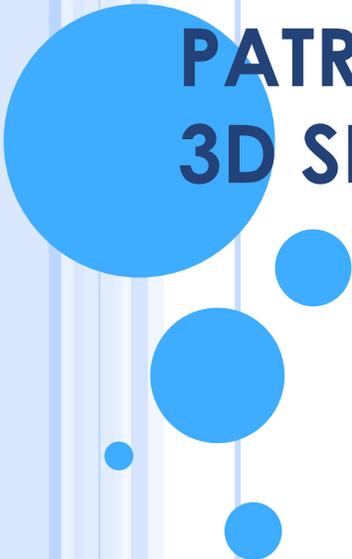


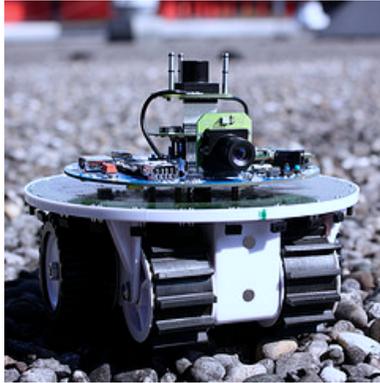
Corso di Progettazione di Sistemi di Controllo

A cluster of five blue circles of varying sizes, with the largest one on the left and others scattered to the right and below it.

PATROLLING AND TRACKING IN 3D SPACE

Balsemin Antonio
Scotton Francesco
Todescato Marco

CAMPI DI APPLICAZIONE

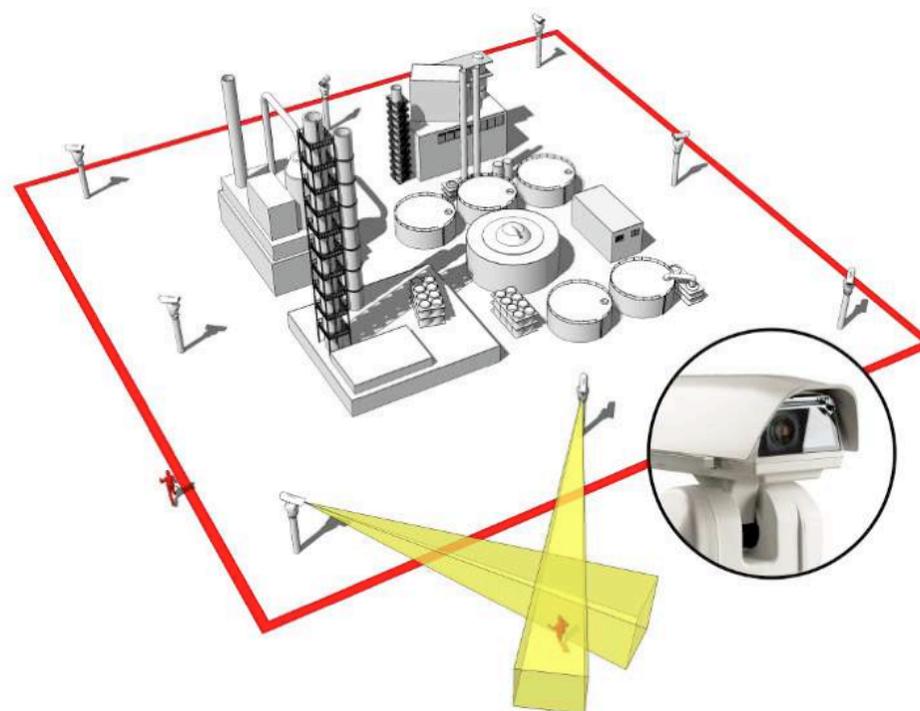


- Videosorveglianza
- Monitoraggio di Sistemi Industriali
- Monitoraggio di vaste aree geografiche
- Robot mobili



PATROLLING E TRACKING

Patrolling: pattugliare un perimetro per minimizzare il tempo di visita di ogni suo punto

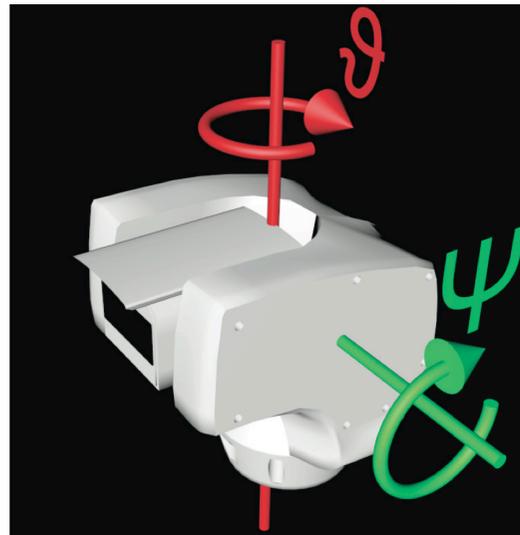


Tracking: capacità di riconoscere ed inseguire un evento improvviso (target)

SCOPO DEL PROGETTO

- Algoritmo
 - Efficiente
 - Robusto
 - Scalabile

di **patrolling** e **tracking** per una rete di videocamere mobili al fine di sostituire l'operatore umano



PTZ

- Pan θ
- Tilt ψ
- Zoom

PERCHE'?



Operatore **umano**



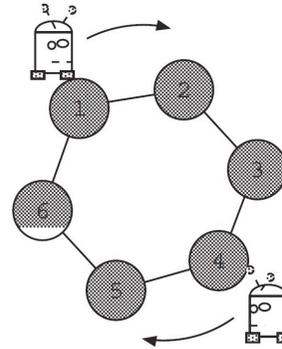
Difficoltà a mantenere
l'attenzione

Un sistema **automatico** è in grado di gestire molte informazioni contemporaneamente e reagire in maniera ottima. Tuttavia è meno flessibile.

STATO DELL'ARTE: AMBITO SCIENTIFICO

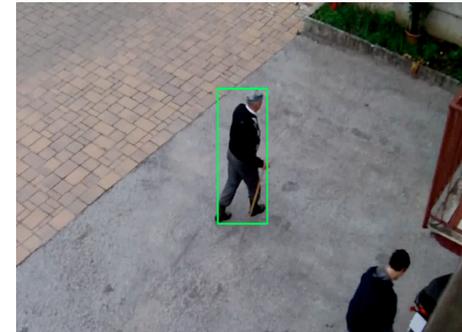
- Multi agent patrolling

- Soluzioni distribuite
- Trattazione del problema in 1D



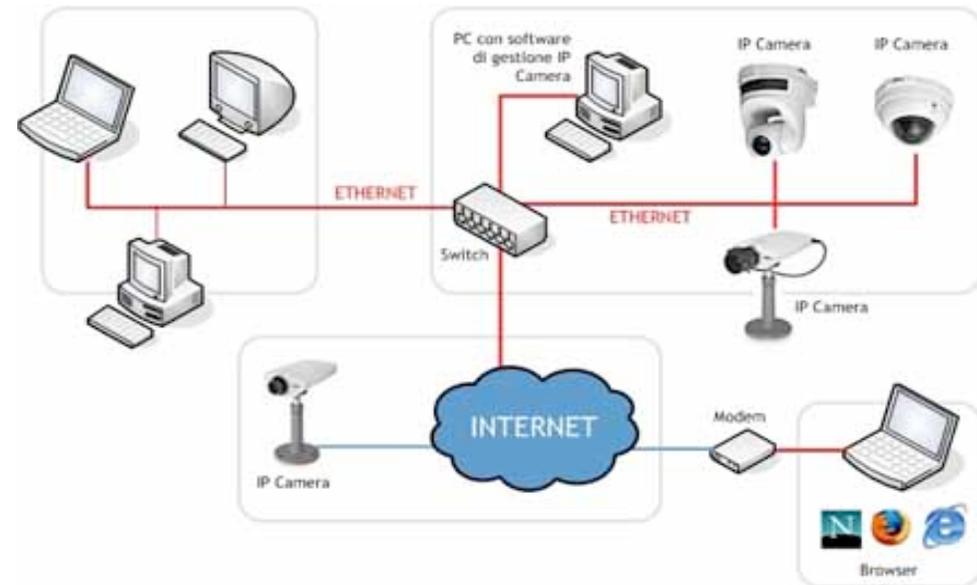
- Tracking

- Problema di controllo non di visione computazionale
 - Utilizzo del filtro di Kalman (KF) o del filtro particellare (PF) e il filtro di Kalman esteso (EKF) insieme
- Ricerca algoritmo da poter utilizzare



STATO DELL'ARTE: AMBITO COMMERCIALE

- Tecnologia video di rete: telecamere IP
 - Dotate di un controllore “personale”
 - Collegabili in un punto qualsiasi della rete
 - Accesso da remoto
- Telecamere PTZ controllate in posizione
- Tracking di eventi di ogni tipo. In genere comandi in posizione alle telecamere per inseguire l'evento

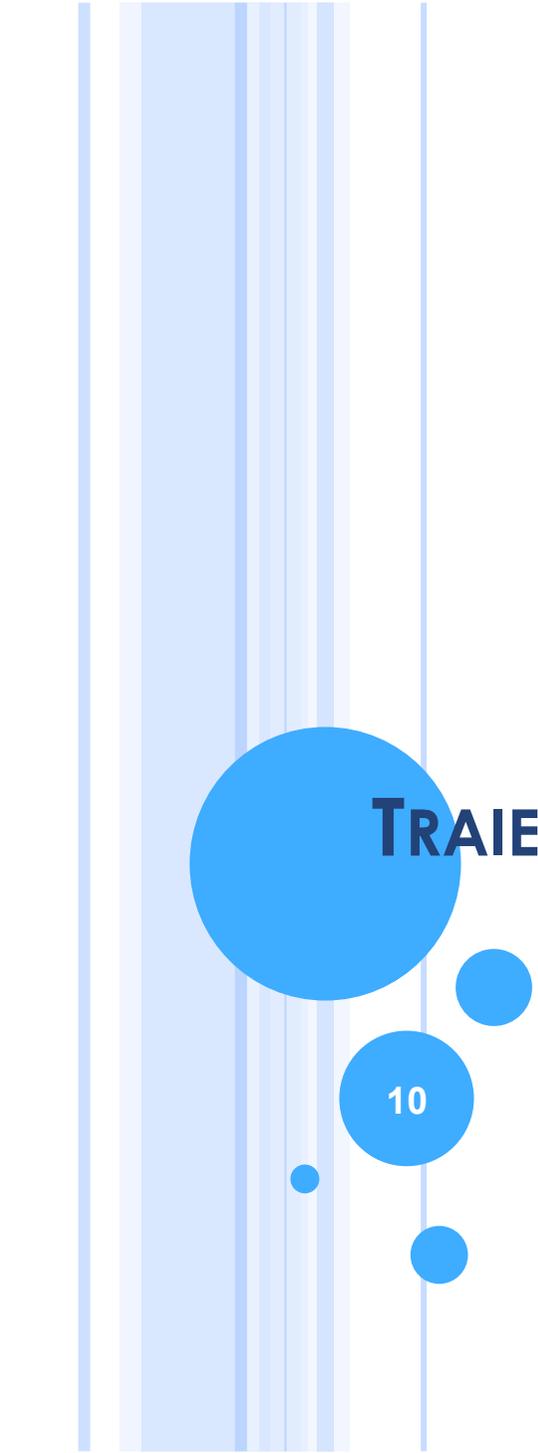


IL NOSTRO ALGORITMO

- È in grado di gestire il pattugliamento di un'arbitraria traiettoria 3D
- È di tipo distribuito
- È molto robusto ad eventuali guasti delle videocamere
- Implementa un controllo di zoom
- Muove le videocamere tramite comandi in velocità
- Consente l'inseguimento del target in maniera fluida
- E' stato testato su una rete reale di 3 telecamere PTZ

PROBLEMATICHE DA AFFRONTARE

- Individuazione della traiettoria di patrolling
- Calibrazione delle videocamere
- Movimentazione e controllo delle videocamere
- Comunicazione delle videocamere e partizionamento ottimo della traiettoria 3D
- Tracking di eventi

The left side of the slide features a decorative graphic consisting of several vertical bars of varying heights and shades of blue, and a cluster of five blue circles of different sizes. One of the circles contains the number '10'.

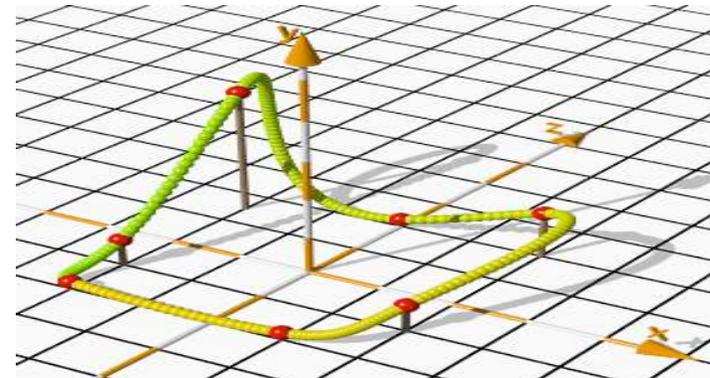
TRAIETTORIA DI PATROLLING

10

TRAIETTORIA DI PATROLLING: SPLINE 3D

- Definizione dei punti di controllo
- Creazione della curva a tratti interpolante i punti:
 - Polinomi cubici

$$\begin{aligned}x_i &= a_{x_i} + b_{x_i}u_i + c_{x_i}u_i^2 + d_{x_i}u_i^3 \\y_i &= a_{y_i} + b_{y_i}u_i + c_{y_i}u_i^2 + d_{y_i}u_i^3 \\z_i &= a_{z_i} + b_{z_i}u_i + c_{z_i}u_i^2 + d_{z_i}u_i^3\end{aligned}$$

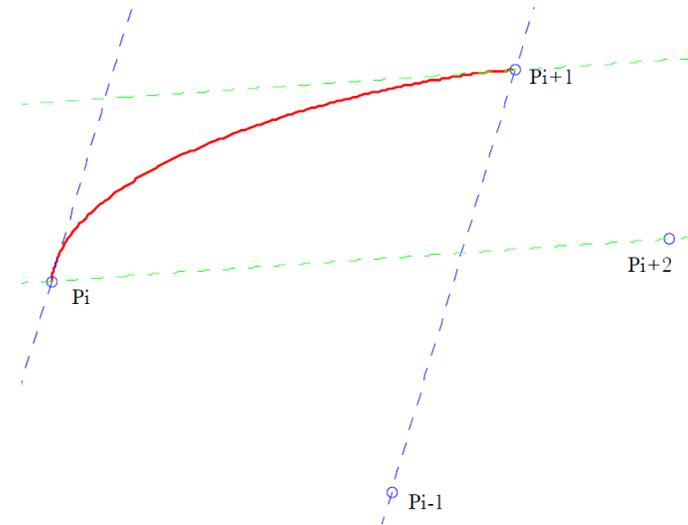


- Ricerca metodo per ricondursi al caso 1D

IDEA DEL METODO UTILIZZATO

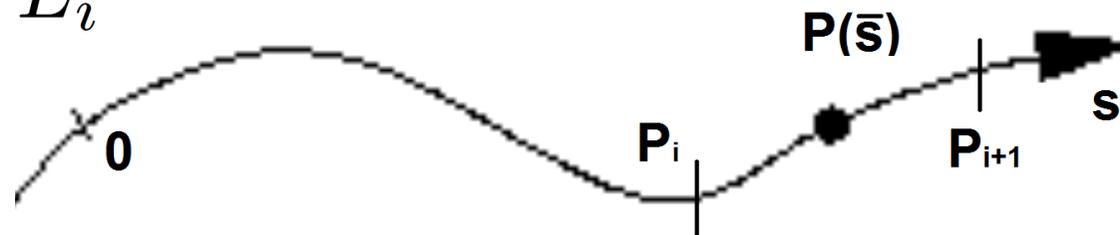
- Vincoli :

- Passaggio curva punti di controllo
- Pendenze nei punti di controllo

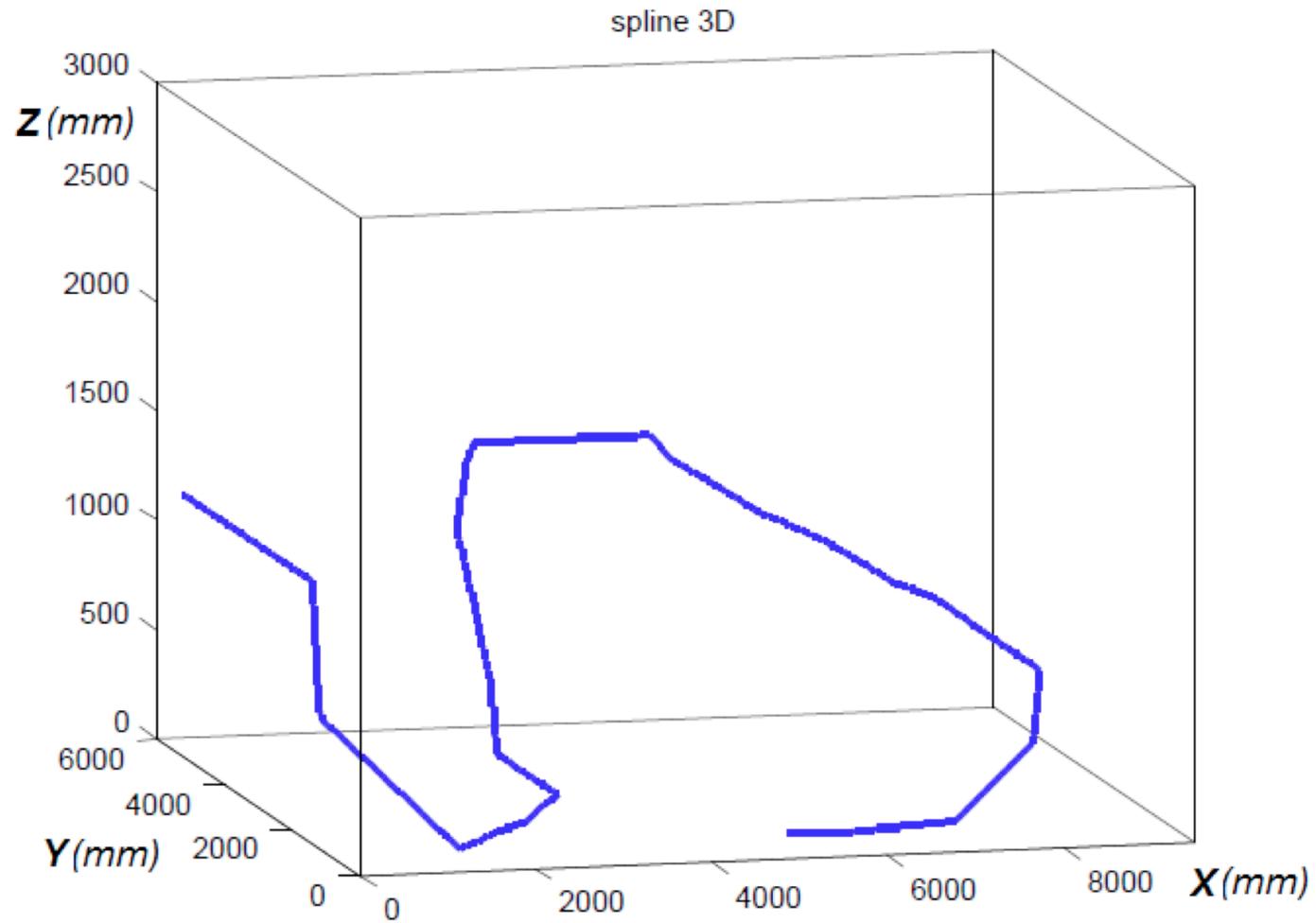


- Parametrizzazione ascissa curvilinea in modo da rettificare la curva 3D

$$u_i = \frac{\bar{s} - L_i}{L_{i+1} - L_i}$$



LA NOSTRA SPLINE



RICOSTRUZIONE NEL NAVLAB DELLA SPLINE SCELTA





CALIBRAZIONE TELECAMERE

15

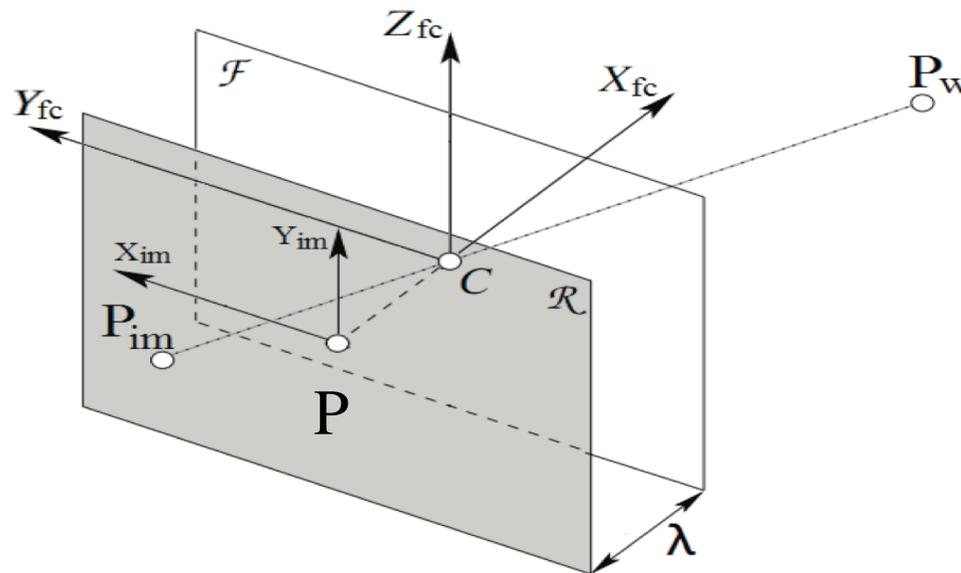
CALIBRAZIONE TELECAMERE

Ricavare i parametri descrittivi della telecamera

- Ipotesi:

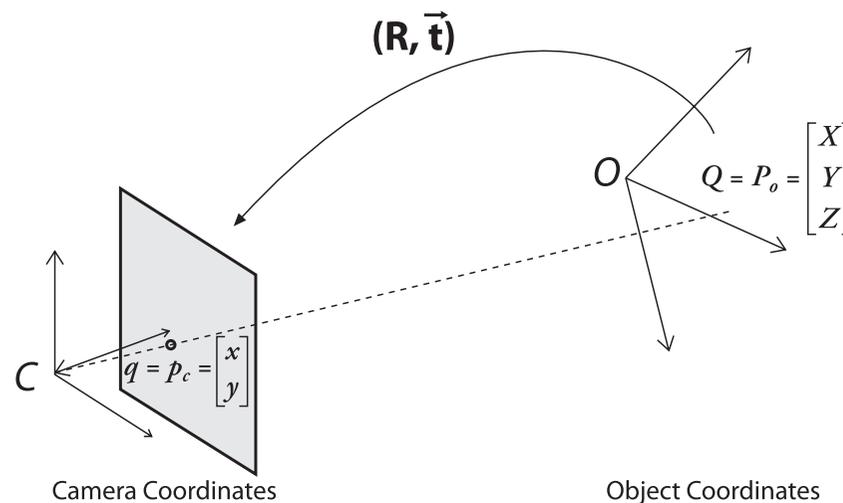
- Modello pinhole: unico raggio di luce
- Assenza di distorsione: procedura di Undistortion

- λ : lunghezza focale
- C : centro ottico
- \mathcal{R} : piano immagine
- \mathcal{F} : piano focale
- X_{fc} : asse ottico
- P : punto principale



PARAMETRI DELLA VIDEOCAMERA

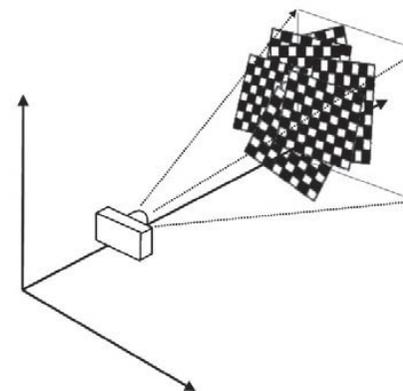
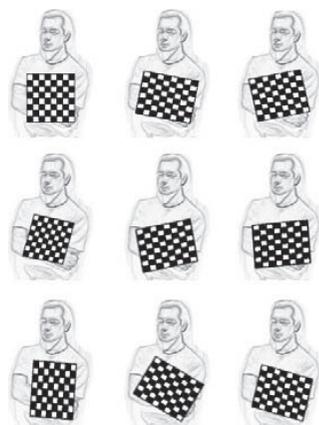
- Intrinseci
 - lunghezza focale
 - coordinate del punto principale
- Estrinseci
 - vettore di traslazione dal centro del sistema di riferimento della camera a quello dell'oggetto
 - matrice di rotazione tra i sistemi di riferimento



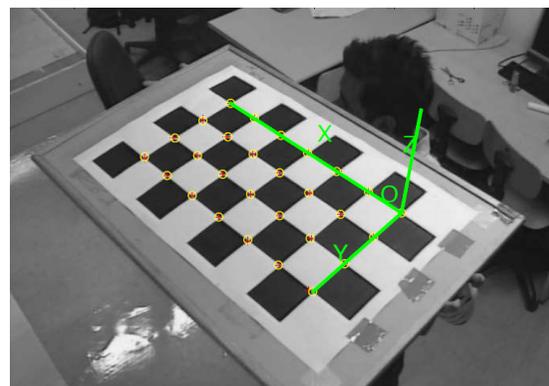
PROCEDURA DI CALIBRAZIONE

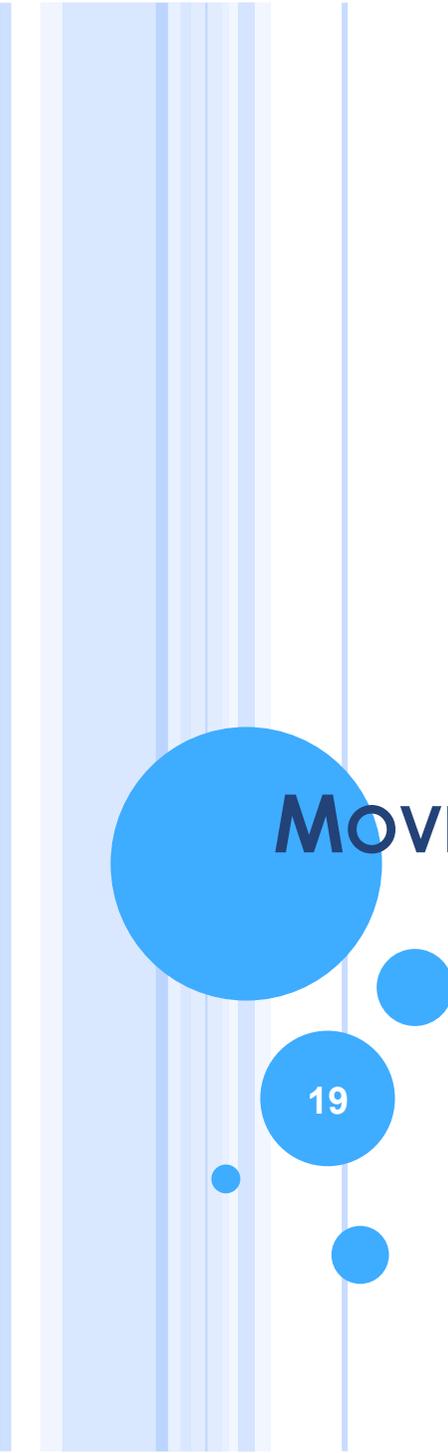
- o procedura **manuale** mediante toolbox MATLAB (Bouguet)

- Prima fase:
Estrazione parametri intrinseci



- Secondo fase:
Estrazione parametri estrinseci tramite gli intrinseci ricavati (procedura unidistortion)



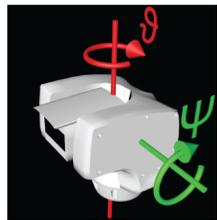
The left side of the slide features a decorative graphic consisting of several vertical bars of varying heights and widths, with a gradient from light to dark blue. To the right of these bars are several blue circles of different sizes, some overlapping each other. The largest circle is positioned behind the main title text.

MOVIMENTAZIONE DELLE TELECAMERE

19

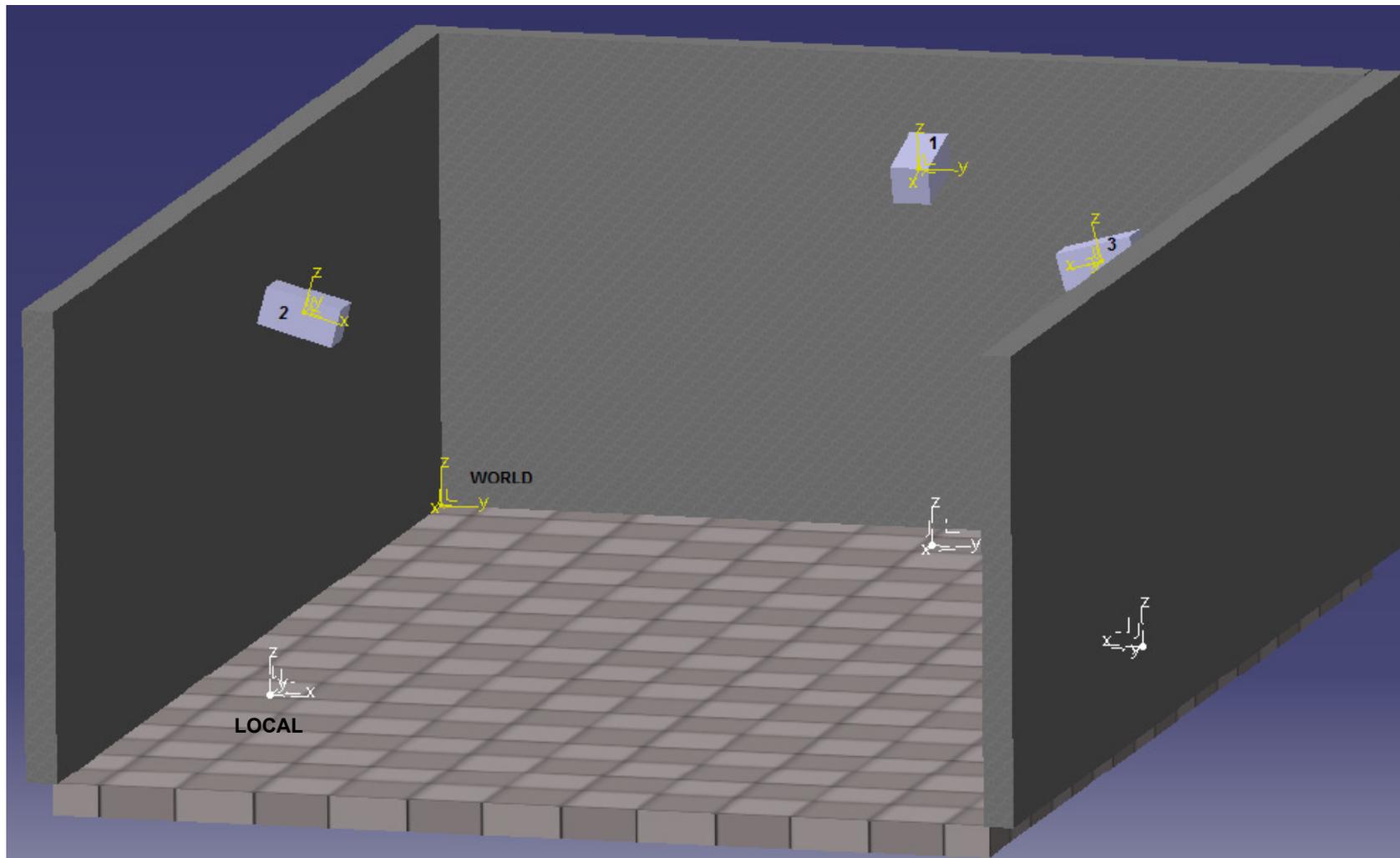
CINEMATICA

- Le videocamere si muovono cambiando il valore degli angoli di pan ϑ e tilt ψ

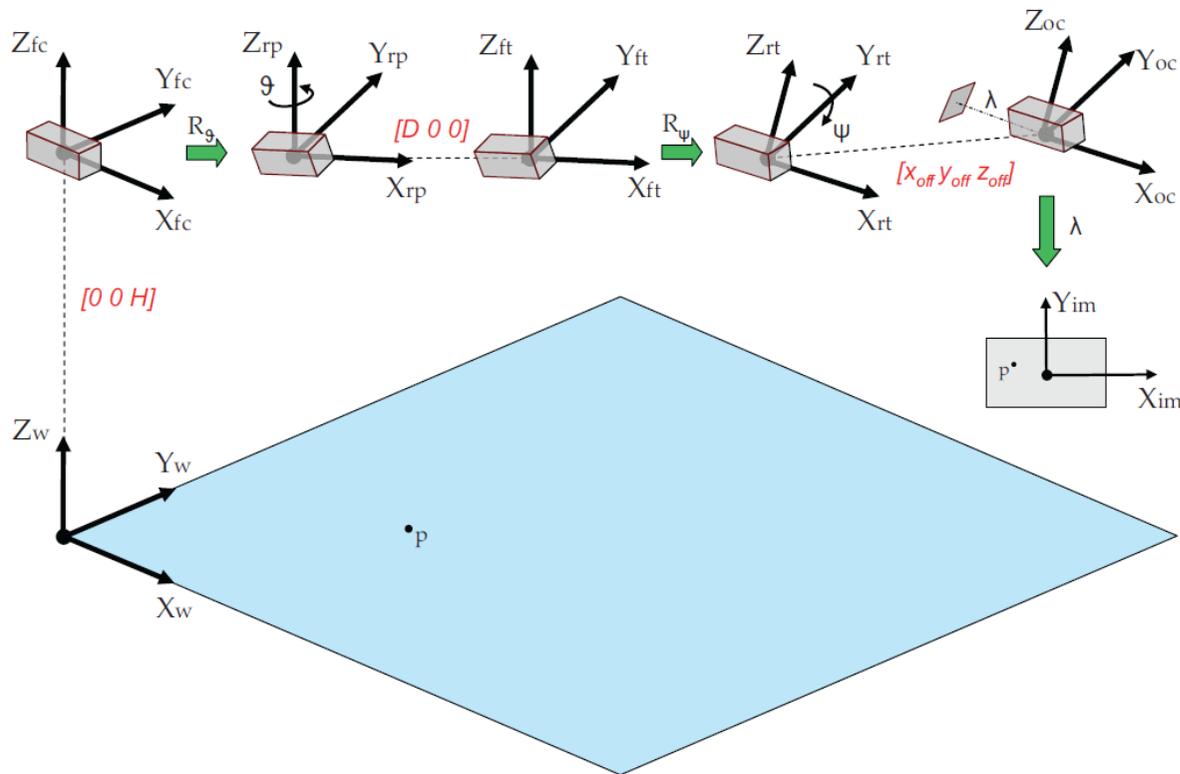


- Necessità di muovere la videocamera in un determinato punto dello spazio 3D
 - Definire un sistema di riferimento globale
 - Metodo di conversione dei “punti” PTZ in punti 3D espressi nel sistema scelto e viceversa

IL NOSTRO AMBIENTE



IL MODELLO MECCANICO DELLA TELECAMERA



$$\begin{bmatrix} x_{wloc} \\ y_{wloc} \\ z_{wloc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} + R_\theta \left(\begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_\psi \left(\begin{bmatrix} x_{off} \\ y_{off} \\ z_{off} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{oc} \\ y_{oc} \\ z_{oc} \end{bmatrix} \right) \right)$$

$$R_\theta = \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\theta & 0 \\ s_\theta & c_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_\psi = \begin{bmatrix} c_\psi & 0 & s_\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\psi & 0 & c_\psi \end{bmatrix}$$

IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DEL MODELLO

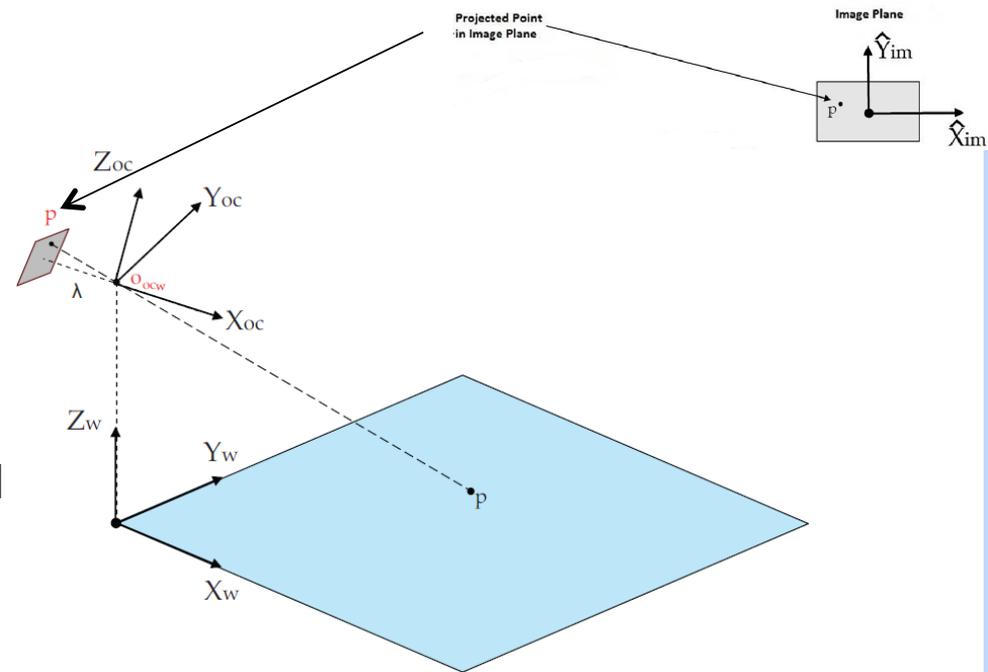
- ricavare H , D , x_{off} , y_{off} , z_{off} :
 - Si pone la scacchiera in diverse posizioni
 - Si misurano le coordinate del centro del sistema di riferimento della scacchiera rispetto il sistema globale $[x_{wloc} \ y_{wloc} \ z_{wloc}]$ e rispetto quello della videocamera $[x_{oc} \ y_{oc} \ z_{oc}]$
 - Stima dei parametri tramite il metodo dei Minimi Quadrati

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} - R_\theta R_\psi \begin{bmatrix} x_{oc} \\ y_{oc} \\ z_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & R_\theta(1,1) & & \\ 0 & R_\theta(2,1) & R_\theta R_\psi & \\ 1 & R_\theta(3,1) & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ D \\ x_{off} \\ y_{off} \\ z_{off} \end{bmatrix}$$

CINEMATICA

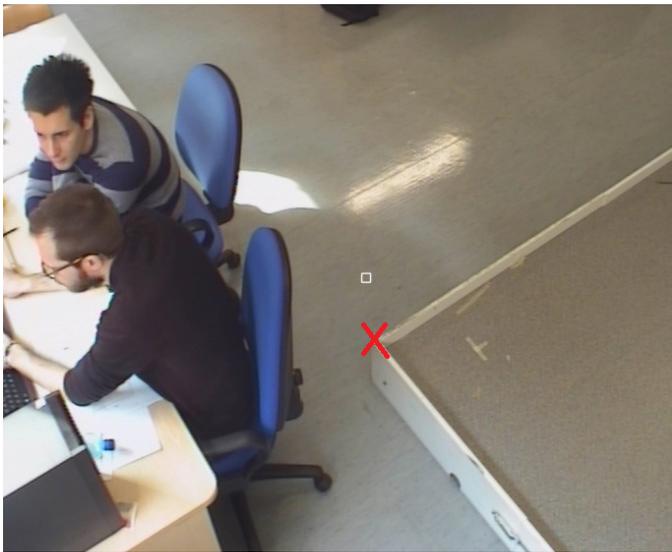
○ **Diretta:** date le coordinate di un punto nel piano immagine e gli angoli ϑ e ψ , calcola le coordinate della sua proiezione nel piano terra

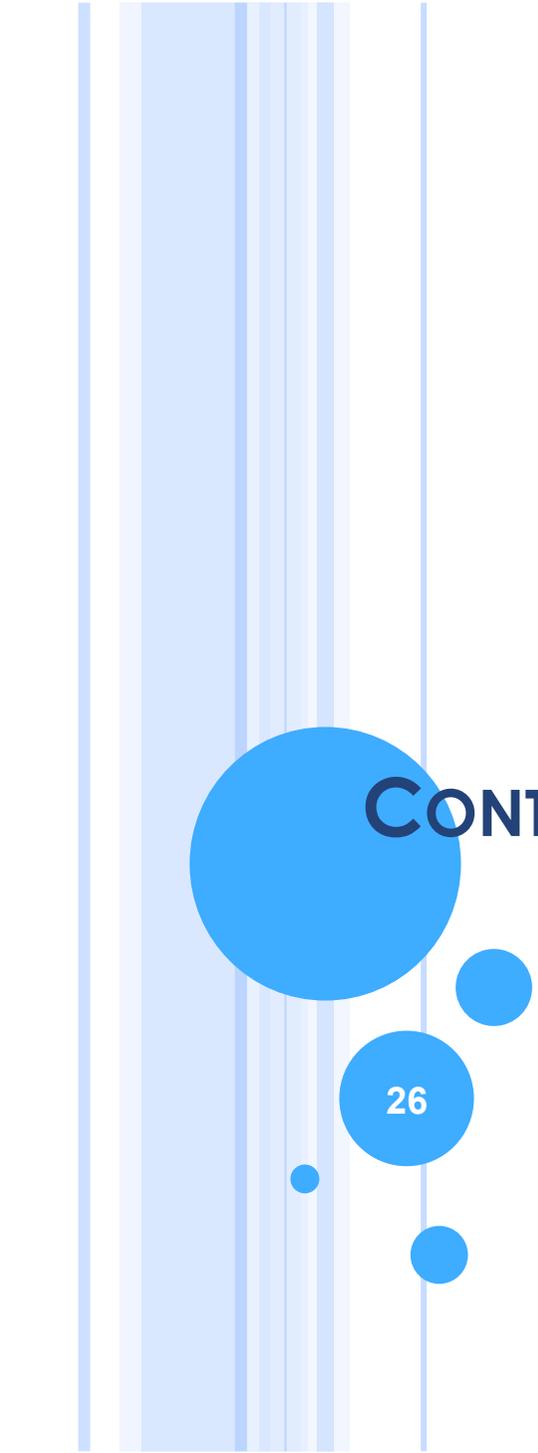
○ **Inversa:** date le coordinate di un punto nello spazio, calcola i valori di ϑ e ψ per muovere la videocamera in modo che il suo asse ottico intersechi tale punto



OSSERVAZIONI & TEST

- Singularità per $x_{wloc} = y_{wloc} = 0$
- Approssimazione di x_{oc} porta ad un errore nel calcolo dell'angolo ψ
- Offset angolo ψ
- Errori dovuti alle ipotesi effettuate: modello pinhole, misure manuali, stima MQ



The left side of the slide features a decorative graphic consisting of several vertical bars of varying heights and widths, and a cluster of five blue circles of different sizes. The largest circle is positioned behind the main title. The other circles are arranged in a roughly vertical line to the right of the largest one, with the number '26' inside the second circle from the top.

CONTROLLO VIDEOSCAMERE

26

Controllo in Velocità & Controllo di Zoom

CONTROLLO IN VELOCITÀ

Problema: i comandi in posizione causano un movimento discontinuo



Necessità di comandi in velocità per rendere il movimento fluido

○ Ipotesi:

- Movimento dell'ascissa curvilinea a velocità costante, vel , lungo la traiettoria pianificata
- Istanti di controllo dt limitati inferiormente (comunicazione seriale)



$$ds = vel * dt$$

CONTRIBUTO DI FEED-FORWARD

- Presi due valori successivi di ascissa curvilinea s_1 e $s_2 = s_1 + ds$, calcola i corrispondenti punti 3D, x_1 e x_2
- Calcola i valori di pan e tilt tramite la cinematica inversa per x_1 e x_2

$$dp = \theta_2 - \theta_1$$

- Calcola gli incrementi

$$df = \psi_2 - \psi_1$$

- Calcola i valori di velocità approssimate

$$v_{pan-ff} = \frac{dp}{dt}$$

$$v_{tilt-ff} = \frac{df}{dt}$$



**CONTROLLO IN
CATENA APERTA**

CONTRIBUTO PROPORZIONALE

- Il solo feed-forward **non** è risultato **efficace**



RETROAZIONE DI POSIZIONE

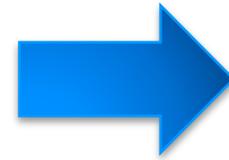
- Utilizzo misure degli angoli di pan e tilt (encoder)

$$v_{pan} = v_{pan-ff} + Kp_{pan} * (\theta_{ff} - \theta_{mis})$$

$$v_{tilt} = v_{tilt-ff} + Kp_{tilt} * (\psi_{ff} - \psi_{mis})$$

PROBLEMATICHE

- Perdita di comandi da parte della seriale (minimo tempo di attesa)
- Imperfetta sincronia tra comando ed esecuzione
- Tempo effettivo di percorrenza della curva maggiore di quello pianificato
- Misure errate degli angoli di pan e tilt



LINEA SERIALE

TUNING DEL CONTROLLO

- Definire un criterio (metriche) per tarare il controllo

- T_{eff} vs $T_{teorico} = \frac{L}{vel}$

- Media $m_{pan} = \sum_i \frac{(\theta_{iff} - \theta_{imis})}{N_{correct}}$

- Varianza $var_{pan} = \sum_i \frac{(\theta_{iff} - \theta_{imis} - m_{pan})^2}{N_{correct}}$

- Procedura di Tuning:

- Scelta della velocità dell'ascissa lungo la spline vel
- Scelta del passo di discretizzazione ds
- Scelta del valore delle costanti di controllo

TEST CONTROLLO IN VELOCITÀ

- Velocità fissata a $vel=450$ mm/s , (L circa 7m)

- Scelta passo ds

passo ds (mm)	250	350	500	600	650	700	800
T_{eff} (s)	19.91	18.68	17.74	16.38	16.03	17.10	15.47
$T_{teorico}$ (s)	15.6	15.6	15.6	14.7	14.4	15.6	14.2
$T_{eff} - T_{teorico}$	4.31	3.08	2.14	1.68	1.63	1.5	1.27

- Scelta guadagni $Kp_{pan} = Kp_{tilt} = Kp$

Kp	m_{pan}	m_{tilt}	var_{pan}	var_{tilt}
2	0.71	0.5	25	15
1.7	0.3	0.1	5	1.4
0.8	0.25	0.03	0.45	0.03
0.5	0.05	0.02	0.42	0.06

CONTROLLO DI ZOOM

- **Obiettivo:** mantenere sempre delle stesse dimensioni un oggetto inquadrato a monitor al variare della distanza dalla videocamera
- **Problema:** Zoom discretizzato 1x,2x,...

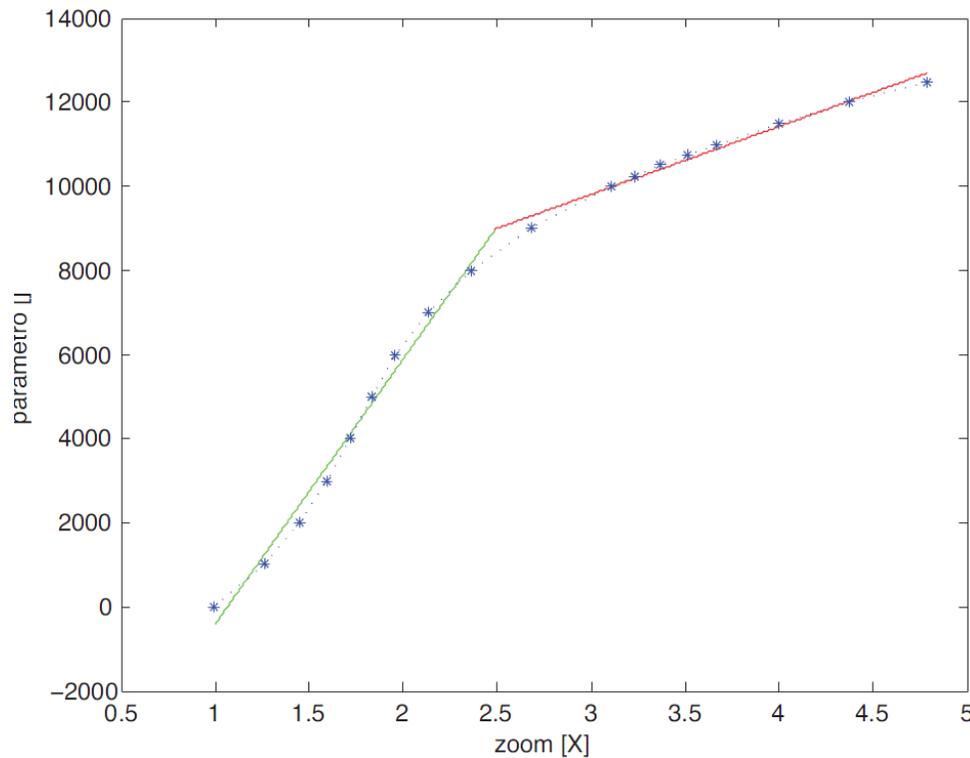


Necessità di impostare livelli di zoom intermedi per un controllo più accurato

ZOOM CONTINUO

- Set livello di zoom

- 16384 livelli diversi : livello 0 è 1x, livello 16384 10x
- Il valore di zoom in x non aumenta linearmente all'aumentare del livello



interpolazione

IDEA DEL CONTROLLO

- Rapporto di zoom : “quanto grande si vuole inquadrare un oggetto”

$$R_{zoom} = \frac{d_0}{z_0}$$

- Varia lo zoom in modo da mantenere il rapporto costante

$$z = \frac{d}{R_{zoom}}$$

- Distanza valutata con la funzione di cinematica diretta

[VIDEO](#)

PROBLEMATICHE

- Calibrazione videocamera

2x

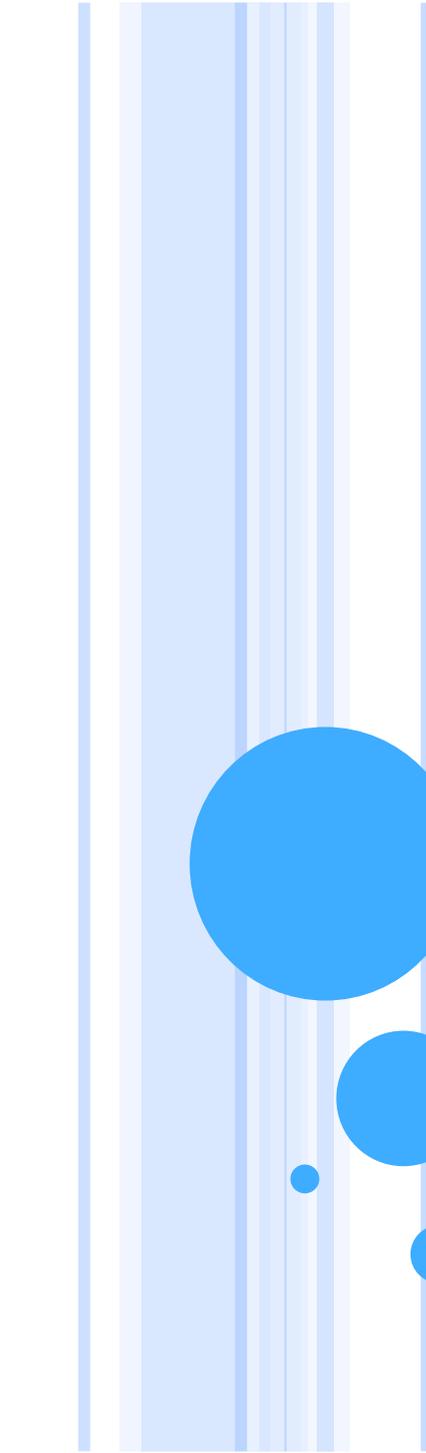


- Calcolo distanza oggetto

6x



- Metodo di approssimazione migliore dei livelli di zoom

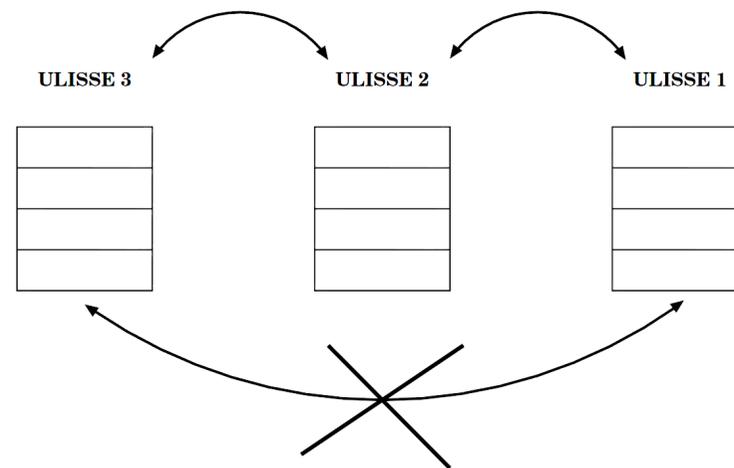


**COMUNICAZIONE VIDEOCAMERE E
PARTITIONING**

COMUNICAZIONE VIDEOCAMERE

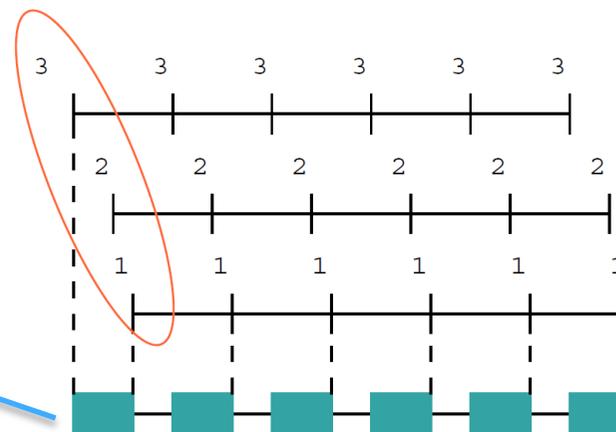
- Rete LAN protocollo TCP/IP

- Simulazione comunicazione locale



- Comunicazione sincrona

Round di comunicazione



PARTITIONING

Suddividere in maniera **ottima** l'area da pattugliare

- ogni telecamera comunica solo con i vicini
- Grazie alla parametrizzazione in ascissa curvilinea, si riconduce il problema al caso 1D
 - Scegliere ordine telecamere nella rete
 - Determinare range fisici (singolarità, topologia dell'area)
- Velocità di percorrenza nella traiettoria pari a vel per ogni telecamera

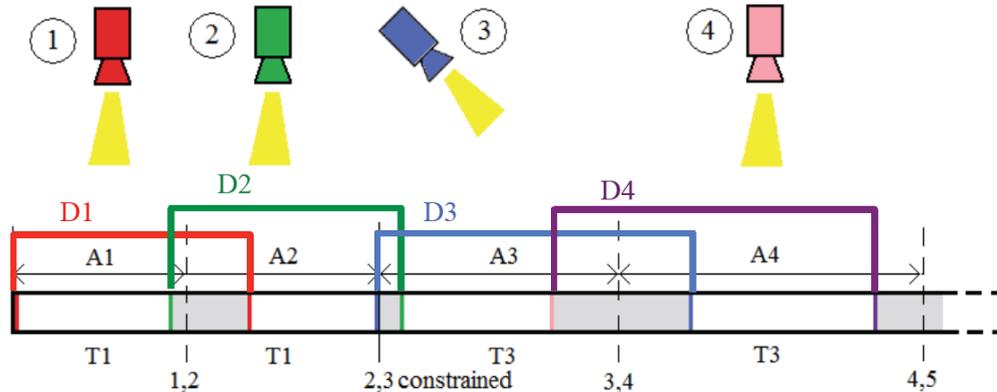
IDEA DELL'ALGORITMO DI PARTITIONING 1/2

- Estremi di patrolling

$$D_i = [D_{i,inf}, D_{i,sup}]$$

$$A_i = [a_{i,l}, a_{i,r}]$$

$$A_i \subseteq D_i$$



- Ogni telecamera:

- si muove in modo che la corrispondente ascissa curvilinea s_i percorra A_i a velocità v_{el} (controllo velocità)
- invia (round di comunicazione) alle adiacenti il valore dei propri estremi di patrolling

- Criterio di aggiornamento

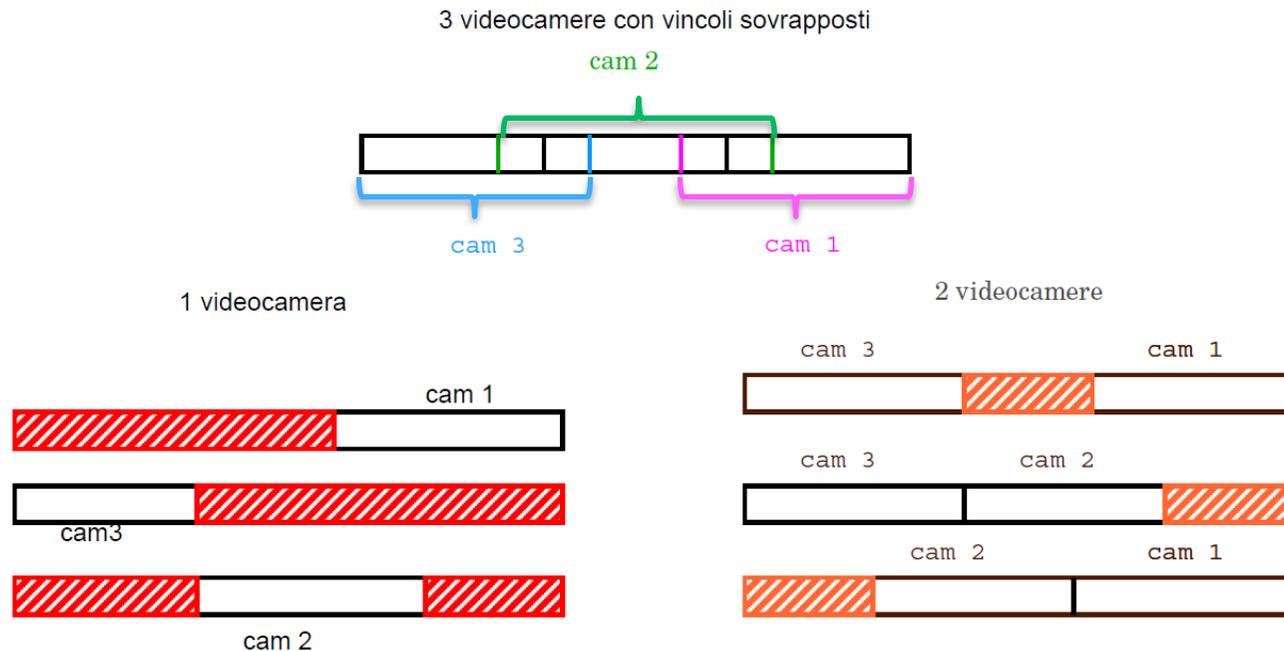
$$\frac{a_{i,l}(t+1) - a_{i-1,l}(t)}{v_{i-1}} = \frac{a_{i,r}(t) - a_{i,l}(t+1)}{v_i} \longrightarrow a_{i,l}(t+1) = \frac{a_{i,r}(t)v_{i-1} + a_{i-1,l}(t)v_i}{v_{i-1} + v_i}$$

IDEA DELL'ALGORITMO DI PARTITIONING 2/2

- Se il nuovo estremo non soddisfa i vincoli

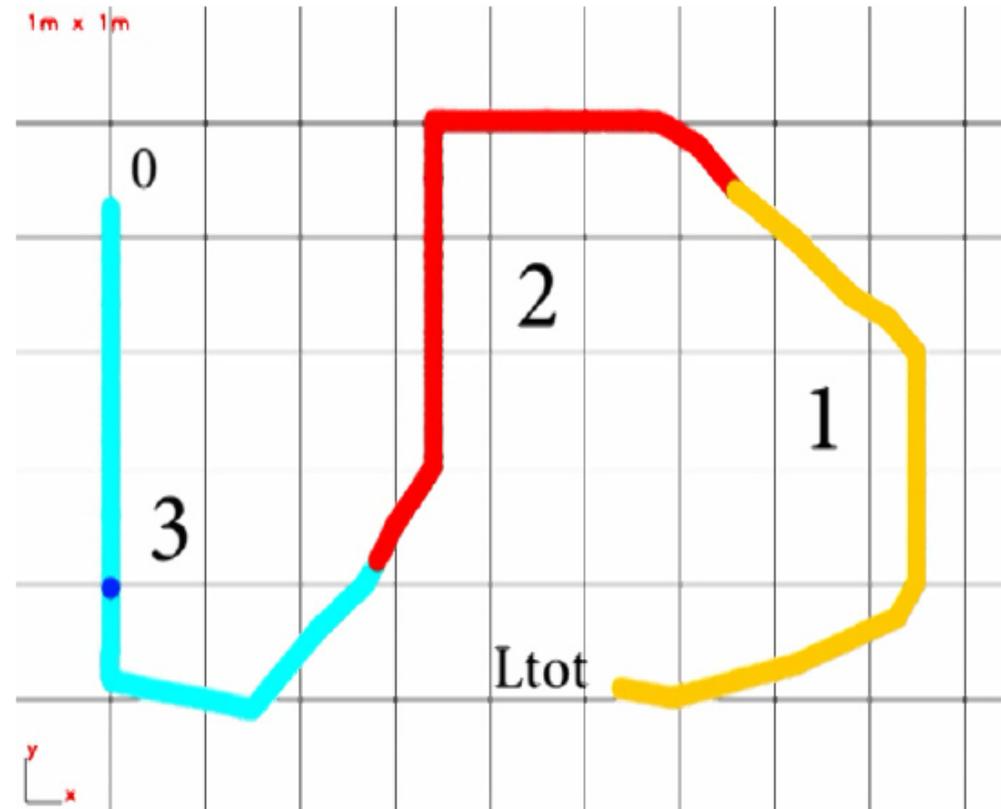
- Se $a_{i,l}(t+1) < D_{i,inf}$ $\longrightarrow a_{i,l}(t+1) = a_{i-1,r}(t+1) := D_{i,inf}$
- Se $a_{i,l}(t+1) > D_{i-1,sup}$ $\longrightarrow a_{i,l}(t+1) = a_{i-1,r}(t+1) := D_{i-1,sup}$

- Gestione guasti "critici"



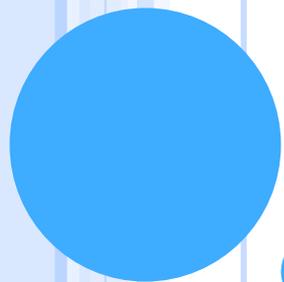
INTERFACCIA GRAFICA

Panoramica dall'alto della traiettoria pianificata



[VIDEO PARTITIONING](#)

[VIDEO PATROLLING](#)

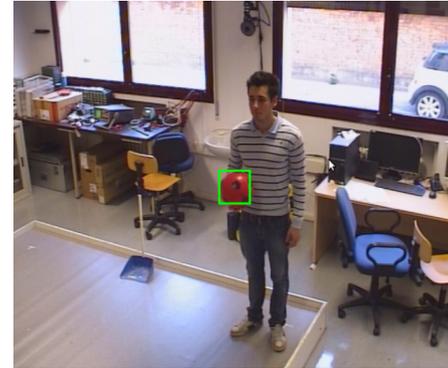


TRACKING

TRACKING

- Algoritmo di tracking utilizzato :

- Adatto a telecamere mobili
- Segue oggetti qualsiasi selezionati manualmente
- Ricerca il target nel caso venisse perso



- **Obiettivo:** movimentazione delle telecamere per inseguire il target



- Sviluppate due tecniche di inseguimento del target

- Controllo in posizione
- Controllo in velocità

CONTROLLO IN POSIZIONE

○ Procedura:

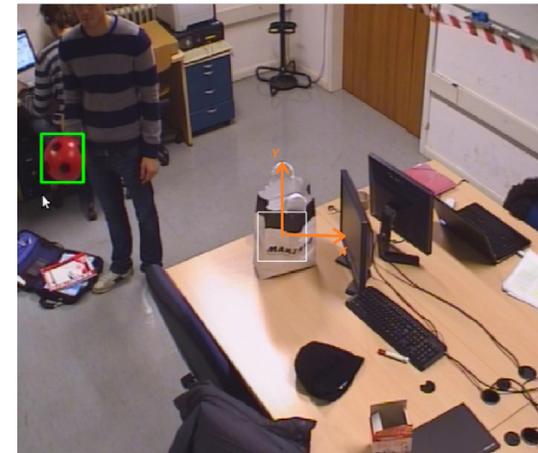
- Coordinate del centro del target nel piano immagine
- Coordinate 3D della proiezione del centro del target sul pavimento (cinematica diretta)
- Angoli pan e tilt tramite la cinematica inversa
- Movimentazione telecamera con gli angoli ricavati

○ Problematiche:

- Movimento “scattoso”
- Necessarie misure pan e tilt (ritardi)
- Imprecisioni cinematica: uso della *saturation box*



Target non perfettamente al centro del monitor



CONTROLLO IN VELOCITÀ

- È un controllo nel piano immagine



Note le coordinate in pixel del centro del target

$$v_{pan} = K_{pan} \cdot (x_{centro} - x_{pix}) = -K_{pan} \cdot x_{pix}$$

$$v_{tilt} = K_{tilt} \cdot (y_{centro} - y_{pix}) = -K_{tilt} \cdot y_{pix}$$

- Molto semplice ma efficace:
 - Misure angoli di pan e tilt non necessarie, meno ritardi
 - Movimento fluido
 - Non risente delle imprecisioni della cinematica
 - Non è necessaria *la saturation box*

TRACKING E PATROLLING

- Tracking prioritario
- Se una o più telecamere sono in tracking, le altre si dividono in maniera ottima la traiettoria
 - Pattugliamento aree lasciate scoperte
 - Rispetto limiti fisici
- Stato di tracking trattato in maniera simile a un guasto
- Se il target viene perso la telecamera torna in tracking

[VIDEO SWITCH PATROLLING TRACKING](#)

[VIDEO PATROLTRACK](#)

CONCLUSIONI

- L'algoritmo realizzato:
 - Gestisce il patrolling di una traiettoria arbitraria dello spazio
 - Garantisce un movimento fluido delle telecamere
 - È robusto ai guasti
 - Consente il tracking di eventi selezionati manualmente
- Tuttavia:
 - Procedure offline onerose (creazione traiettoria, calibrazione...)



Poco flessibile: non adatto all'uso commerciale

SVILUPPI FUTURI

- Calibrazione videocamere
- Modello telecamera con distorsione
- Definizione on-line del path
- Cambiamento velocità telecamere
- Controllo zoom in velocità
- Tracking automatico
- Ricostruzione posizione oggetto 3D

RINGRAZIAMENTI:

Luca Schenato

Nicholas Felicini

Stefano Ghidoni

Piero Donaggio