



Realtà Virtuale From 3D to 2D

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Informatica
alberto.borghese@unimi.it

Università degli Studi di Milano

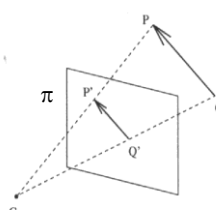


Sommario

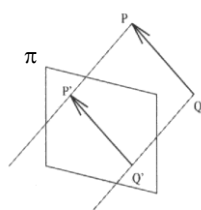
- La trasformazione proiettiva
- Calibrazione

Proiezione
Perspettiva
o Prospettiva

Proiezione centrale e proiezione ortogonale



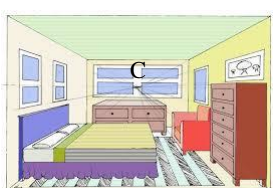
1)




2)

$P(X,Y,Z)$ viene proiettato su un piano (piano immagine) nel punto $P'(X',Y')$. Z è la distanza dal piano immagine.

1) X' dipende da X e Z .
2) X' non dipende da Z , ma solo da X .



Proiezione centrale: centro di proiezione al finito - C.



Proiezione ortogonale: centro di proiezione all'infinito.

Tutti i vegg. sono paralleli

Z coord. sull'asse az
C punto di proiezione
Distanza orientata

3/46

Dal 3D al 2D

Come si forma un'immagine?

- Scena con oggetti riflettenti.
- Sorgente di illuminazione
- Piano di rilevazione della luce riflessa.

senza corpo non visibile, assorbire
Tutti i vegg. riflessi, quindi solo nero

Il motore di questa trasformazione è la **proiezione prospettica**.

4/46

L'occhio umano

*Res
12k x 12k
a 70 cm*

Its behavior is very similar to that of a camera

A.A. 2021-2022 5/46

Primi tentativi di ripresa

La pin-hole camera

*Passa
1 solo
raggio,
no sfocatura, ma perde
l'intensità
luminosa
di 1 stop
raggio a
lunga
esposizione*

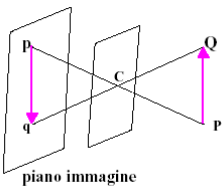
Proiezione prospettica:
tutti i raggi di proiezione
passano per un unico punto,
detto **centro di proiezione**.

Pinhole camera

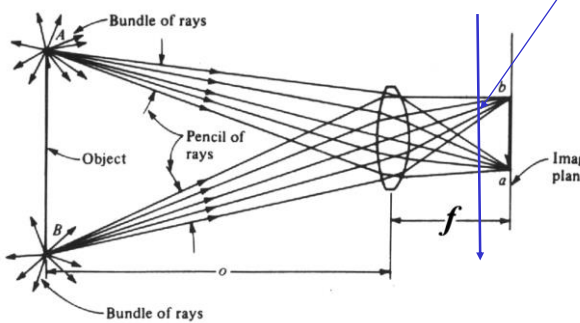
Perché non funziona in pratica?

A.A. 2021-2022 6/46

La lente



Pinhole camera



Lente convergente

A.A. 2021-2022

7/46

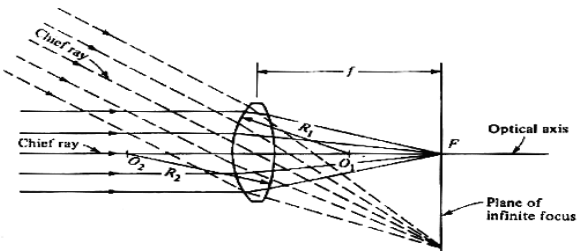
(Cristallino)

A fuoco:

lente
e piano
immagine
sono coniugati.

1 unico
punto

Geometria dell'ottica



Oggetti all'infinito

- **Distanza focale:** distanza del piano immagine quando un oggetto si trova all'infinito e dà un'immagine nitida sul piano immagine.
- **Asse ottico:** raggio che non viene deviato dalla lente.
- Intersezione dell'asse ottico con il piano immagine dà il **punto principale (F)**.

non con
un'unica
obiettivi:

lente
gruppi di
lenti

A.A. 2021-2022

8/46

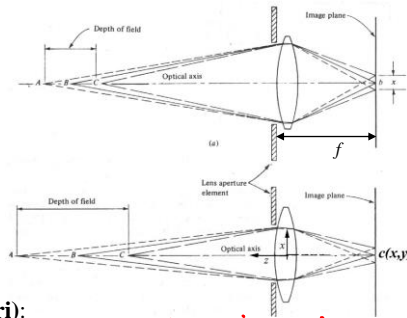


Messa a fuoco



Problema della messa a fuoco

La profondità di campo dipende dall'apertura dell'obiettivo.



Parametri di camera (o intrinseci – 3 parametri):

- Punto principale $c(x,y)$ *Proiezione asse ottico su piano immagine*
- distanza focale (piano messa a fuoco), f

Occorre conoscere anche il fattore di forma dei pixel nel caso di immagini digitali (è una costante, non un parametro).

Distorsioni.

A.A. 2021-2022

9/46

I raggi convergono sulle piccole differenze

Se piccoli l'immagine di nitidezza sarà una nostra visione.

Sulle immagini digitali il pixel è la "somma" dei colori nell'area vicina

prof. di campo se chiarezza del diaframma, riduzione dell'esposizione

Messa a fuoco (distanza) far convergere i raggi sul piano immagine



Distorsioni



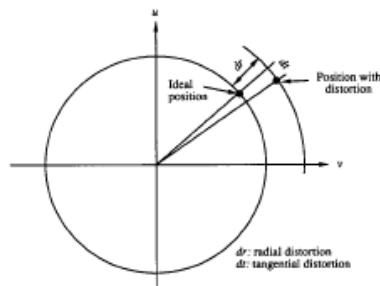
Distorsioni radiali.

Distorsioni tangenziali.

Shrinkage ($x' = \lambda x$, $y' = y$).

$$x_m = x + f(x,y)$$

$$y_m = y + g(x,y)$$




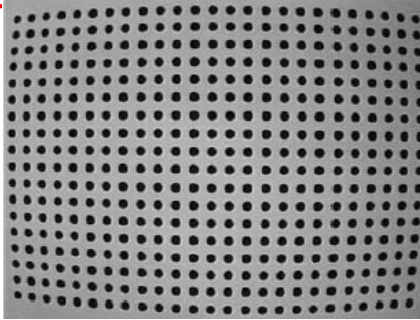
A.A. 2021-2022


10/46

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>

Difficile ottenere tre parallelismi

Esempi di Distorsioni



Ottimo per effetti speciali, un po' meno per delle misure.....

Le camere non sono metriche.

A.A. 2021-2022 11/46

funzione
della distanza
e centro
di riflessione

Distorsioni radiali

A cuscinetto

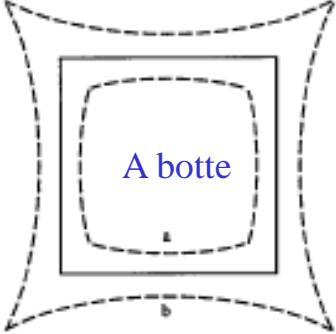
$$dr(p) = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots$$

$$r = |p - p_0|$$

Rappresentazione polare (ρ, ϕ):

$$x = \rho \cos \phi$$

$$y = \rho \sin \phi$$



$$dx(p) = k_0 x + k_1 x(x^2 + y^2) + O[(x,y)^4]$$

$$dy(p) = k_0 y + k_1 y(x^2 + y^2) + O[(x,y)^4]$$

Il parametro k_0 non si considera perchè corrisponde ad una variazione di scala.

A.A. 2021-2022 12/46



I modelli di distorsioni



Modelli parametrici

1	Radial Polynomial 3rd Degree	$\Delta x = k_1 r^2 x$ $\Delta y = k_1 r^2 y$	(1)
2	Radial Polynomial 5th Degree	$\Delta x = k_1 r^2 x + k_2 r^4 x$ $\Delta y = k_1 r^2 y + k_2 r^4 y$	(2)
3	Radial and Tangential	$\Delta x = k_1 r^2 x + k_2 (r^2 + 2x^2) + k_3 2xy$ $\Delta y = k_1 r^2 y + k_3 (r^2 + 2y^2) + k_2 2xy$	(3)

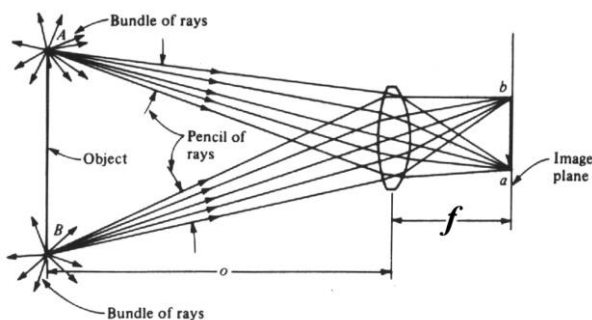
In alternativa: modelli **semi-parametrici** che fittano il campo di distorsione a partire da misure prese sul campo.

A.A. 2021-2022

13/46



Le distorsioni




$$dr(p) = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots$$


Il punto a per effetto delle distorsioni viene misurato in una posizione $p_a + dr(p_a)$

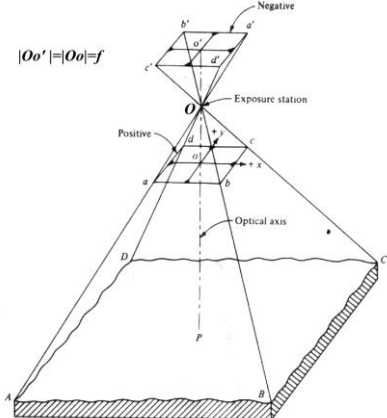
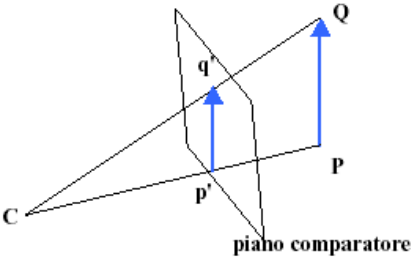
A.A. 2021-2022

14/46



Raddrizzamento dell'immagine




Si considera un piano posto davanti al centro di proiezione (si ottiene scendendo l'immagine dall'angolo a dx in basso). In digitale si ottiene iniziando a «contare» i pixel dal punto in alto a dx invece che in basso a sx.

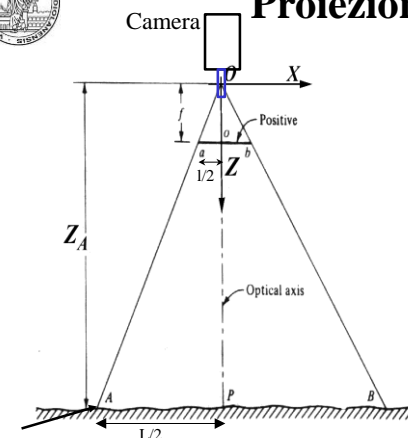
A.A. 2021-2022

15/46

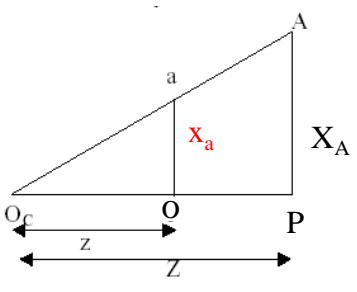
Proiezione Prospettica

Proiezione semplice





Tutte le coordinate misurate rispetto a un centro comune



Per similitudine fra i triangoli aOo e AOP:

Oo : OP = ao : AP

f : Z_A = x_A : X_A → $x_A = f X_A / Z_A$

Perché angoli uguali

Facile

A.A. 2021-2022

16/46

per @ f in pixel



per mondo 3D posso averlo in mm

Il rapporto funziona anche con unità di misure diverse

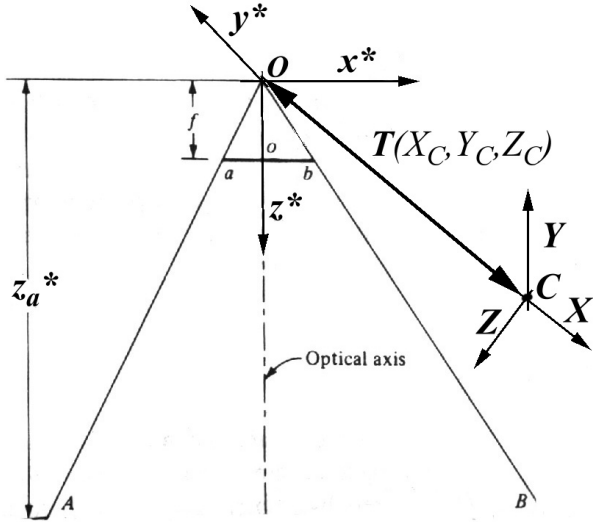
Non è detto che l'apparato sia possibile, non sappiamo se il piano nel rispetto degli assi Z è arbitrario

Distinzione
tra piano
immagini
e sistema
di rif.
assoluto

I parametri esterni






- **Traslazione:**
3 componenti:
 $T(X_C, Y_C, Z_C)$.
- **Rotazione**
 $R_{3 \times 3}(\omega, \phi, k)$



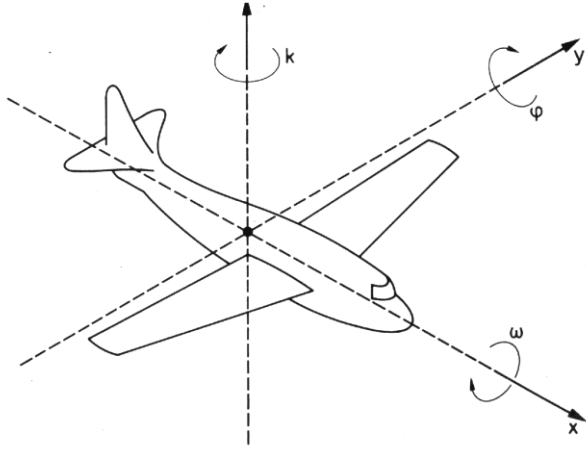
A.A. 2021-2022
17/46

Angoli di orientamento nello spazio 3D

Modo generale: roll, pitch, e yaw.
(ω, ϕ, k): rollio, beccheggio e deriva.

Sono 3 rotazioni sequenziali,
non commutative.



A.A. 2021-2022
18/46



Rototraslazione



$$\mathbf{P}^* = \mathbf{R} (\mathbf{P} - \mathbf{T})$$

$$X^* = r_{11}(X - X_C) + r_{12}(Y - Y_C) + r_{13}(Z - Z_C)$$

$$Y^* = r_{21}(X - X_C) + r_{22}(Y - Y_C) + r_{23}(Z - Z_C)$$

$$Z^* = r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)$$

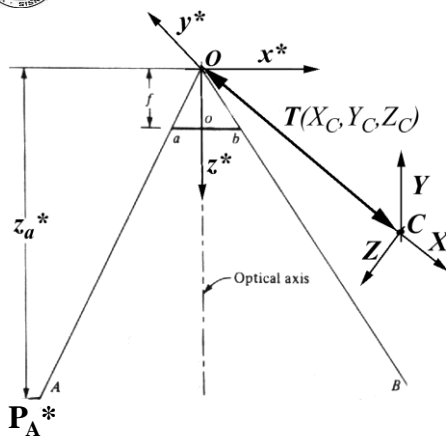
$$\begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -(r_{11}T_x + r_{12}T_y + r_{13}T_z) \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -(r_{21}T_x + r_{22}T_y + r_{23}T_z) \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & -(r_{31}T_x + r_{32}T_y + r_{33}T_z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

A.A. 2021-2022

19/46

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>

Dal 3D al 2D



1) Mi riconduco alla proiezione semplice

$$\mathbf{P}_A^* = \mathbf{R} (\mathbf{P}_A - \mathbf{T})$$

*calcolando su
il sistema intrinseco*

$$\mathbf{P}(X_A, Y_A, Z_A) \Rightarrow \mathbf{P}_A^*(X_A^*, Y_A^*, Z_A^*)$$

A.A. 2021-2022

20/46

Dal 3D al 2D

2) Implemento la proiezione semplice

$$a(x_a; y_a) \begin{cases} x_a = f X^*_A / Z^*_A \\ y_a = f Y^*_A / Z^*_A \end{cases}$$

Retraslo e poi Proiezione semplice

$$P(X_A, Y_A, Z_A) \Rightarrow P^*_A(X^*_A, Y^*_A, Z^*_A) \Rightarrow a(x_a, y_a)$$

La terza coordinata sul piano immagine, $z_a = f = \overline{OO}$

A.A. 2021-2022 21/46

Equazioni di collinearità (rappresentazione prospettica)

PARTE 550
Coordinate
3 trasformazioni

PARTE 1580
Devo conoscere
di cosa si
può capire
Distanza Piano Imm.

Usare
questo
per x e y

Termini di Proiezione


$$\begin{aligned} X^*_A &= r_{11}(X_A - X_C) + r_{12}(Y_A - Y_C) + r_{13}(Z_A - Z_C) \\ Y^*_A &= r_{21}(X_A - X_C) + r_{22}(Y_A - Y_C) + r_{23}(Z_A - Z_C) \\ Z^*_A &= r_{31}(X_A - X_C) + r_{32}(Y_A - Y_C) + r_{33}(Z_A - Z_C) \end{aligned}$$

$$(x_a - x_o)/f = X^*_A / Z^*_A = \frac{r_{11}(X_A - X_C) + r_{12}(Y_A - Y_C) + r_{13}(Z_A - Z_C)}{r_{31}(X_A - X_C) + r_{32}(Y_A - Y_C) + r_{33}(Z_A - Z_C)}$$


$$y_a - y_o = f Y^*_A / Z^*_A = \frac{r_{21}(X_A - X_C) + r_{22}(Y_A - Y_C) + r_{23}(Z_A - Z_C)}{r_{31}(X_A - X_C) + r_{32}(Y_A - Y_C) + r_{33}(Z_A - Z_C)}$$

Complessivamente 9 parametri. Equazioni non-lineari.

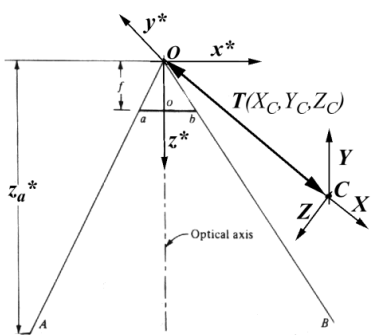
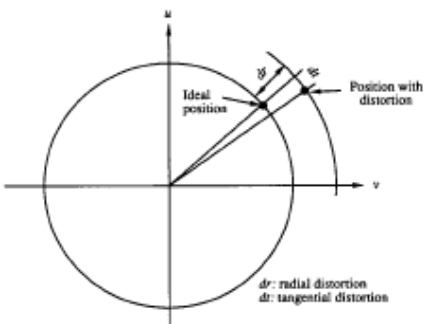
A.A. 2021-2022 22/46




Modello reale della ripresa fotografica




$$x - x_o + f(x, y, x_o, y_o) = -f \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}$$
$$y - y_o + g(x, y, x_o, y_o) = -f \frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}$$





Tassonomia dei parametri



$P^3 \rightarrow P^2$ Interior parameters

$P^3 \rightarrow P^3$ Exterior parameters

$P^2 \rightarrow P^2_m$ Distortion parameters: $g_1, g_2, g_3, g_4, k_1, \dots$
($f(x, y, x_o, y_o)$; $g(x, y, x_o, y_o)$)

Focal length, f

Principal point (x_o, y_o)

Orientation (ω, ϕ, κ)

Position (X_o, Y_o, Z_o)


Eq. di
cordinati
fondo
(image
Dist)

$$x - x_o + f(x, y, x_o, y_o) = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{21}(Y - Y_o) + m_{31}(Z - Z_o)}{m_{13}(X - X_o) + m_{23}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}$$
$$y - y_o + g(x, y, x_o, y_o) = -f \cdot \frac{m_{12}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{32}(Z - Z_o)}{m_{13}(X - X_o) + m_{23}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}$$


A.A. 2021-2022

24/46

Per la realtà aumentata
ma in forme matriciale



Notazione matriciale



$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & x_o \\ 0 & f & y_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Trasformazione
mediante scala (f) e
traslazione (x_o, y_o)

$$A = \begin{bmatrix} R & -RT \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Roto-traslazione

$$p = KMA P = H P$$


(circled K with arrow pointing to P)

Che forma ha H?
Che dimensioni?


$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

occorre 1 dim

A.A. 2021-2022
25/46



Proiezione in coordinate omogenee



$$P^* = M A P = \begin{Bmatrix} m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \\ m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \\ m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0) \end{Bmatrix}$$


$$A = \begin{bmatrix} R & -RT \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{omogene} \\ y_{omogene} \\ w_{omogene} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & x_o \\ 0 & f & y_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P^* = \begin{bmatrix} fX^* + x_oZ^* \\ fY^* + y_oZ^* \\ Z^* \end{bmatrix}$$


Dividendo per la terza coordianata, $w_{omogenee}$:

$$\begin{bmatrix} x_{cartesiana} \\ y_{cartesiana} \\ w = 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fX^*/Z^* + x_o \\ fY^*/Z^* + y_o \\ 1 \end{bmatrix}$$

A.A. 2021-2022
26/46



Sommario




- La trasformazione proiettiva
- **Calibrazione**


A.A. 2021-2022

27/46

Trovare
 ed allineare
 il sistema
 CAD
 a quello
 di camera



Calibrazione, Proiezione e Ricostruzione



$$x - x_0 + f(x, y, x_0, y_0) = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y - y_0 + g(x, y, x_0, y_0) = -f \cdot \frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

3 attori:

- A) I punti nello spazio 3D: $\{\mathbf{P}(X, Y, Z)\}$
- B) I punti misurati sul piano immagine $\{\mathbf{p}(x, y, f)\}$
- C) I parametri $\{X_C, Y_C, Z_C, m_{ij}(\omega, \phi, k), f, x_0, y_0, \{ap_x\}, \{ap_y\}\}$

3 problemi:

- A) + B) \rightarrow C) Determinazione dei parametri del modello proiettivo (calibrazione).
- B) + C) \rightarrow A) Ricostruzione (ray intersection, VR).
- A) + C) \rightarrow B) Proiezione (augmented reality).

A.A. 2021-2022

28/46



Augmented reality at work (proiezione)



A.A. 2021-2022

29/46



Le operazioni richieste



- Posiziono l'oggetto virtuale nella scena reale manualmente
 - Definisco la sua posizione e orientamento
 - Definisco la sua grandezza (proiezione)ù
- Applico all'oggetto virtuale la stessa rototraslazione della camera
 - Calcolo la rototraslazione della camera a ogni frame (dallo spostamento di un insieme di punti identificati nella scena attraverso marker virtuali o reali)
 - Applico la stessa rototraslazione all'oggetto virtuale

A.A. 2021-2022

30/46

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



Calibrazione, Proiezione e Ricostruzione



$$x - x_0 + f(x, y, x_0, y_0) = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y - y_0 + g(x, y, x_0, y_0) = -f \cdot \frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

3 attori:

- A) I punti nello spazio 3D: $\{\mathbf{P}(X, Y, Z)\}$
- B) I punti misurati sul piano immagine $\{\mathbf{p}(x, y, f)\}$
- C) I parametri $\{X_C, Y_C, Z_C, m_{ij}(\omega, \phi, k), f, x_o, y_o, \{ap_x\}, \{ap_y\}\}$

3 problemi:

- A) + B) \rightarrow C) Determinazione dei parametri del modello proiettivo (calibrazione).
- B) + C) \rightarrow A) Ricostruzione (ray intersection, VR).
- A) + C) \rightarrow B) Proiezione (augmented reality).

A.A. 2021-2022

31/46



Set-up



Passive vision systems do not constraint cameras position.

Cameras have to be positioned to get the best volume coverage (every feature should be surveyed by at least two cameras) and to **view the volume of interest!**

Set-up requires:

- Cameras position
- Focusing (and possibly choice of a proper lens)
- Lens opening

Not all the cameras should view the same volume region.

**Optimal set-up may require some time
and/or
Multiple cameras are used.**

A.A. 2021-2022

32/46



In che cosa consiste la calibrazione



Determinazione dei parametri o di un loro sottoinsieme.

Determinazione dei parametri della trasformazione prospettica:

- **Parametri esterni:** $X_C, Y_C, Z_C, m_{ij}(\omega, \phi, k)$.
- Parametri interni: x_o, y_o, f .
- Parametri di distorsione (o parametri aggiuntivi): $g_1, g_2, g_3, g_4, k_1, \dots$

Calibrazione dei parametri esterni può essere fatta separatamente dai parametri interni e/o di distorsione.



Perchè calibrare?



- Per ottenere misure e ricostruzione **precise** degli oggetti.
- Per ricavare i parametri corretti della camera (focale, punto principale).
- Per rimuovere gli effetti della **distorsione** delle lenti (errori sistematici).
- Molto praticata in fotogrammetria / ridotta al minimo in computer vision.
- Per proiettare oggetti virtuali su camere.



Calibrations



2D calibration (camera calibration, estimate of interior parameters).

3D calibration (estimate of the exterior parameters).

Metodi:

- Scacchiere (Zhang et al., Software in Matlab e OpenCV)
- Barra rigida con 2 marker (Borghese e Cerveri, 2000; utilizzata nei sistemi di Mocap; e.g. nello SMART-3D).
- Griglie 3D (non più utilizzato, Borghese et al., 1990)

Metodi ibridi:

- **Structure from Motion (SfM)**, **SLAM** (Simultaneous Localization and Mapping), vengono ricostruite le coordinate 3D dei punti, stimati i parametri interni e determinato il movimento. Molto utilizzata in robotica.

Algoritmi:

- DLT (Direct Linear Transform -> da 9 parametri, si passa a 12 in un sistema lineare).
- Bundle adjustment. Stima iterativa dei parametri.

A.A. 2021-2022

35/46



2D Camera Calibration (determinazione dei parametri interni)



On the bench – surveying a regular grid of fiducial points (→ camere metriche).

Off the bench (on the field) – distortion parameters are estimated with the geometrical parameters of the set-up (external parameters).



A.A. 2021-2022

36/46



Calibrazione con punti in posizione nota



- Pattern (3D) di punti in posizione nota (test field).
- Misurazione dei punti.
- Determinazione dei parametri.

Per ciascun punto ho 2 equazioni di collinearità.

Ho $9 + D$ parametri aggiuntivi.

Ho bisogno di $(9 + D) / 2$ punti di controllo (ogni punto di controllo \rightarrow 2 equazioni).

$$x - x_0 + f(x, y, x_0, y_0) = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y - y_0 + g(x, y, x_0, y_0) = -f \cdot \frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

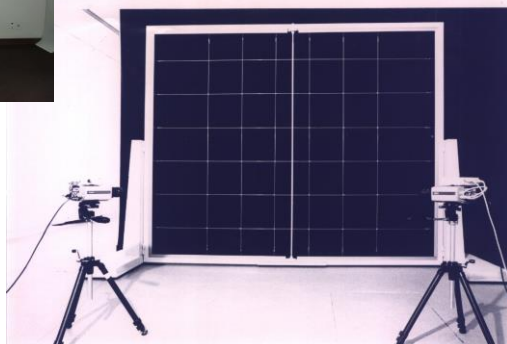
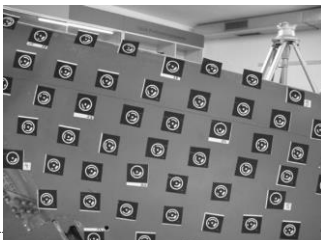
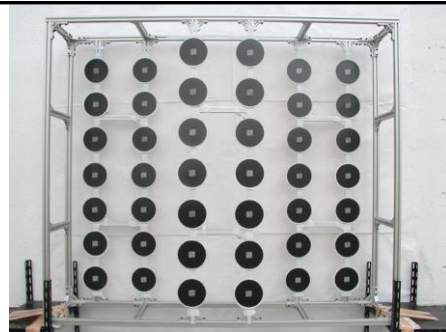
A.A. 2021-2022

37/46




Test field (Known control points)

3D structures, which carry the control points are required. They should cover the working volume.




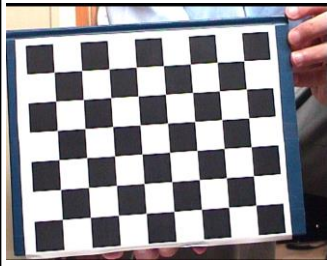
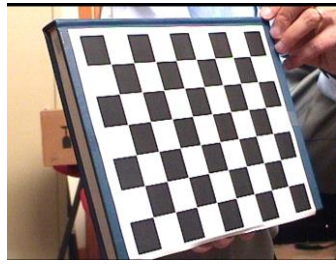
A.A.

38/46



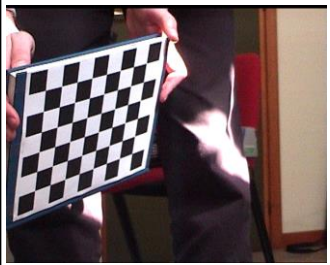
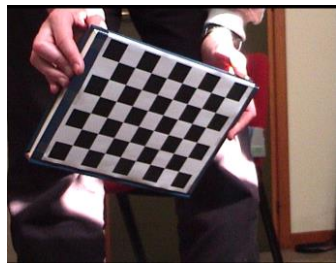
Calibration through a chessboard



Estimated
Parameters.

Distortions
Internal
External





<http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>


Also suite in Matlab

A.A. 2021-2022

39/46

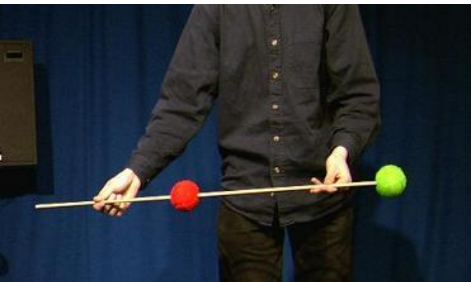
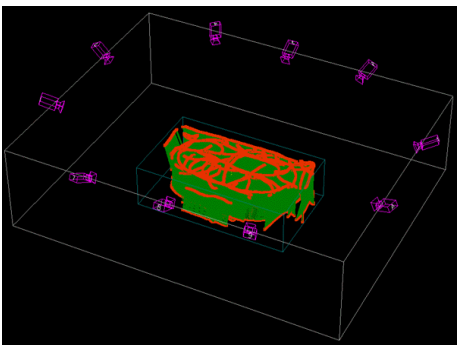


Wand Calibration



2 steps:


- Establish external reference system (and initialize estimate)
- “Refinement”: estimate of the parameters.


Wand itself can give a preferential reference system (and it can be used to recover the scale factor, video).

A.A. 2021-2022

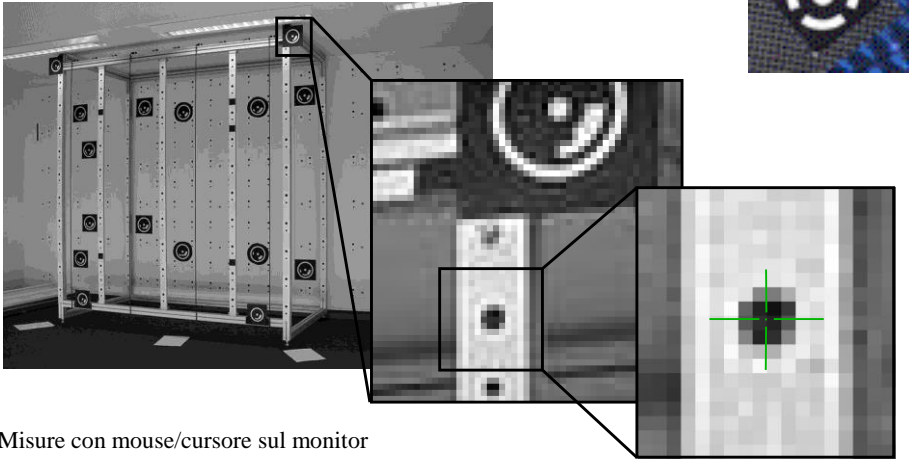
40/46



Misurazione manuale dei punti di controllo




Coded target




Misure con mouse/cursore sul monitor
Precisione: 1/4 - 1/8 Pixel

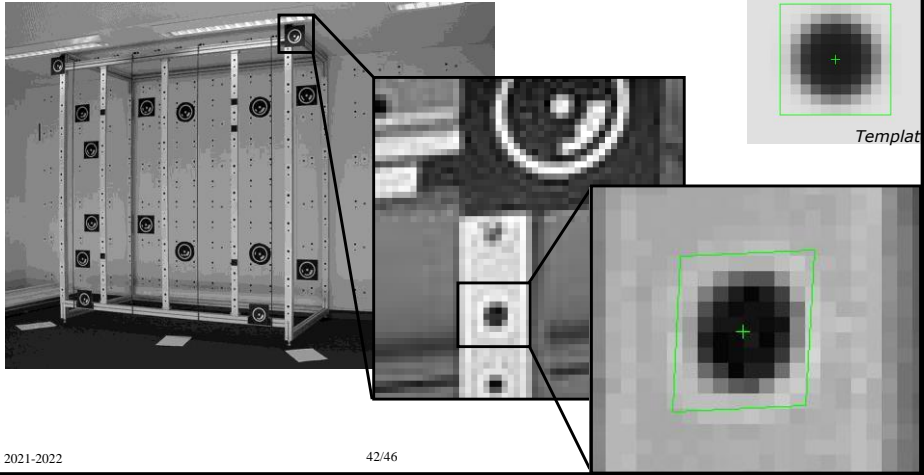
A.A. 2021-2022 41/46





Misurazione automatica dei control points



Template Matching (least square, cross-correlazione)



A.A. 2021-2022 42/46



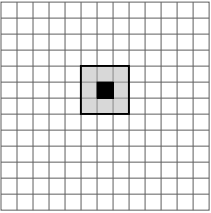
Cross-correlazione

Calcolo il coefficiente di correlazione piu' alto all'interno di una finestra di ricerca

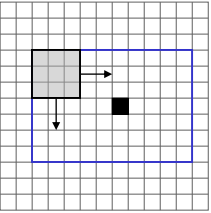
$$\gamma(x, y) = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R}$$


$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (g_L(x_i, y_j) - \bar{g}_L)^2}{mn-1}} \quad \sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)^2}{mn-1}} \quad \sigma_{LR} = \frac{\sum_i \sum_j ((g_L(x_i, y_j) - \bar{g}_L)(g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R))}{nm-1}$$


finestra di correlazione



finestra di ricerca





 Conjugate pixels

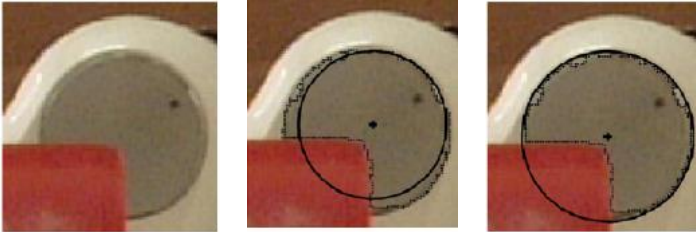
 Search window

A.A. 2021-2022

43/46

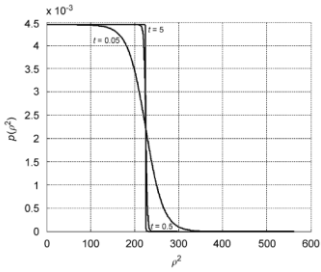


Approccio statistico al circle fitting



Frosio, Borghese – Pattern Recognition - 2008

$$L(\mathbf{p}_C, R_C) = \prod_{i=1}^N p(\rho_i^2, R_C).$$



A.A. 2021-2022

44/46



Calibrazione, Proiezione e Ricostruzione



3 attori:

- A) I punti nello spazio 3D: $\{\mathbf{P}(X,Y,Z)\}$
- B) I punti misurati sul piano immagine $\{\mathbf{p}(x,y,f)\}$
- C) I parametri $\{X_C, Y_C, Z_C, m_{ij}(\omega, \phi, k), f, x_o, y_o, \{ap_x\}, \{ap_y\}\}$

3 problemi:

- A) + B) \rightarrow C) Determinazione dei parametri del modello proiettivo (calibrazione).
- B) + C) \rightarrow A) Ricostruzione (ray intersection, VR).
- A) + C) \rightarrow B) Proiezione (augmented reality).



Sommario



- La trasformazione proiettiva
- Calibrazione