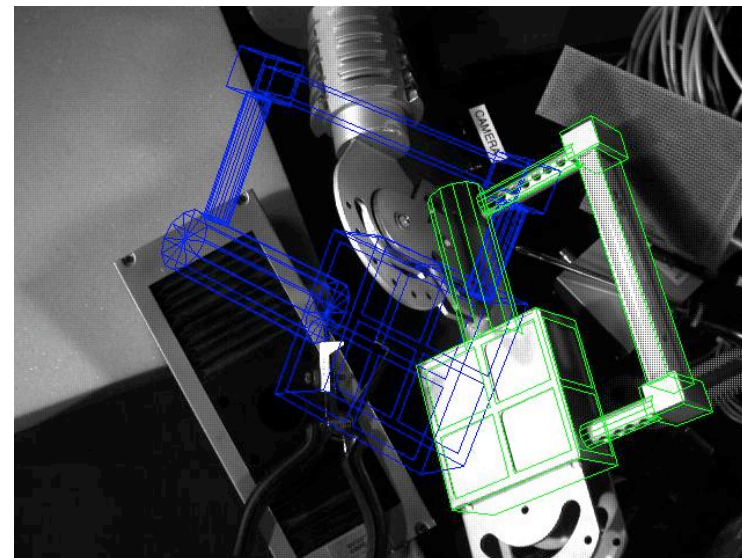
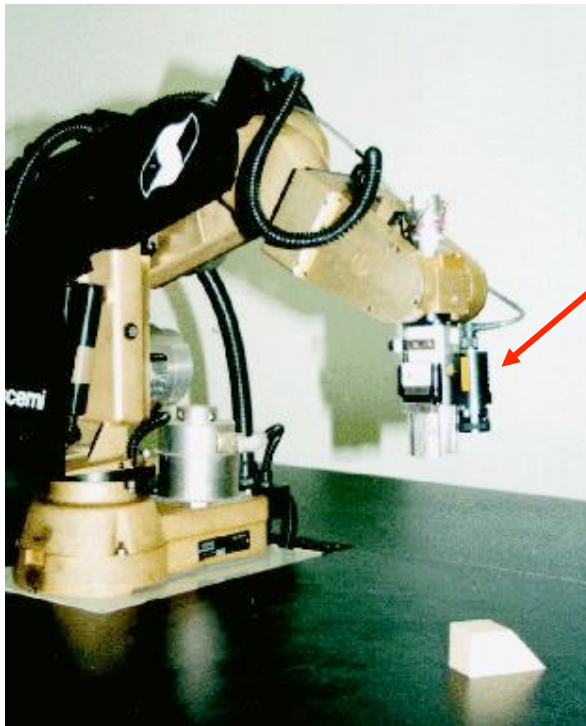
- stereovisione con due telecamere esterne, fisse nell'ambiente (**eye-to-hand**)





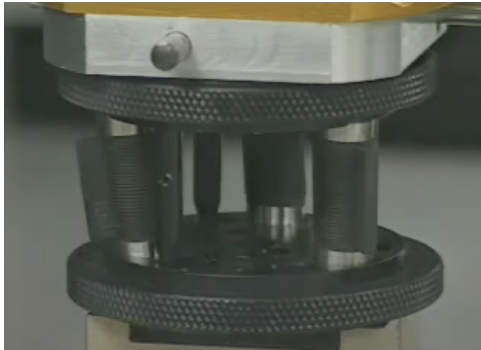
# Manipolatori e sistemi di visione

- telecamera CCD montata sul robot per il posizionamento guidato dell'organo terminale (**eye-in-hand**)





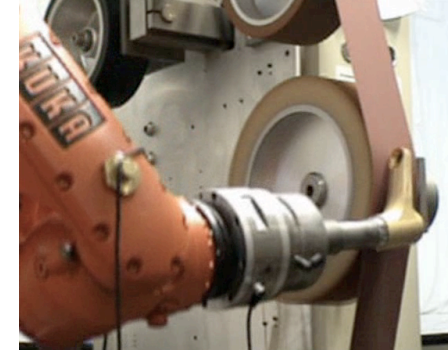
## Alcuni video



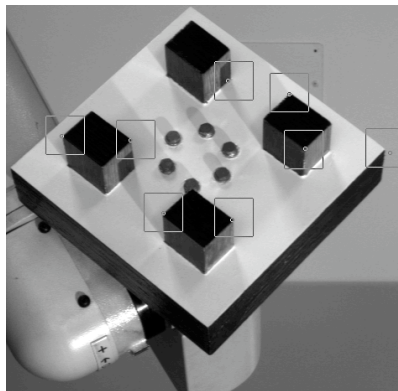
assemblaggio passivo  
con RCC (ATI)



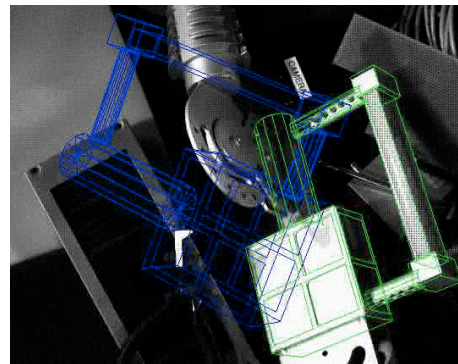
assemblaggio con sensore  
di forza/coppia (ABB/ATI)



finitura superficiale  
con sensore F/T (KUKA)



visual tracking  
eye-to-hand manipolatore  
(DIS, Napoli)



visual servoing  
eye-in-hand manipolatore  
(INRIA, Rennes)



visual servoing  
on-board robot mobile  
(DIS LabRob, Roma)