

# SENSORI

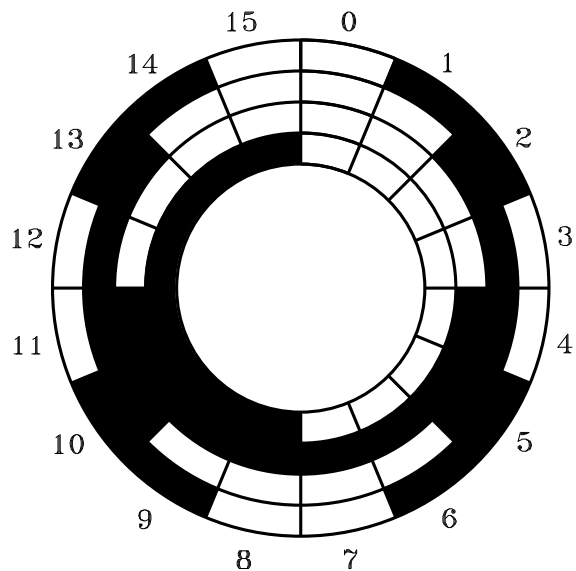
- Sensori *propriocezionali*
  - ★ posizioni dei giunti
  - ★ velocità dei giunti
  - ★ coppia ai giunti
  
- Sensori *eterocezionali*
  - ★ sensori di forza
  - ★ sensori tattili
  - ★ sensori di prossimità
  - ★ sensori di campo
  - ★ sistemi di visione
  - ★ sensori per applicazioni particolari (suono, umidità, fumo, pressione, temperatura)

fusione dei dati sensoriali (robot  $\equiv$  organo intelligente di connessione tra percezione e azione)

## Trasduttori di posizione

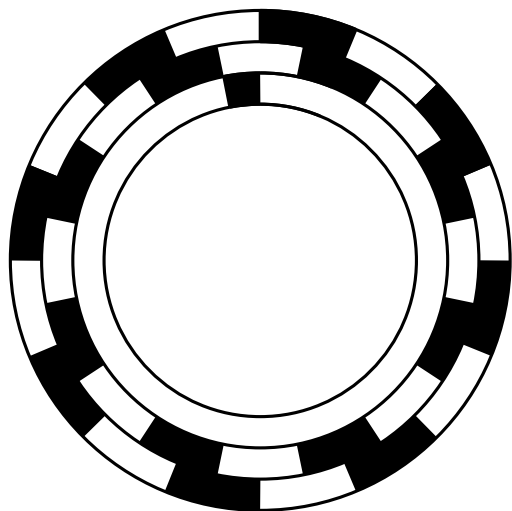
- Spostamenti lineari (robot di misura)
  - ★ potenziometri
  - ★ trasformatori differenziali (LVDT)
  - ★ inductosyn
  
- Spostamenti angolari
  - ★ potenziometri
  - ★ encoder (dischi codificatori)
  - ★ resolver
  - ★ synchro

● Encoder assoluto



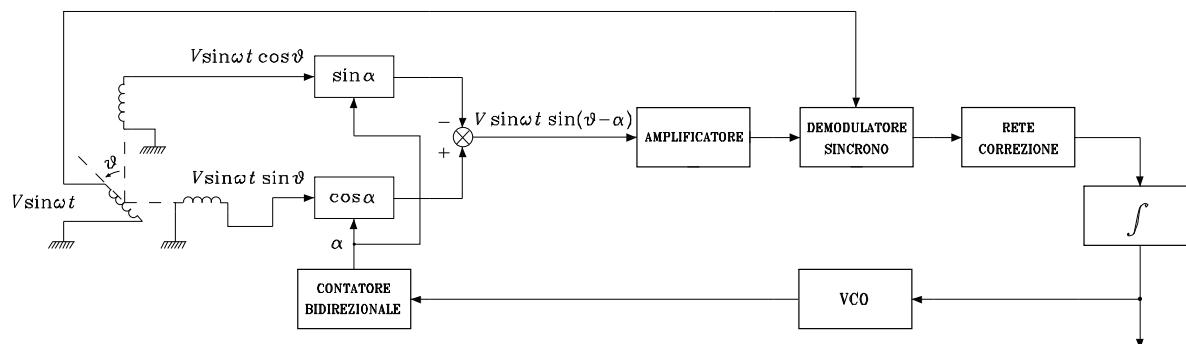
#	Codice	#	Codice
0	0000	8	1100
1	0001	9	1101
2	0011	10	1111
3	0010	11	1110
4	0110	12	1010
5	0111	13	1011
6	0101	14	1001
7	0100	15	1000

- Encoder incrementali



- ★ Assolutizzazione della posizione mediante circuiti elettronici di conteggio e memorizzazione
- Ricostruzione della velocità (impulso in corrispondenza di ogni transizione)
  - ★ convertitore frequenza/tensione (uscita analogica)
  - ★ misura della frequenza (digitale)
  - ★ misura del periodo di campionamento (digitale)

## • Resolver



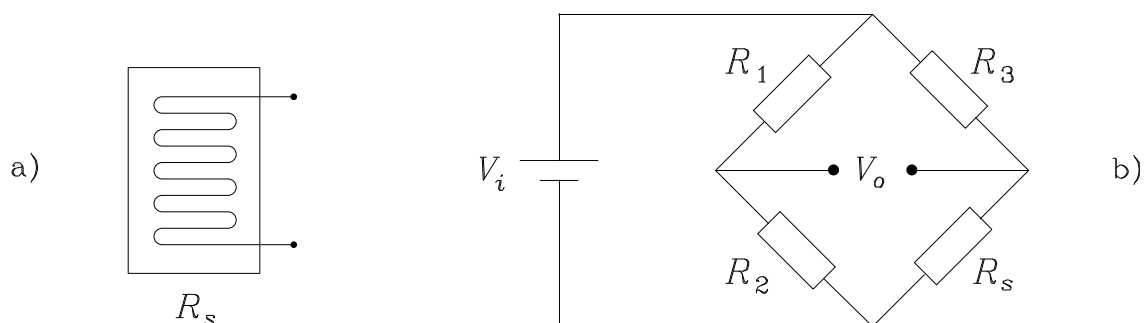
- ★ Piccola macchina elettrica con un rotore ed uno statore con due avvolgimenti disposti a  $90^\circ$  elettrici
- ★ Tensione sinusoidale di eccitazione con frequenze da 0.4 a 10 kHz
- ★ Conversione della tensione prodotta dall'accoppiamento elettrico mediante RDC (*Resolver-to-Digital Converter*)
- ★ Logica di funzionamento in retroazione (inseguimento del riferimento)
- ★ Risoluzioni fino a 16 bit

## Trasduttori di velocità

- Dinamo tachimetrica
  - ★ generatore in c.c.
  - ★ magnete permanente (campo di eccitazione)
  - ★ tensione di uscita proporzionale alla velocità angolare
  - ★ ondulazione residua
  
- Generatore tachimetrico in corrente alternata
  - ★ macchina elettrica
  - ★ rotore a coppa (basso momento di inerzia)
  - ★ due avvolgimenti statorici in quadratura
  - ★ tensione sinusoidale proporzionale alla velocità angolare
  - ★ tensione residua a rotore fermo

## Sensori di forza

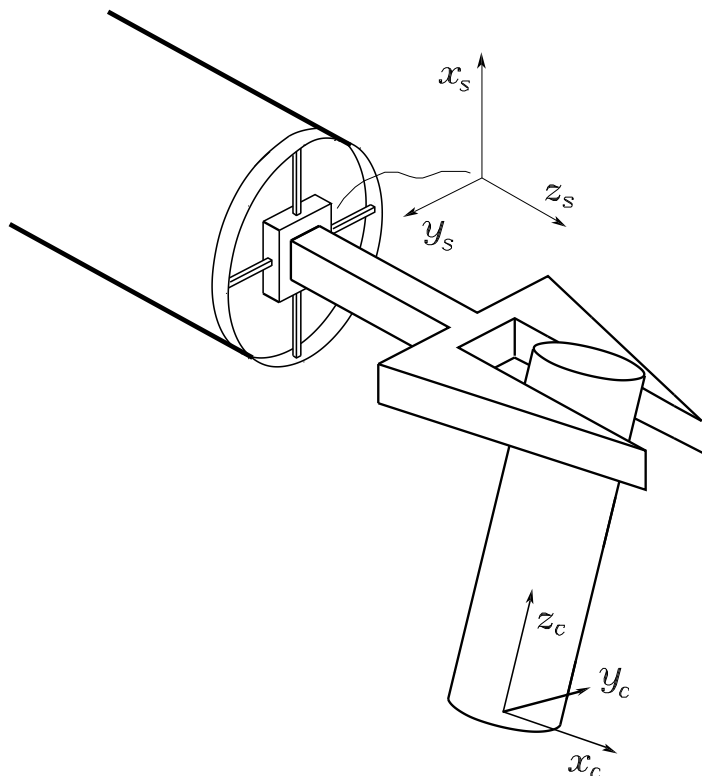
- Estensimetro (*strain gage*)



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

- ★ impiego di una coppia di estensimetri (riduzione degli effetti di variazioni di temperatura e/o aumento della sensibilità)
- Sensore di coppia all'albero
  - ★ servomotore come generatore controllato di coppia
  - ★ misura di coppia con estensimetri montati su un organo deformabile (albero cavo) interposto tra motore e giunto (bassa rigidezza torsionale ed elevata rigidezza flessionale)
  - ★ coppia misurata senza effetti inerziali e di attrito del servomotore

- Sensore di forza al polso

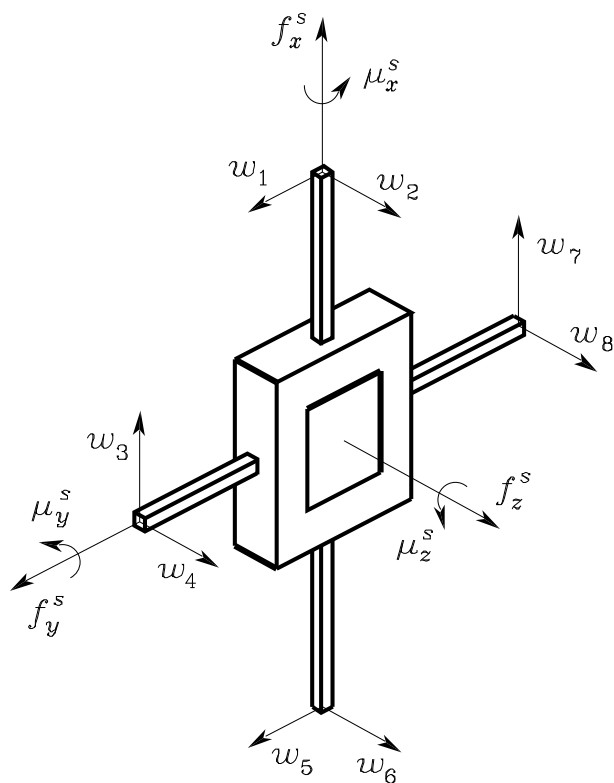


- ★ misura le tre componenti di forza e le tre componenti di momento di contatto tra manipolatore e ambiente
- ★ diametri  $\approx 10$  cm
- ★ altezza  $\approx 5$  cm
- ★ (50, 500) N (risoluzione 0.1%)
- ★ (5, 70) N·m (risoluzione 0.05%)
- ★ frequenza in uscita  $\approx 1$  kHz

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_c^c \\ \boldsymbol{\mu}_c^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s^c & \mathbf{O} \\ \mathbf{S}(\mathbf{r}_{cs}^c) \mathbf{R}_s^c & \mathbf{R}_s^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_s^s \\ \boldsymbol{\mu}_s^s \end{bmatrix}$$



★ sensore di forza a croce di Malta



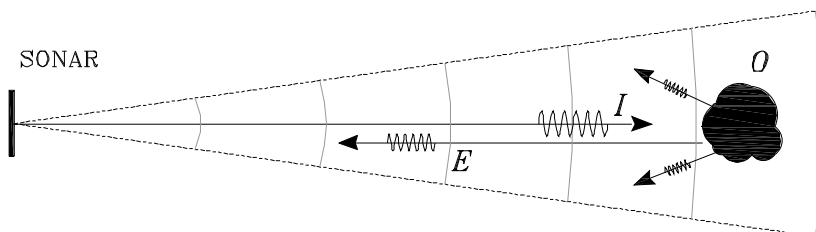
★ Matrice di calibrazione del sensore

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

## Sensori di distanza

- La conoscenza dell'ambiente mediante sensori esterocezionali consente al robot di intraprendere azioni "intelligenti" in modo autonomo
- *Sensori di prossimità*
  - ★ Indicazione della presenza di oggetti nello spazio di lavoro
  - ★ Misura senza contatto fisico
  - ★ Campo visibile o portata nominale
- *Sensori di distanza*
  - ★ Forniscono una misura strutturata (distanza dall'oggetto + direzione di misura = posizione relativa dell'oggetto rispetto al sensore)
  - ★ Usate per navigazione, evitare ostacoli, costruire mappe dell'ambiente, riconoscere oggetti
  - ★ Sensori di maggiore diffusione: *Sonar* e *Laser*

- Sonar (SOund NAvigation and Ranging)



- ★ usano impulsi acustici e i loro echi per misurare la distanza dagli oggetti
- ★ distanza proporzionale al tempo che l'onda acustica (*impulso sonar*) impiega a percorrere il tragitto sensore–oggetto–sensore (*tempo di volo*)

$$d_O = \frac{c_s t_v}{2} \quad c_s \approx 20.05 \sqrt{T + 273.16} \text{ m/s.}$$

- ★ impiegati nella robotica mobile e sottomarina: basso costo, leggeri, basso consumo, bassa richiesta computazionale, funzionanti anche in condizioni di scarsa visibilità
- ★ lavorano a frequenza ultrasoniche tra 20 e 200 KHz
- ★ energia concentrata in un cono solido con angolo di apertura dipendente dalla frequenza e dalle dimensioni del sensore (non inferiore a 15°)
- ★ limiti: bassa risoluzione angolare e radiale, limiti inferiori e superiori all'intervallo di misura

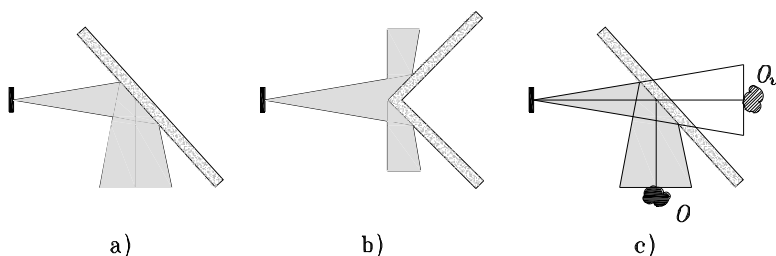
- Trasduttori sonar *piezoelettrici*

- ★ cristalli che si deformano sotto l'azione di un campo elettrico e vibrano se eccitati alla frequenza di risonanza
- ★ basso accoppiamento acustico con l'aria (corno conico concavo sopra il sensore)
- ★ ampiezza di banda limitata e inerzia significativa (limite significativo sulla minima distanza misurabile)

- Trasduttori sonar *elettrostatici* (o capacitivi)

- ★ condensatori la cui capacità varia muovendo e/o deformando una delle armature
- ★ elevata ampiezza di banda, elevata sensibilità e bassa inerzia, buon accoppiamento con l'aria
- ★ esempio: Sonar POLAROID serie 600 (trasduttore capacitivo, diametro 4 cm, frequenza 50 kHz, angolo di apertura  $15^\circ$ , distanza massima 10 m, distanza minima 15 cm, accuratezza 1%)

- Proprietà di riflettività delle superfici

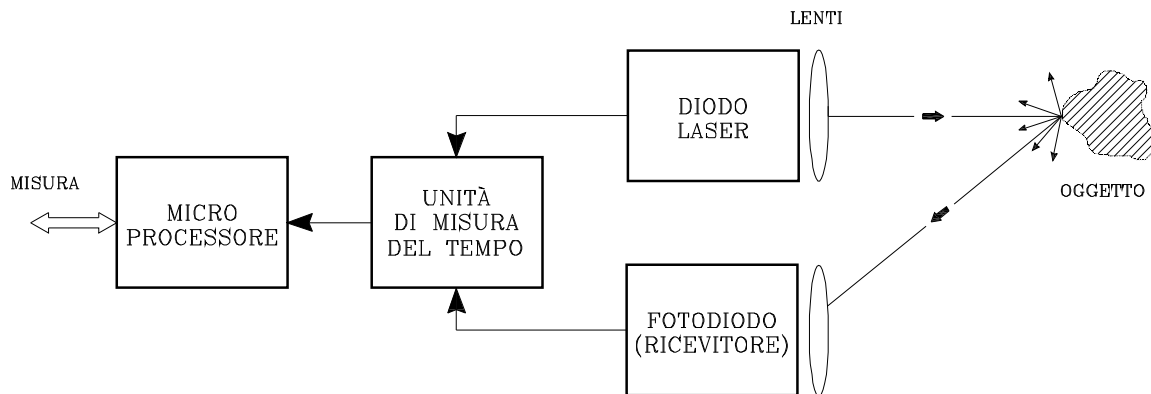


- ★ errori di rilevazione: a) piano non rilevabile; b) spigolo non rilevato; c) piano con falsa rilevazione

- Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

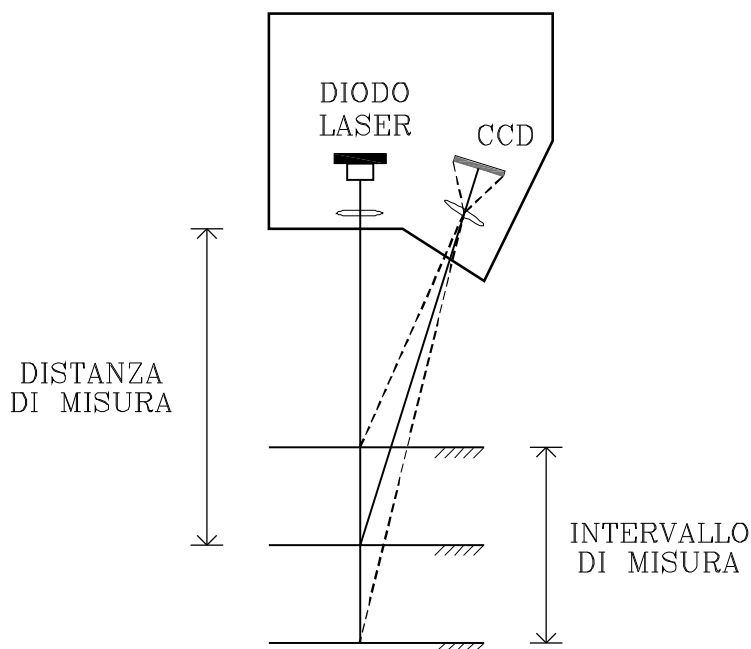
- ★ vantaggi dei raggi laser rispetto ad altre sorgenti luminose: facilità di generazione, frequenze infrarosso non invasive, raggi molto stretti, sorgenti a singola frequenza
- ★ tipologie di uso comune: *sensori laser a tempo di volo* e *sensori laser a triangolazione*

- Sensori laser a tempo di volo



- ★ misurano la distanza tramite la misura del tempo di volo
- ★ accuratezza limitata dal minimo intervallo di tempo osservabile, dall'accuratezza temporale del ricevitore e dalla durata dell'impulso laser (limiti non tecnologici ma di costo)
- ★ intervallo di ambiguità (ambiguità per oggetti a distanze multiple di  $\frac{1}{2}c\Delta t$ ; valori tipici 20–40 m): distanza reale con algoritmi che garantiscono la continuità della misura
- ★ sensori a scansione realizzati movimentando il raggio laser con specchi: scansioni lineari o bidimensionali (immagine)
- ★ per applicazioni robotiche: range di misura 5–100 m, precisione 5–10 mm, frequenza di acquisizione 1–25 kHz

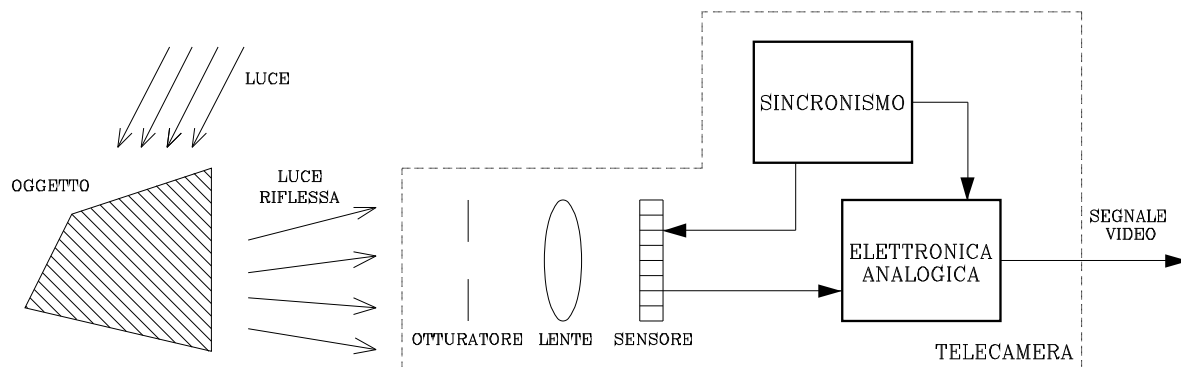
- Sensori laser a triangolazione



- ★ basati sul principio della triangolazione geometrica
- ★ influenzati dalle caratteristiche della superficie dell'oggetto
- ★ possibilità di controllare il raggio laser: filtri sulla lunghezza d'onda, raggi multipli per misure simultanee, osservazioni selettive
- ★ limiti: rischi per gli occhi (soprattutto per raggi infrarossi), false letture da riflessioni speculari

## Sensori di visione

- Telecamera



- Elemento fotosensibile (*pixel*)

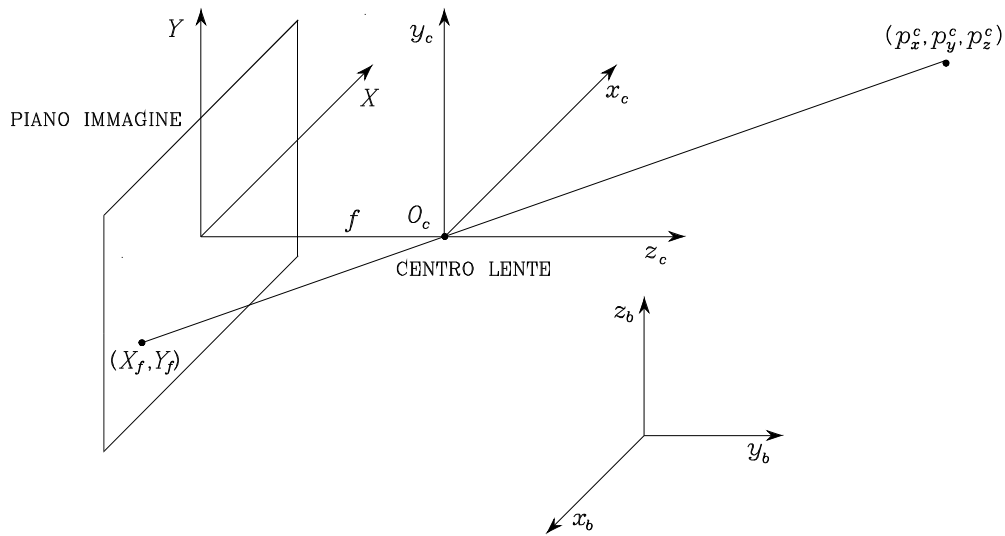
- ★ struttura a matrice rettangolare

- ★ CCD

- carica = integrale dell'illuminazione incidente

- ★ CMOS

- carica = quantità di illuminazione incidente



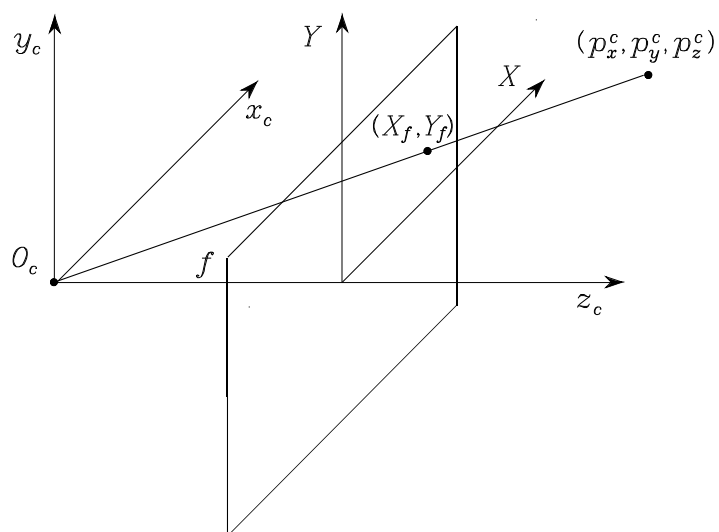
$$\tilde{\mathbf{p}}^c = \mathbf{T}_b^c \tilde{\mathbf{p}}$$

- Trasformazione prospettica

$$X = -f \frac{p_x^c}{p_z^c}$$

$$Y = -f \frac{p_y^c}{p_z^c}$$





- Trasformazione prospettica frontale

$$X = f \frac{p_x^c}{p_z^c}$$

$$Y = f \frac{p_y^c}{p_z^c}$$

- ★ aberrazioni
- ★ distorsione geometrica

- ★ campionamento temporale (otturatore)
- ★ campionamento spaziale (pixel)

$$X_I = \alpha_x f \frac{p_x^c}{p_z^c} + X_0$$

$$Y_I = \alpha_y f \frac{p_y^c}{p_z^c} + Y_0$$

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ \lambda \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Pi} \begin{bmatrix} p_x^c \\ p_y^c \\ p_z^c \\ 1 \end{bmatrix}$$

ove

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

$$\mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

↓

- Matrice di calibrazione

$$\mathbf{\Xi} = \mathbf{\Omega} \mathbf{T}_b^c$$

- ★ parametri intrinseci  $(\alpha_x, \alpha_y, X_0, Y_0, f)$  in  $\mathbf{\Omega}$
- ★ parametri estrinseci in  $\mathbf{T}_c^b$

- Coordinate normalizzate

$$\lambda \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{\Pi} \begin{bmatrix} p_x^c \\ p_y^c \\ p_z^c \\ 1 \end{bmatrix}$$

Trasformazione da coordinate normalizzate a quelle espresse in pixel

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{\Omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

- 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
  
- Immagine = scansione sequenziale
  - ★ linee pari (primo semiquadro)
  - ★ linee dispari (secondo semiquadro)
  
- Discretizzazione del segnale video
  - ★ frame grabber
  
- Visione a basso livello
  - ★ caratteristiche elementari (centroide, discontinuità di intensità)
  
- Visione ad alto livello
  - ★ emulazione della conoscenza (riconoscimento di oggetti in base a modelli CAD)