



DEPARTMENT OF
INFORMATION
ENGINEERING
UNIVERSITY OF PADOVA



Coordinazione distribuita di telecamere per patrolling di perimetri e tracking

Baseggio Mauro
Merlo Pierangelo
Pozzi Mauro

603399
607368
603717

mauro2386@gmail.com
pier.mlb@gmail.com;
mauropozzi86@gmail.com

Padova, 18 Febbraio 2010

Panoramica e campi di applicazione

Obiettivi:

- Coordinazione tra camere per svolgere patrolling di un percorso in modo ottimo
- Tracking prioritario di eventi

Possibili applicazioni:

- ambito militare;
- robot mobili per monitoraggio;
- ambiente industriale;
- videosorveglianza.



Telecamere PTZ (Pan Tilt Zoom)

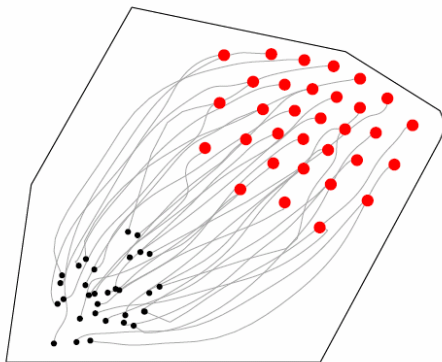
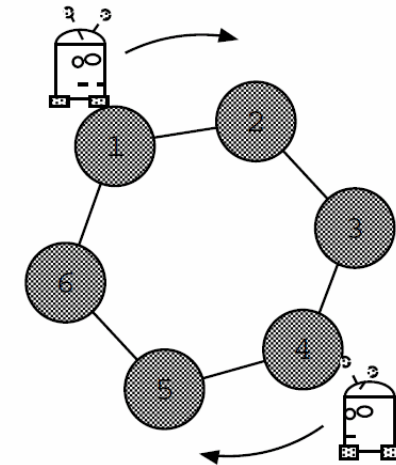
Panoramica e campi di applicazione

Tipologie di controllo:

- Operatore umano: costantemente concentrato, rischia di perdere dettagli. Oneroso se area grande;
- Controllo centralizzato: ottimizzazione e comunicazione globali, complessità computazionale, problemi in gestione di eventi complessi (priorità);
- Controllo distribuito: telecamere intelligenti, scambio di informazioni locali: ottimo rispetto a obiettivo e robustezza.

Modellizzazione dell'ambiente da sorvegliare

- Orientata principalmente ad ambienti 2D (sorveglianza di aree)
- Struttura a grafo per l'ambiente (nodi di interesse) o per la comunicazione

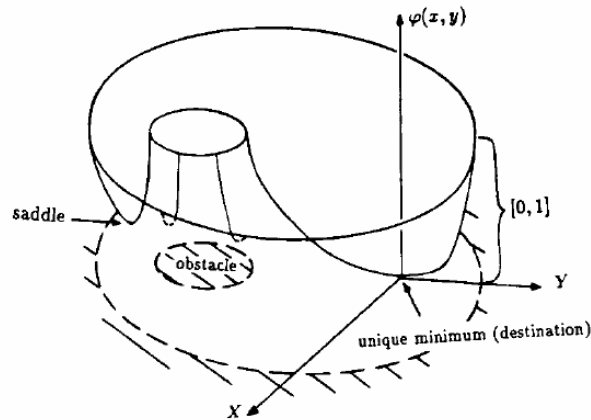


- Path planning per il patrolling
- Partizionamento dell'ambiente in aree di competenza

Stato dell'arte

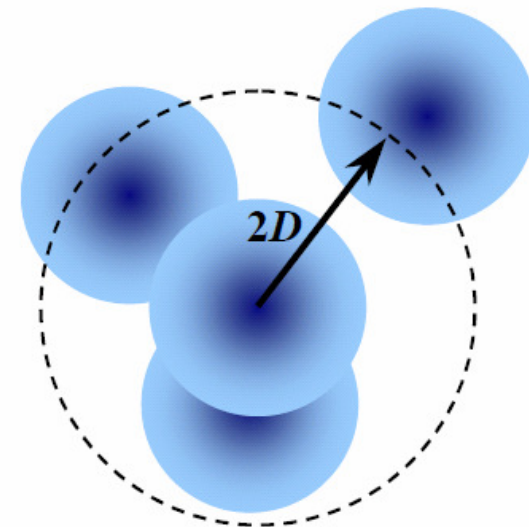
Coordinazione tra agenti

- Analogie con sistemi biologici e fisici
- Definizione di potenziali di patrolling e di *collision avoidance*
- Calcolo della legge di controllo



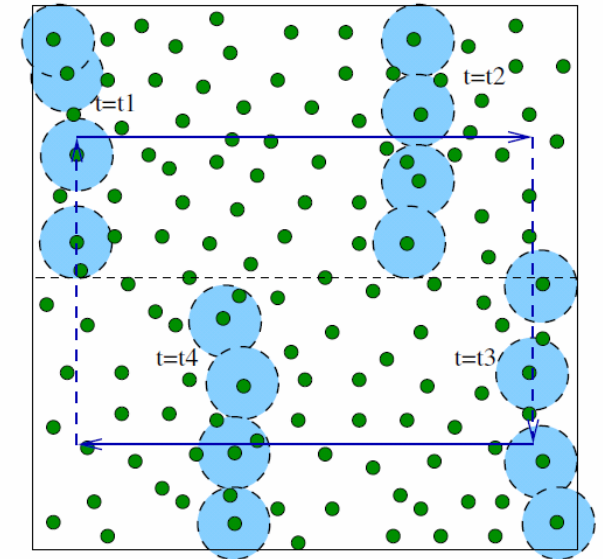
Comunicazione tra agenti

- Comunicazione sporadica
- Grafo di di comunicazione vs comunicazione entro range



Event detection e tracking

- Definizione di un modello probabilistico dell'evento
- Massimizzazione della probabilità di aggancio
- Filtraggio/predizione del moto (Kalman, etc.)



Coordinazione nel tracking

- Consenso e Kalman distribuito
- Euristiche di aggancio dell'evento

Caso di studio: percorso 1D

- Vincoli:
 - Range fisico degli agenti
- ➔ Semplificazione rispetto ai problemi di partizionamento
- Velocità massima di patrolling
- ➔ Legge di controllo semplice con opportuna scelta del criterio di ottimalità
- Caratteristiche strutturali:
 - Grafo di comunicazione ben definito
 - Dimensioni ambiente note e aree di sovrapposizione (non si ha il problema dell'individuazione degli estremi)

Caso di studio: Patrolling e Tracking

- Minimizzare il tempo di non visita ai punti del percorso
- Probabilità uniforme nello spazio di comparsa di un evento
- Bilanciamento delle sezioni di patrolling competenti ad ogni camera

- Tracking prioritario: evento seguito fino a un eventuale segnale di falso allarme proveniente dall'operatore
- Riorganizzazione delle altre camere dell'azione di patrolling per compensare alla zona non vista dalla camera occupata

Caso di studio: sviluppo del progetto

Step fondamentali dell'approccio seguito:

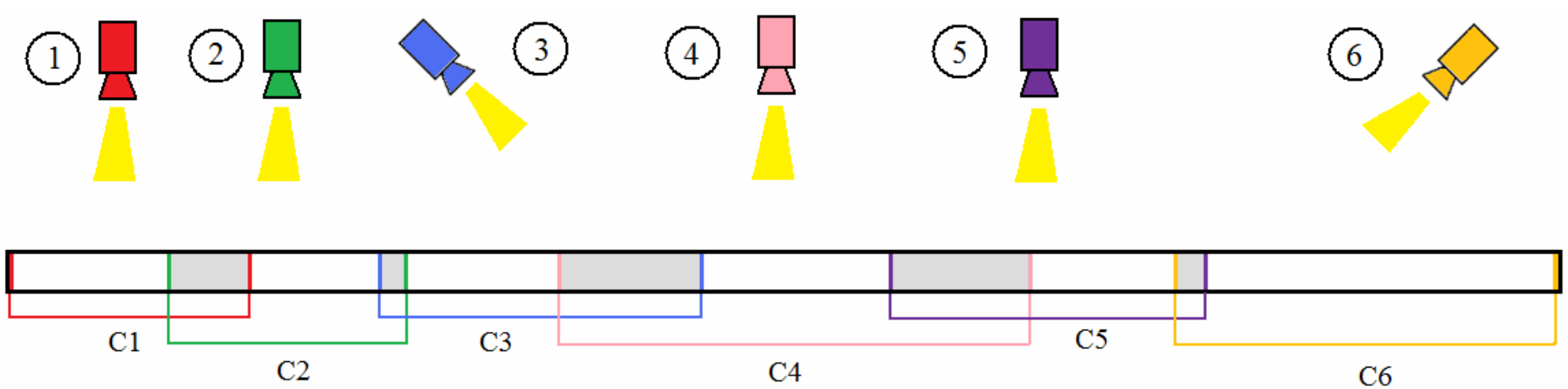
- modellizzazione matematica del problema;
- individuazione criterio di ottimalità, senza e con vincoli;
- paragone con un sistema fisico intuitivo;
- implementazione in Simulink;
- modellizzazione evento, filtro di Kalman;
- coordinazione delle telecamere;
- simulazioni;
- sviluppi futuri e conclusioni.

Variabili del problema:

1. $L = [0, L_{tot}] \subset \mathbb{R}^+$, lunghezza complessiva da monitorare
2. N , numero delle telecamere (numero di agenti)
3. $C_i = [C_{i,inf}, C_{i,sup}] \subset L$, range di copertura fisica della telecamera i-esima
4. $v_i \in [-V_{i,max}, +V_{i,max}]$, range di velocità ammissibile per la telecamera i-esima
5. $z_i(t) : \mathcal{C}[0, +\infty] \rightarrow C_i$, posizione del centro camera della telecamera i-esima
6. $A_i \subseteq C_i$, sezione di copertura a regime della telecamera i-esima

Analisi teorica: schema del percorso

Esempio di percorso da monitorare e relative coperture:



Definizione funzionale:

$$J(x, t, z(t)) : L \times \mathbb{R}^+ \times \mathcal{C}^N(\mathbb{R}^+) \rightarrow \mathbb{R}^+$$

che vale:

$$J(x, t, z(t)) = \begin{cases} 0 & \text{se all'istante } t \exists i \mid z_i(t) = x \\ g(\bar{t}(x)) & \text{altrimenti} \end{cases}$$

con:

- $z(t) = [z_1(t) \dots z_N(t)]'$
- $x \in L$
- $t \in \mathbb{R}^+$
- $\bar{t}(x) : L \rightarrow \mathbb{R}^+$, tempo trascorso dall'ultima visita in x di una telecamera (tempo trascorso dall'ultima volta in cui $z_i(t) = x$, per un qualche i)
- $g(\cdot) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$, funzione monotona strettamente crescente tale che $g(0) = 0$

Dinamica del centro camera:

$$\dot{z}_i(t) = v_i(t), \quad \forall i$$

Segnale di controllo utilizzato: $U(t) = [v_1(t) \dots v_N(t)]'$, $t \in [0 + \infty)$

Legge di controllo: $\bar{U}(\cdot) = \arg \min_{U(\cdot)} \sup_t \max_x J(x, t, z(\cdot))$

Con vincoli:

- $v_i(t) \in [-V_{i,max}, +V_{i,max}]$
- $z_i(t) \in C_i$

Modello probabilistico dell'evento

Ipotesi per l'evento:

- evento uniformemente distribuito nello spazio L da monitorare
- evento raro (rispetto all'intervallo di tempo considerato)
- evento senza dinamica

➔ $P(N(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$ Processo contatore di *Poisson*

Probabilità evento dall'ultimo istante di passaggio per x_0 :

$$P[N(\bar{t}(x_0)) \geq 1] = 1 - P[N(\bar{t}(x_0)) = 0] = 1 - e^{-\lambda \bar{t}(x_0)}$$

Ponendo: $g(\bar{t}(x)) = 1 - e^{-\lambda \bar{t}(x)}$

➔ Si minimizza la probabilità che si verifichi un evento senza che il sistema lo rilevi

Traiettoria ottima

Una sola telecamera:

Copertura ottima con moto periodico alla *velocità massima*, di periodo:

$$T = \frac{2L_{tot}}{V_{max}}$$

Massimo del funzionale agli *estremi* :

$$\max_{x,t} J(x, t, z(t)) = \max_t \{J(0, t, z(t)), J(L_{tot}, t, z(t))\} \leq 1 - e^{-\lambda T}$$

N telecamere senza vincoli di copertura:

Algoritmo 1 : $T = 2T_{ott} = \frac{2L_{tot}}{\sum_{i=1}^N V_{i,max}}$



Sezioni disgiunte
e consecutive di ampiezza

$$|A_i| = V_{i,max} T_{ott}$$

Traiettoria ottima

N telecamere con vincoli di copertura:

Ammissibilità della soluzione senza vincoli: $A_i \subseteq C_i$

Se è verificata

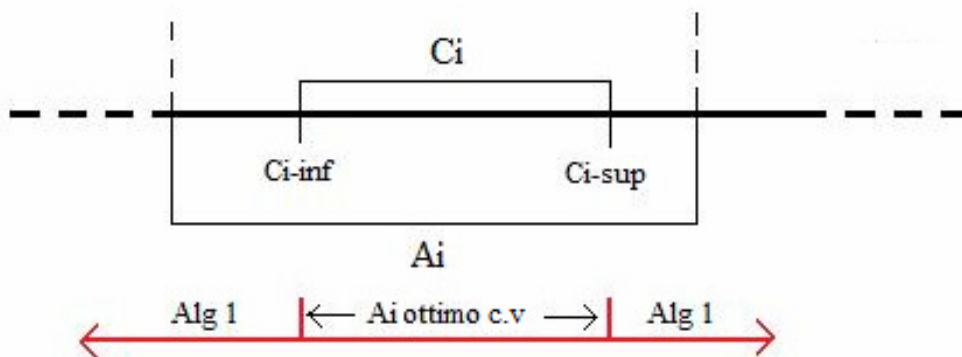


ottimo vincolato coincide con ottimo senza vincoli

Altrimenti

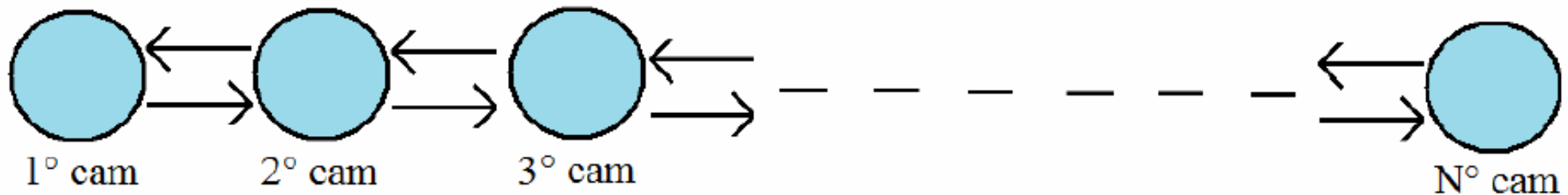


- massima copertura compatibilmente ai vincoli
- ricorsione dell'algoritmo 1



Esempio in cui si vincola la copertura della telecamera i-esima in modo massimale e si rilancia ricorsivamente l'algoritmo 1

Grafo di comunicazione del sistema:



Caratteristiche del grafo:

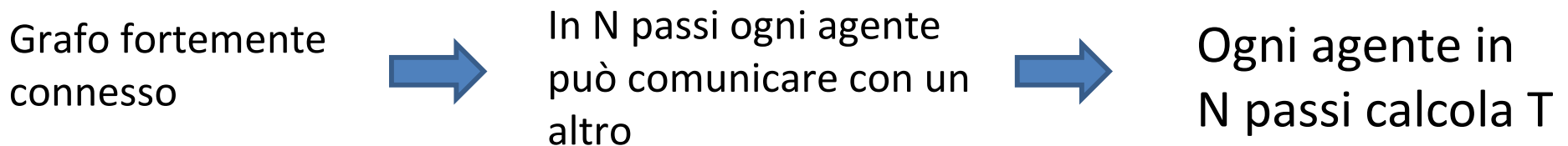
1. Fortemente connesso
2. La comunicazione è bidirezionale
3. C'è comunicazione tra le telecamere adiacenti che hanno copertura in comune

Parametri da calcolare in termini distribuiti

- Periodo di oscillazione: $T = 2T_{ott} = \frac{2L_{tot}}{\sum_{i=1}^N V_{i,max}}$
- Sezioni di copertura ottime A_i

Comunicazione passo passo:

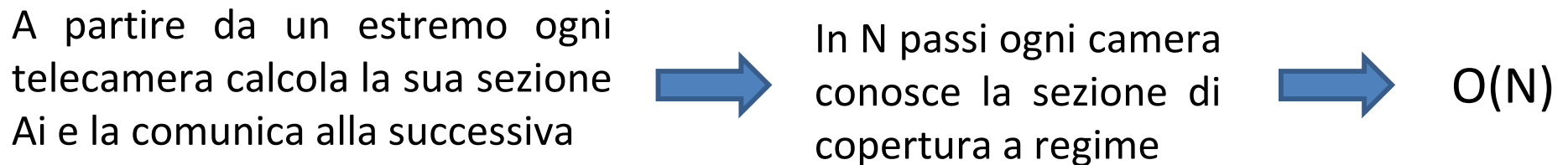
Ad ogni istante di tempo un agente comunica con quelli adiacenti



Il *problema* è nel calcolo delle A_i

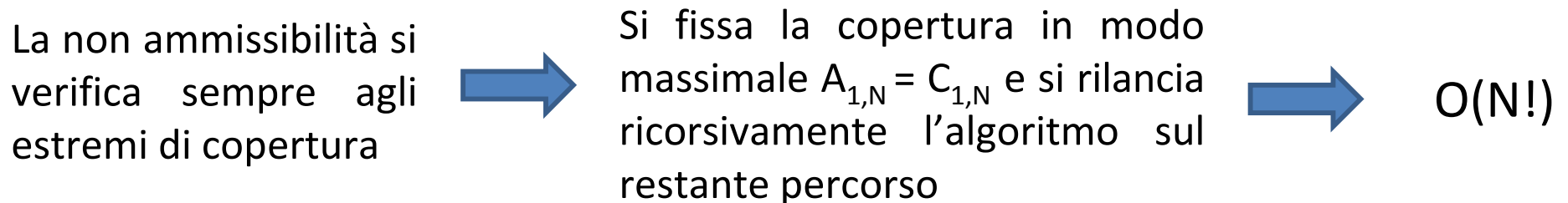
Analisi della complessità dell'algoritmo passo passo

- Soluzione ottima non vincolata ammissibile:



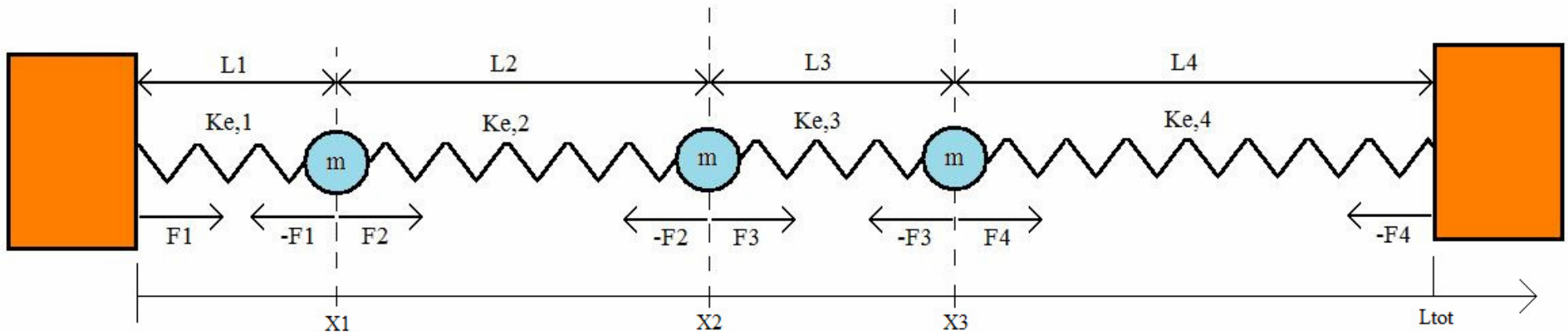
- Soluzione ottima non vincolata non ammissibile:

Analisi nel *worst case*:



La complessità dell'algoritmo passo passo lo rende inutilizzabile in un caso generale

Analogia con un sistema fisico meccanico:



- N molle
- N-1 masse
- Ke , μ , m , Li



- N telecamere
- N-1 estremi comuni di copertura
- Parametri per modellare la dinamica

Analisi in spazio di stato:

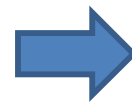
$$\begin{cases} ma_1 = -K_{e,1}\Delta l_1 + K_{e,2}\Delta l_2 - \mu v_1 \\ ma_2 = -K_{e,2}\Delta l_2 + K_{e,3}\Delta l_3 - \mu v_2 \\ ma_3 = -K_{e,3}\Delta l_3 + K_{e,4}\Delta l_4 - \mu v_3 \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ \dot{v}_1 = -\frac{K_{e,1}}{m}x_1 + \frac{K_{e,2}}{m}(x_2 - x_1) - \mu v_1 \\ \dot{x}_2 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -\frac{K_{e,2}}{m}(x_2 - x_1) + \frac{K_{e,3}}{m}(x_3 - x_2) - \mu v_2 \\ \dot{x}_3 = v_3 \\ \dot{v}_3 = -\frac{K_{e,3}}{m}(x_3 - x_2) + \frac{K_{e,4}}{m}(L - x_3) - \mu v_3 \end{cases}$$

$$X = [x_1 \ v_1 \ x_2 \ v_2 \ x_3 \ v_3]'$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{e,1}}{m} - \frac{K_{e,2}}{m} & -\mu & \frac{K_{e,2}}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{e,2}}{m} & 0 & -\frac{K_{e,2}}{m} - \frac{K_{e,3}}{m} & -\mu & \frac{K_{e,3}}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{K_{e,3}}{m} & 0 & -\frac{K_{e,3}}{m} - \frac{K_{e,4}}{m} & -\mu \end{bmatrix}$$

Equilibrio equivalente al calcolo delle sezioni ottime

Soluzione di equilibrio stabile nel
minimo di energia potenziale



Equilibrio delle forze:

$$|F_1| = \dots = |F_N|$$

In presenza di attrito viscoso μ , l'equilibrio diventa *asintoticamente stabile*

- Scegliendo in modo opportuno i parametri K_e, L_i :

$$K_{e,i} = \frac{1}{V_{i,max}}$$

e

$$L_i = A_i$$



$$|F_1| = \dots = |F_N|$$



$$\frac{1}{V_{i,max}} |A_i| = \frac{1}{V_{j,max}} |A_j|$$

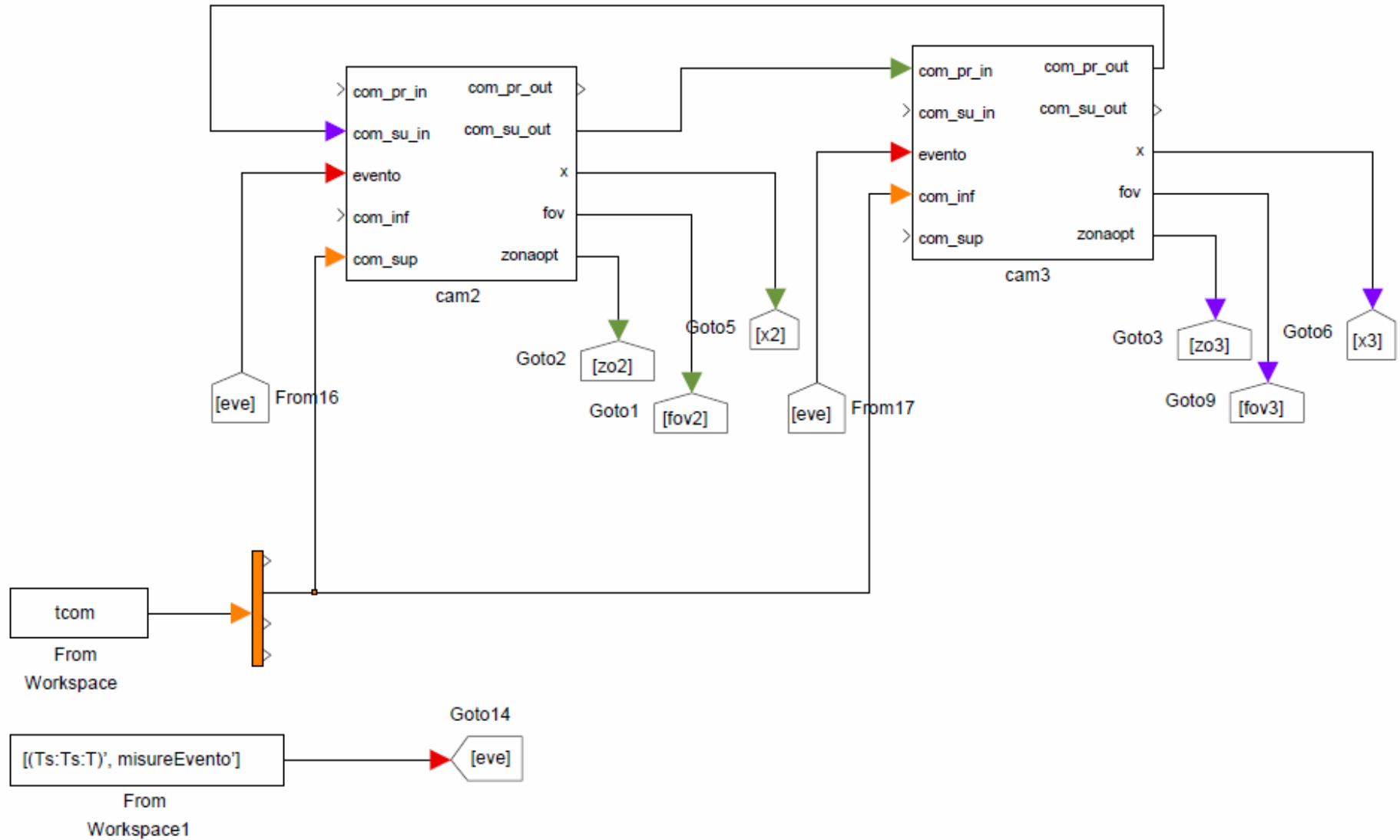


$$T_i = T_j$$

- Mentre m, μ restano dei gradi di libertà

- Capacità di calcolo distribuita
 - ➔ Struttura a blocchi distinti per rappresentare le singole camere
- Comunicazione asincrona e sporadica
 - ➔ Bus di comunicazione conforme al grafo
Link stabilito solo in alcuni istanti, generati in modo randomizzato

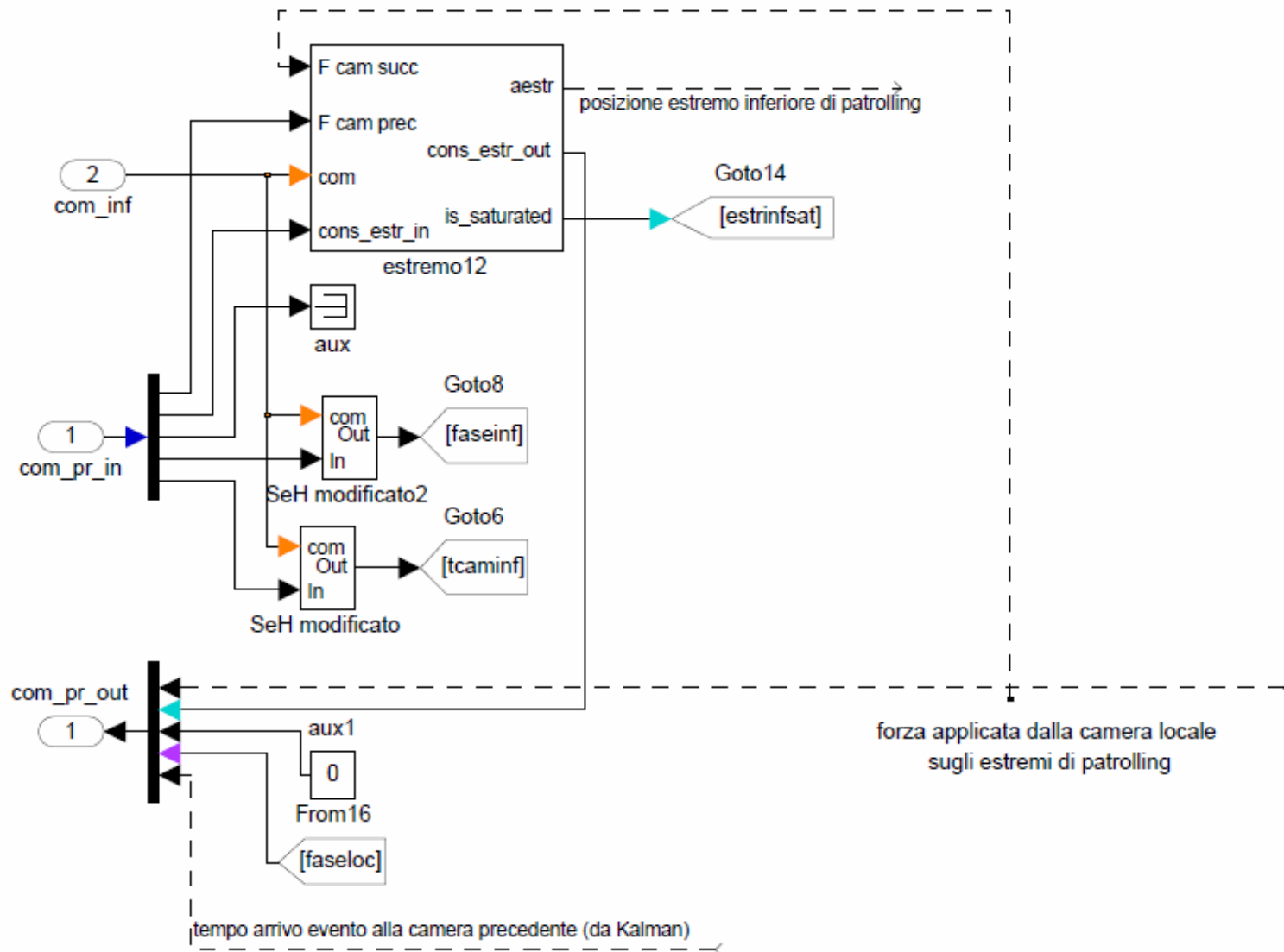
“Livello 0” del sistema



Bus di comunicazione

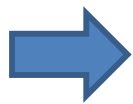
- Interconnessione tra camere adiacenti
- Attivazione del link in modo randomizzato e asincrono
- Segnali utilizzati:
 - Forza sull'estremo di patrolling comune
 - Reset al consenso dell'estremo comune
(non interviene in caso di funzionamento ideale)
 - Segnale di sincronismo (fase)
 - Tempo di arrivo dell'evento ai bordi fisici

Bus di comunicazione e estremo locale



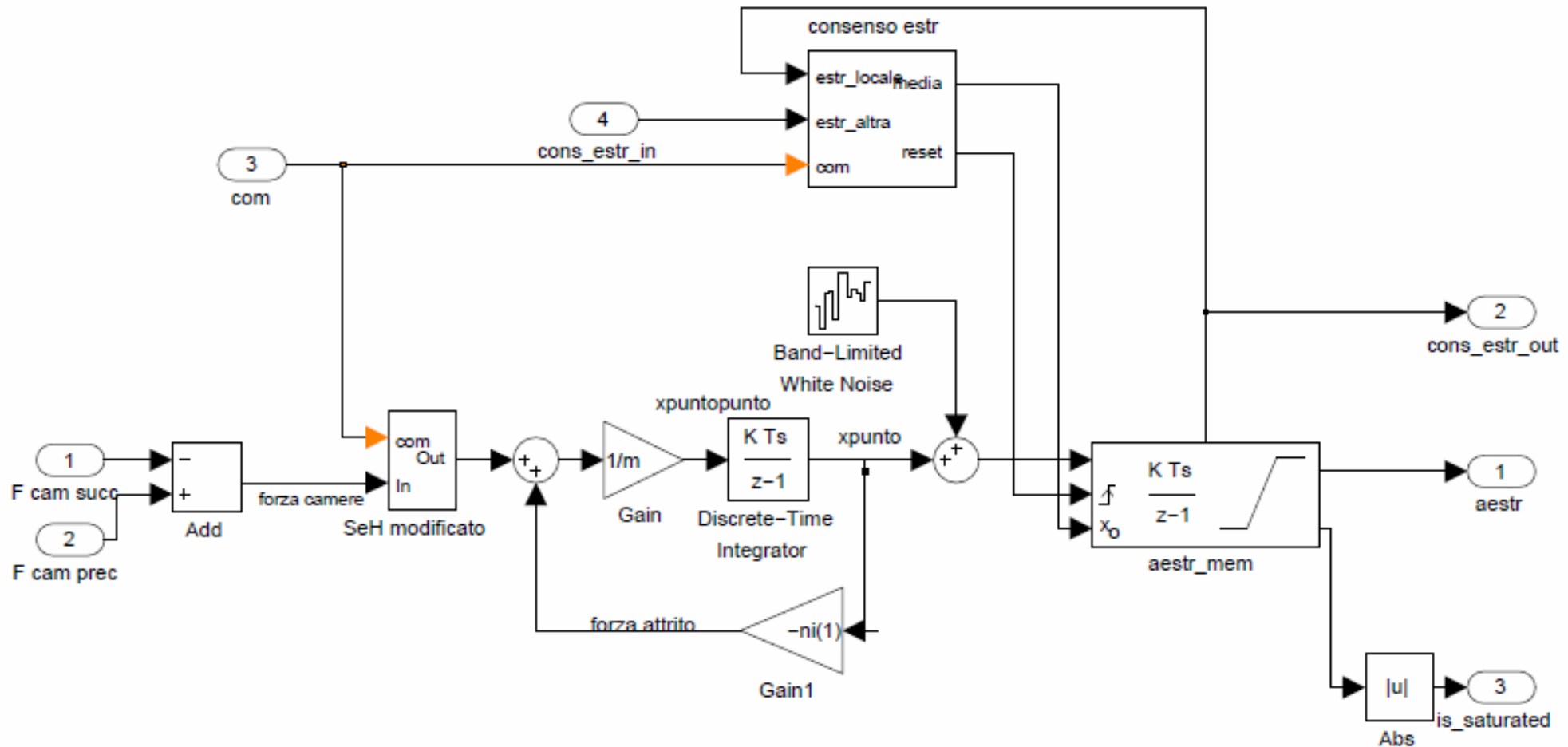
Modello localizzato degli estremi

- Dinamica “dolce” degli estremi anche con comunicazione sporadica
- Memoria del riferimento ottimo di patrolling
- Necessità di mantenere il consenso tra gli estremi
- *Holder* applicato alla forza elastica negli istanti di non comunicazione



Verifica in simulazione della buona rispondenza al modello fisico molla-massa-smorzatore

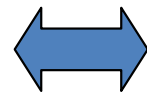
Modello localizzato degli estremi



$$\ddot{A}_{i,i+1} = \frac{F_i - F_{i+1} - \mu_{i,i+1} \dot{A}_{i,i+1}}{m_{i,i+1}}$$

Calcolo della forza sugli estremi

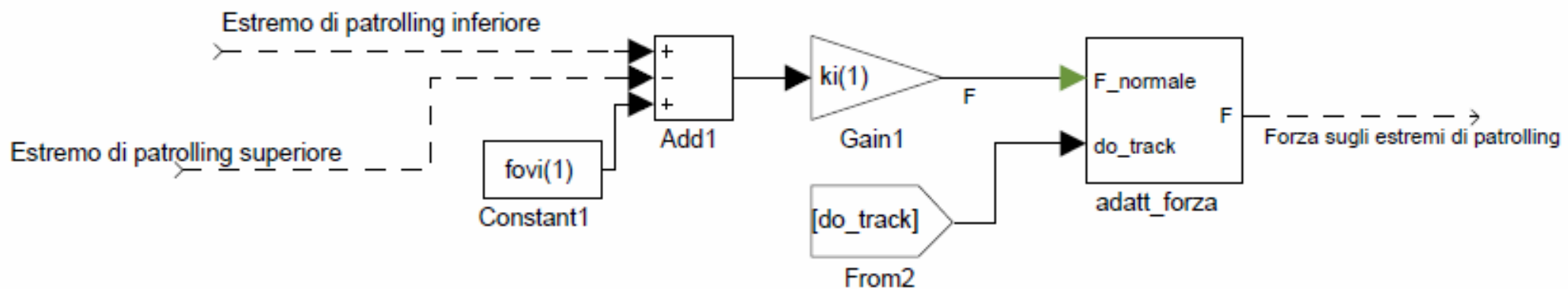
Estensione del range ottimo di patrolling



Estensione di una molla

$$F_i = -k_i(A_{i,sup} - A_{i,inf})$$

$$A_i = [A_{i,inf}, A_{i,sup}]$$



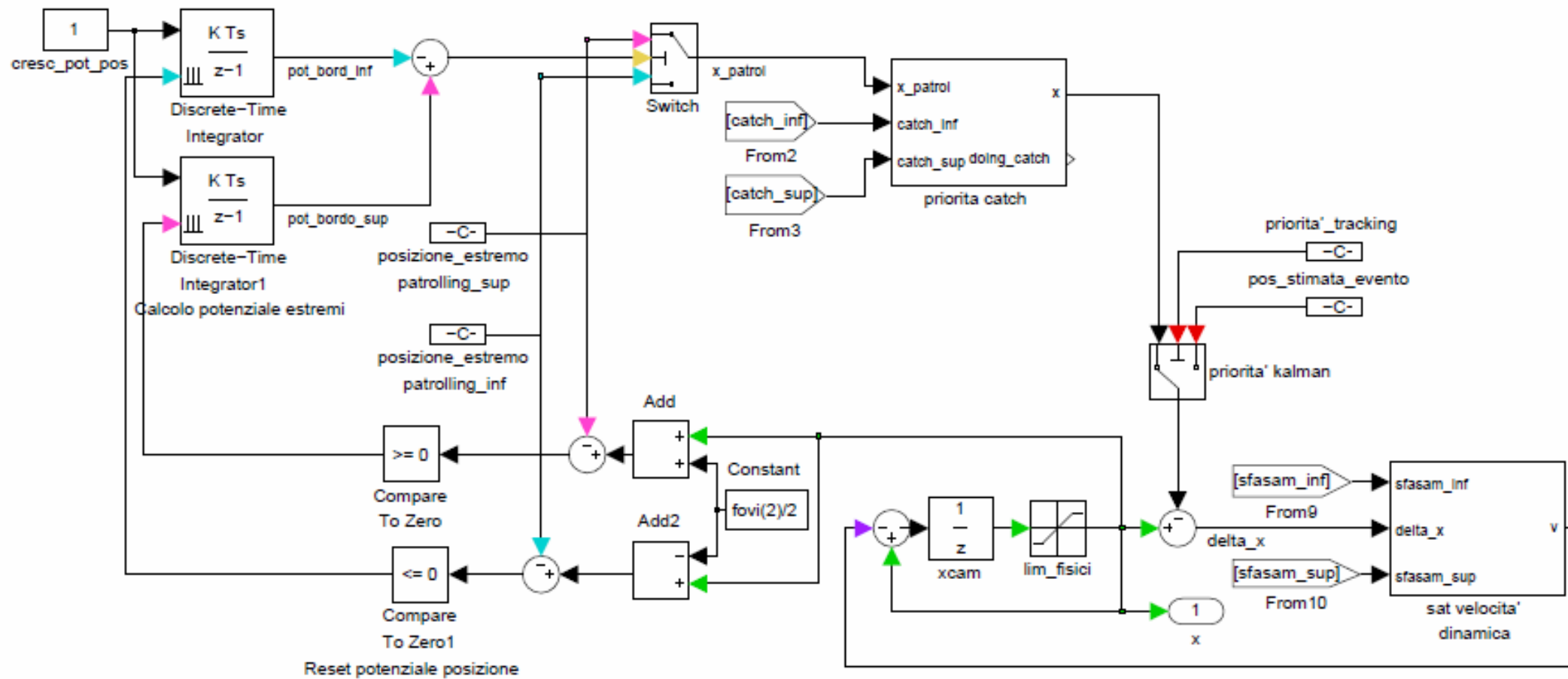
Potenziale agli estremi e patrolling

- Traiettoria di patrolling ottima: $|v_i(t)| = V_{i,max}$
- Semplificazione dell'approccio rispetto a un funzionale di costo definito per ogni punto
- Il massimo del funzionale si ha agli estremi:

$$\max_{x,t} J(x, t, z_i(t)) = \max_t \{J(A_{i,inf}, t, z_i(t)), J(A_{i,sup}, t, z_i(t))\}$$

per la i -esima telecamera

Potenziale agli estremi e patrolling

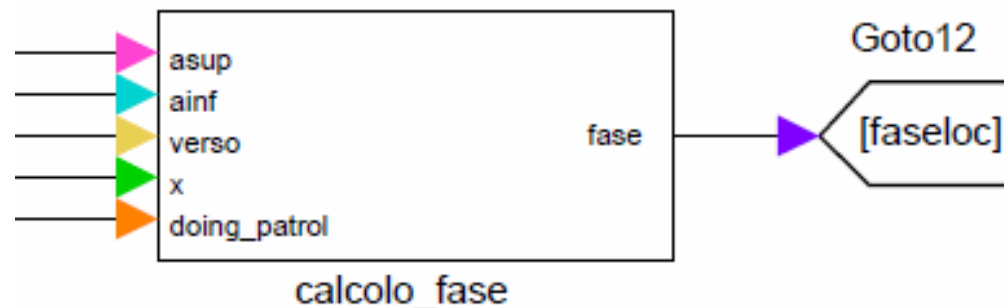


Sincronizzazione della fase

- Opposizione di fase: assicura di localizzare un evento nella zona tra camere con lo stesso periodo di patrolling
- Fase: discrimina il moto a $+V_{i,max}$ e quello a $-V_{i,max}$

$$\phi_i(t) = 0.5 \frac{x_i(t) - A_{i,inf}}{A_{i,sup} - A_{i,inf}} \quad \text{se} \quad J(A_{i,inf}, t) < J(A_{i,sup}, t),$$

$$\phi_i(t) = 1 - 0.5 \frac{x_i(t) - A_{i,inf}}{A_{i,sup} - A_{i,inf}} \quad \text{altrimenti}$$



Sincronizzazione della fase

- Non deve penalizzare il patrolling
- Efficace anche con scarsa comunicazione
- La camera in anticipo rallenta di un fattore proporzionale allo sfasamento:

$$|v_i(t)| = [1 - k_\phi \Delta\phi_{i,j}(t)]V_{i,max}, \quad k_\phi < 1$$

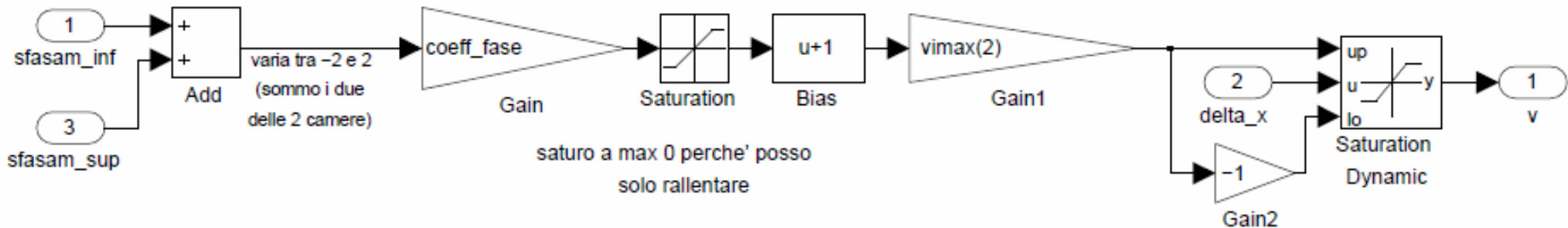
con $j=i+1$ oppure $j=i-1$, quando:

$$\phi_i > \phi_j \quad \text{e} \quad |\phi_i - \phi_j| < 0.5$$

oppure

$$\phi_i < \phi_j \quad \text{e} \quad |\phi_i - \phi_j| > 0.5$$

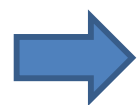
Sincronizzazione della fase



Dimensionamento dei parametri

Valutazione degli autovalori del sistema
molla-massa-smorzatore in evoluzione libera

$$F = \begin{bmatrix}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{K_{e,1}}{m} - \frac{K_{e,2}}{m} & -\mu_{1,2} & \frac{K_{e,2}}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{K_{e,2}}{m} & 0 & -\frac{K_{e,2}}{m} - \frac{K_{e,3}}{m} & -\mu_{2,3} & \frac{K_{e,3}}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{K_{e,3}}{m} & 0 & -\frac{K_{e,3}}{m} - \frac{K_{e,4}}{m} & -\mu_{3,4} & \frac{K_{e,4}}{m} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{e,4}}{m} & 0 & -\frac{K_{e,4}}{m} - \frac{K_{e,5}}{m} & -\mu_{4,5} & 1
 \end{bmatrix}$$



difficile il dimensionamento iniziale

Dimensionamento dei parametri

Analogia con un sistema del secondo ordine:

$$\ddot{A}_{i,i+1} + 2\xi_{i,i+1}\omega_{i,i+1}\dot{A}_{i,i+1} + \omega_{i,i+1}^2 A_{i,i+1} = 0$$

dove:

$$\xi_{i,i+1} = \frac{\mu_{i,i+1}}{2m\omega_{i,i+1}}, \quad \omega_{i,i+1} = \sqrt{\frac{K_{e,i} + K_{e,i+1}}{m}}$$

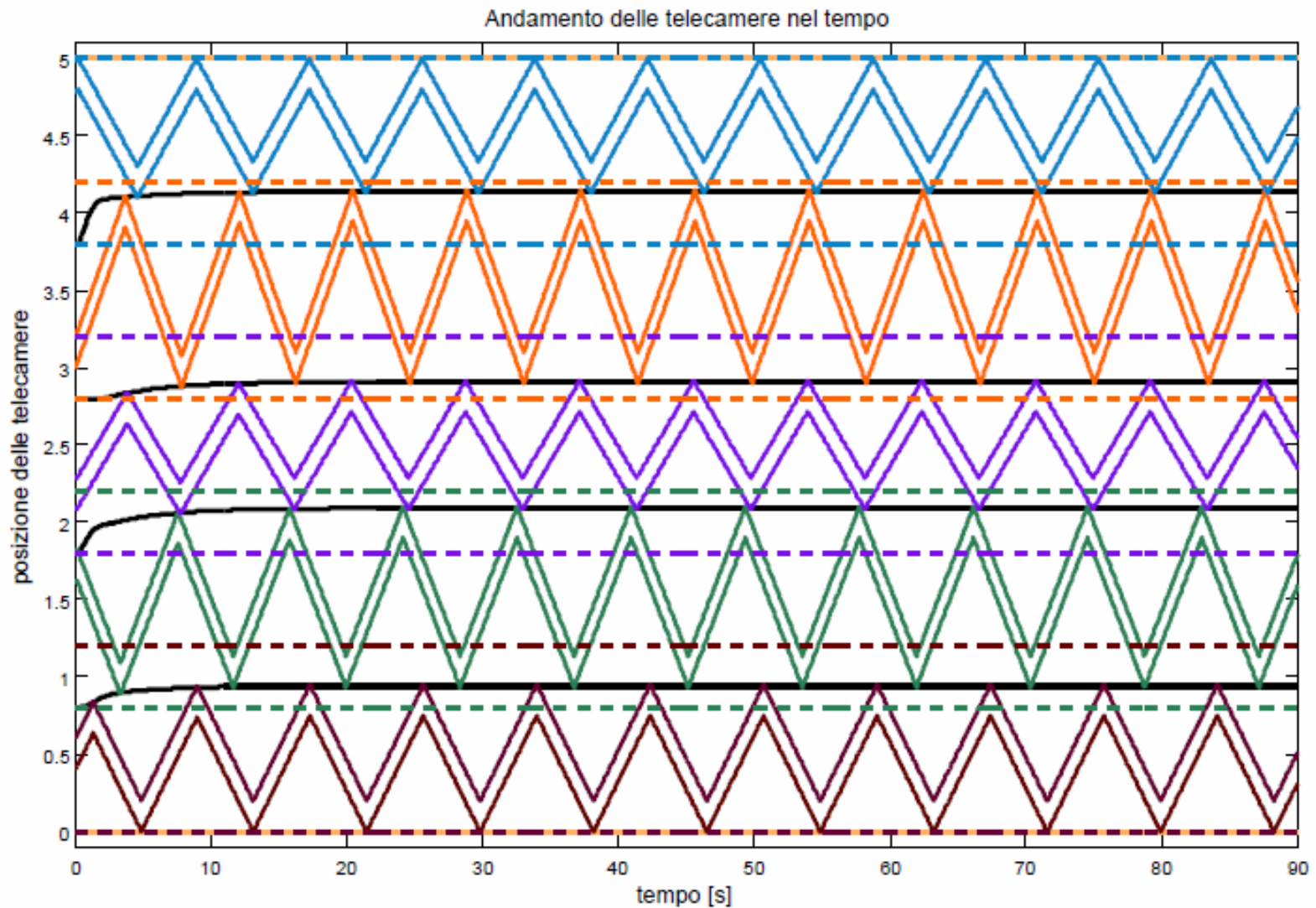
- *Possibilità di regolare in modo adattativo le masse*

Dimensionamento dei parametri

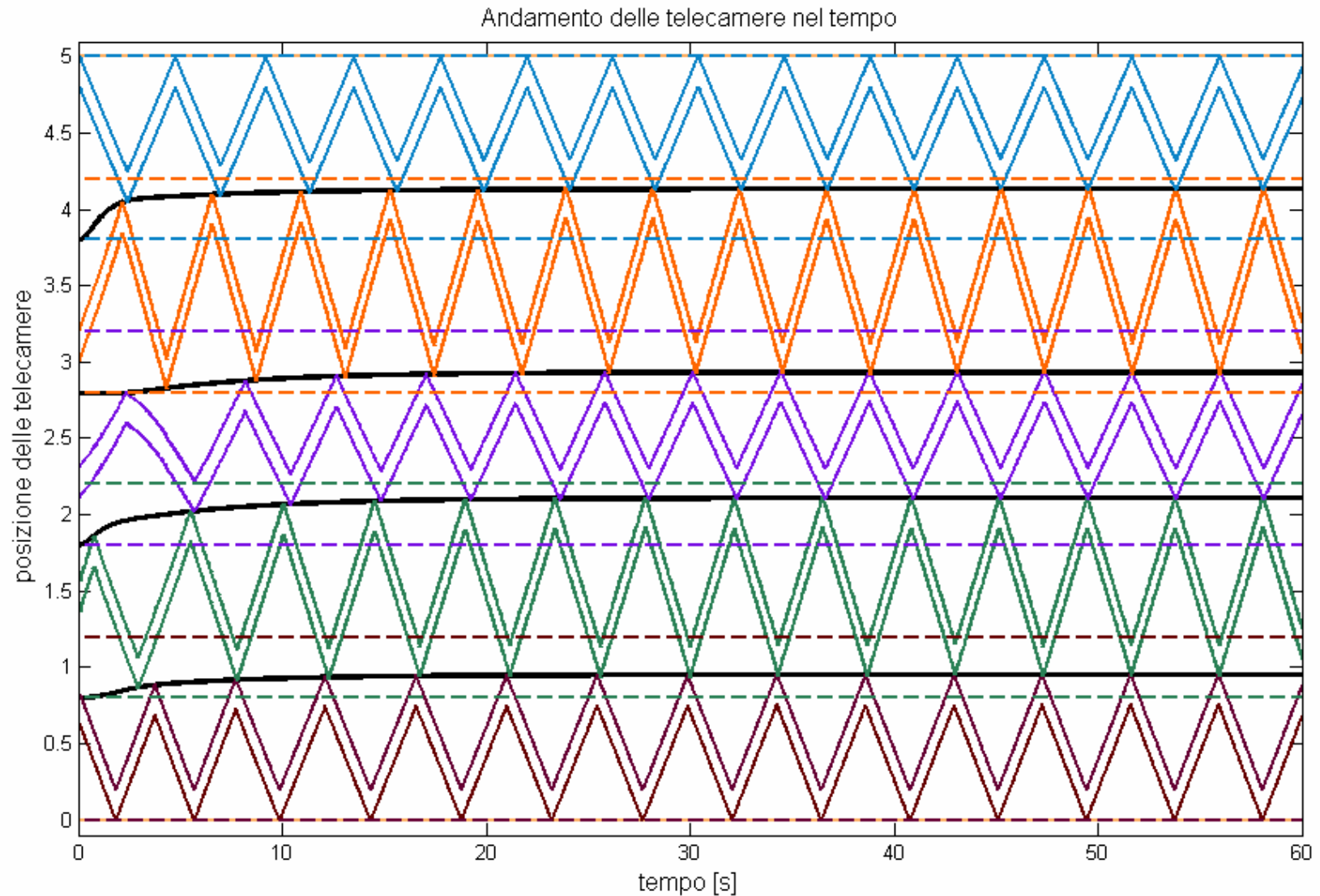
- Costanti elastiche inversamente proporzionali alle velocità
- Massa estremi impone prontezza del sistema
- Coefficiente di smorzamento unitario per autovalori reali
- Coefficiente di attrito determinato dallo smorzamento

Simulazioni

Patrolling con vincoli non stringenti, sincronizzazione fase disattivata

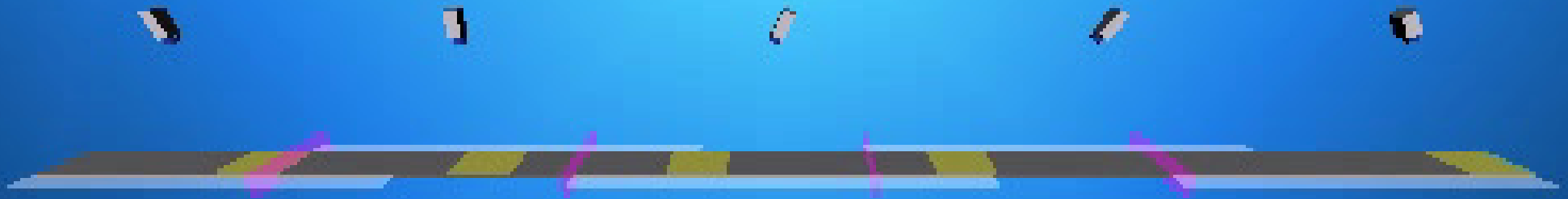


Patrolling con vincoli non stringenti, opposizione di fase

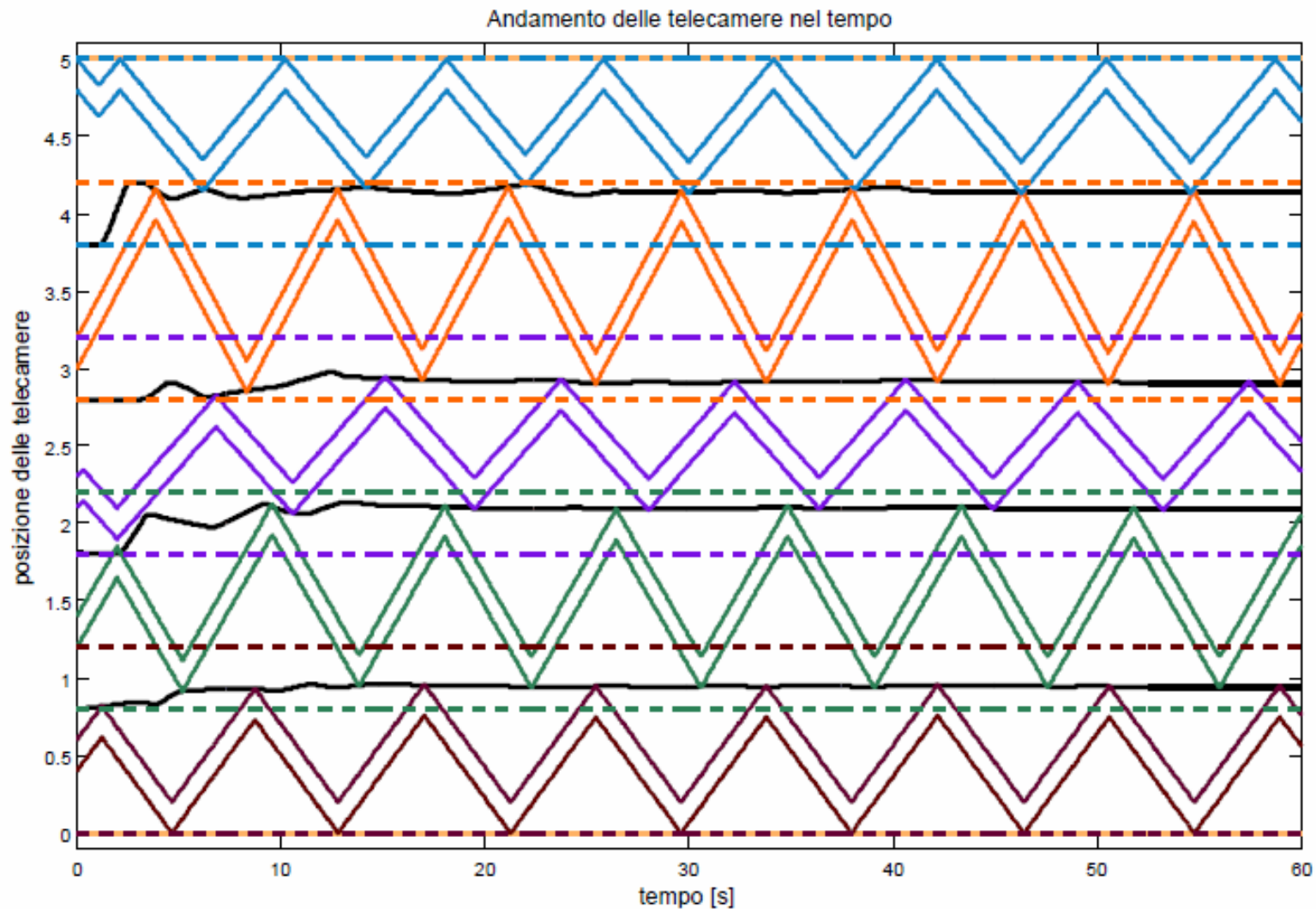




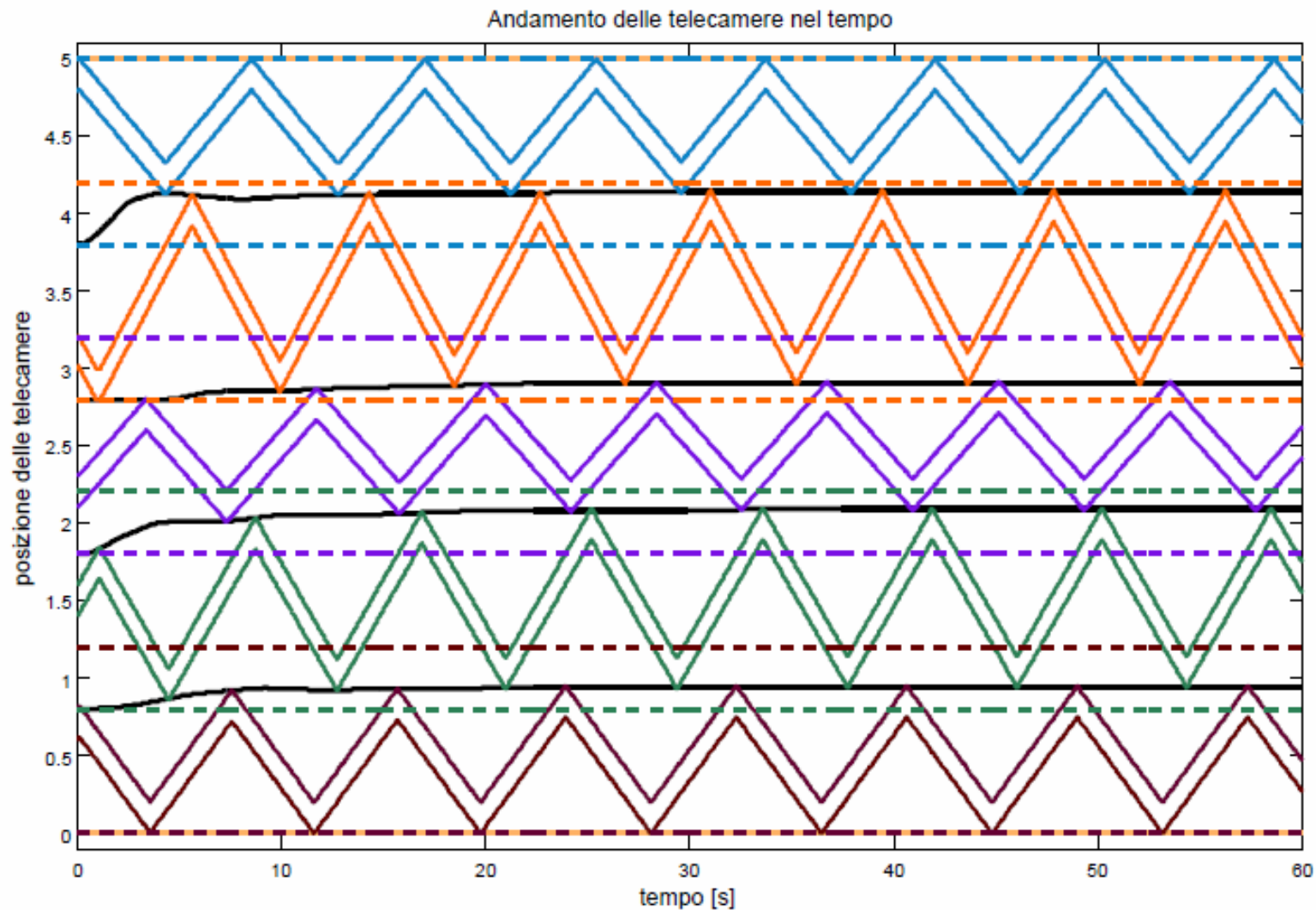
Video 1: patrolling



Patrolling con comunicazione sporadica (media 1s)

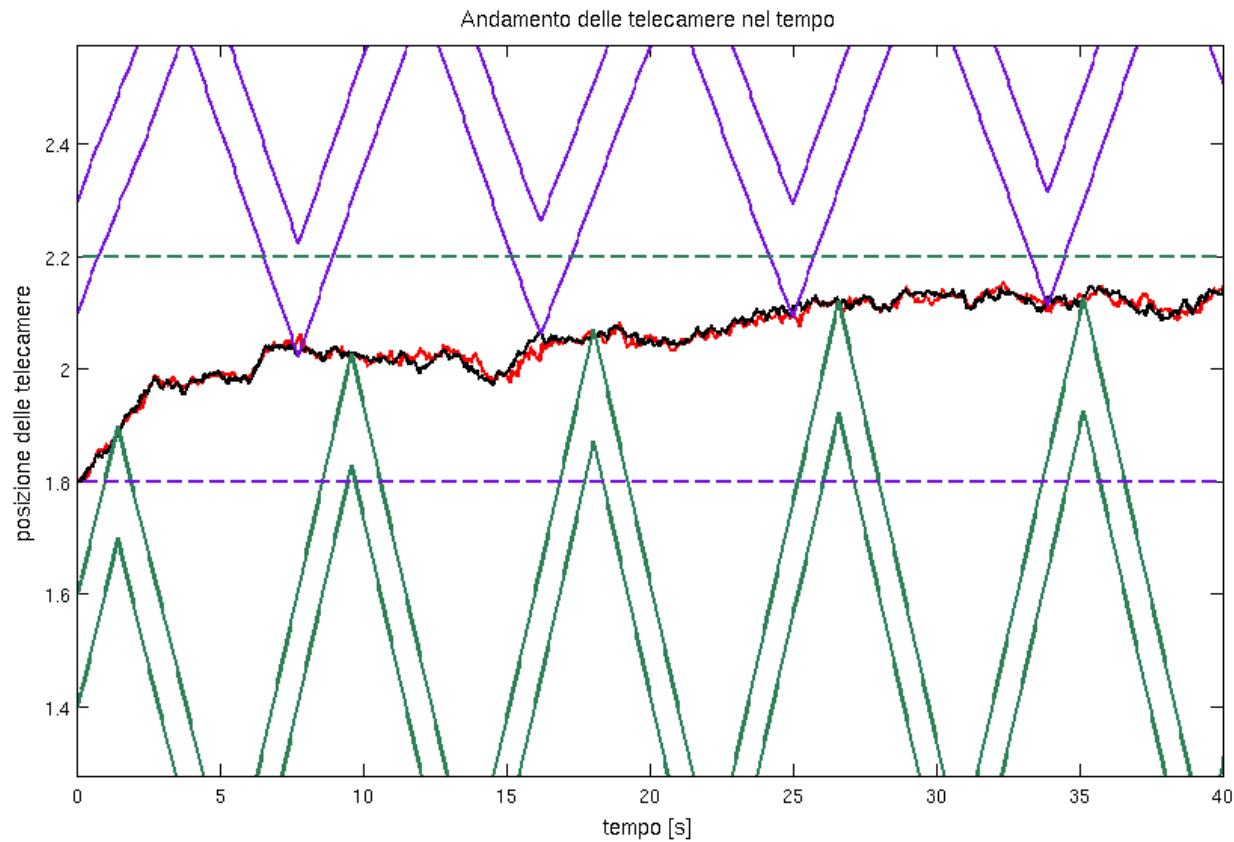


Patrolling con comunicazione sporadica e massa aumentata

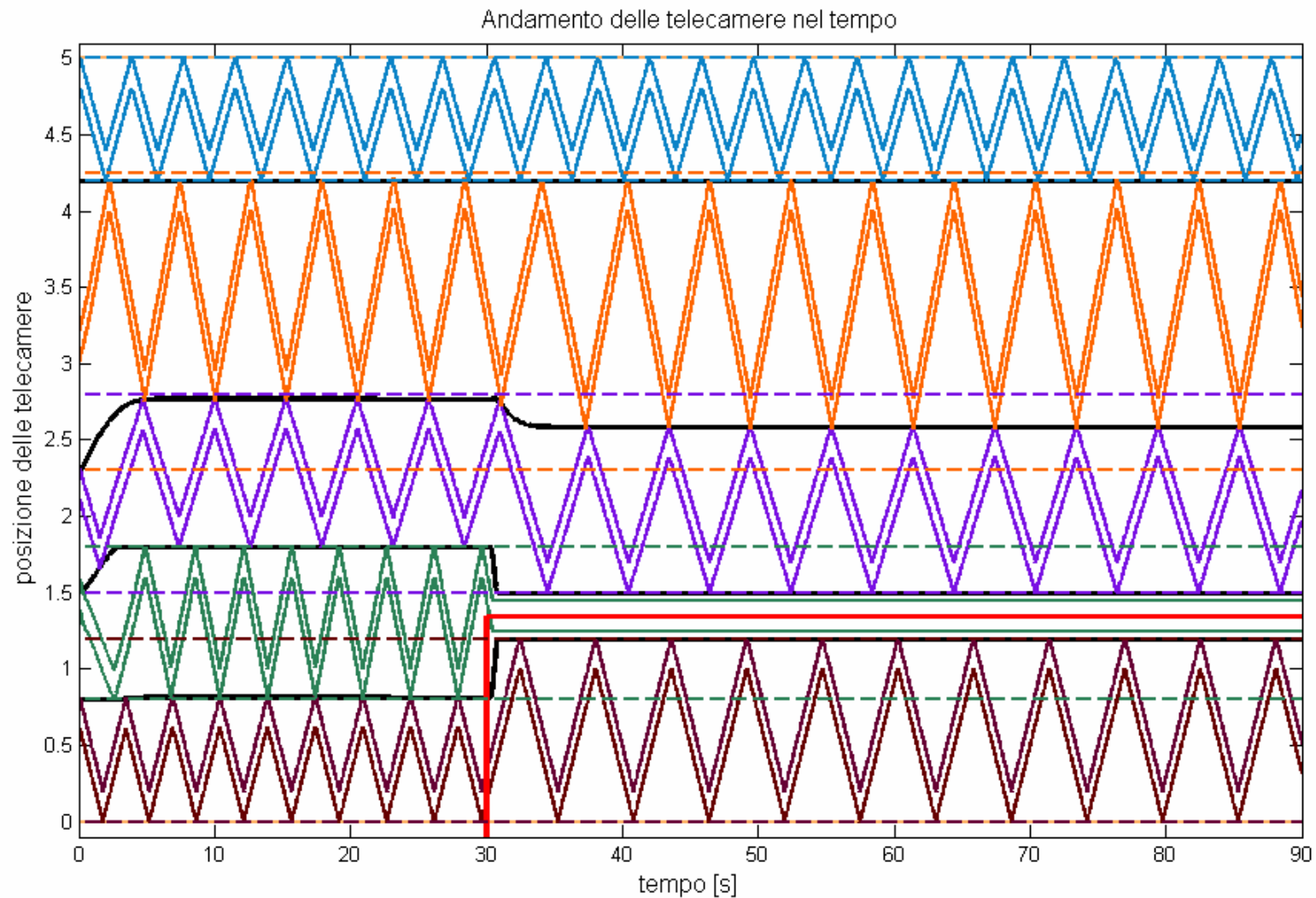


Introduzione rumore nel modello degli estremi

Interviene il sistema di reset della posizione al consenso

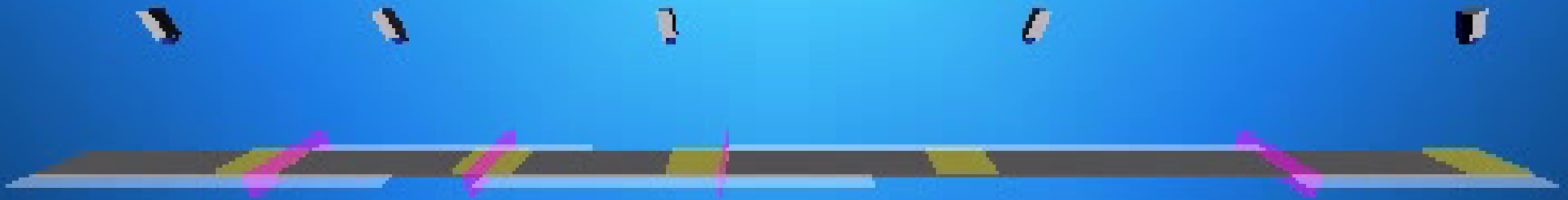


Simulazione di robustezza o evento statico,
riassetamento dei bordi ottimi.





Video 2: patrolling



Tracking: modellizzazione evento

Stato: posizione e velocità

$$x_e(t + 1) = x_e(t) + v_e(t)$$

$$v_e(t + 1) = av_e(t) + bn_1(t)$$

Modello in spazio di stato:

$$x(t + 1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & a \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = [1 \ 0] x(t) + [0 \ d] \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \end{bmatrix}$$

Rumori bianchi, gaussiani, a media nulla

Utilizzo di un filtro di Kalman classico:

- Condizioni iniziali: varianza di velocità elevata, varianza di posizione non eccessiva. Primo stato = prima misura
- Ipotesi valide per Kalman:
 - rumori scorrelati
 - matrici:

$$R = DD^T = [d^2] > 0 \quad Q = BB^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b^2 \end{bmatrix} \geq 0$$

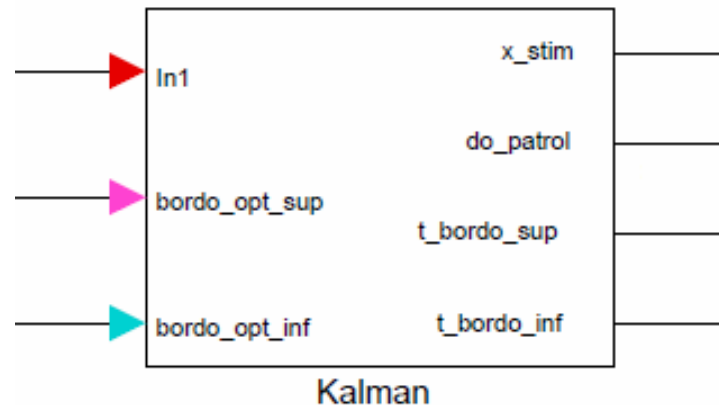
- Se una camera fa tracking, non può fare patrolling → il patrolling viene sacrificato → *ri-ottimizzare* la copertura
- L'evento non deve mai essere perso, neanche nei "passaggi" tra due camere



- Forza maggiore esercitata dalla camera di tracking per migliorare il patrolling
- Evento seguito fino ai bordi fisici;
- Informazioni sul tempo di arrivo stimato: le camere vicine sanno quando arriva l'evento

Accade che due camere facciano contemporaneamente tracking: giusto per robustezza e per evento vicino ai bordi!

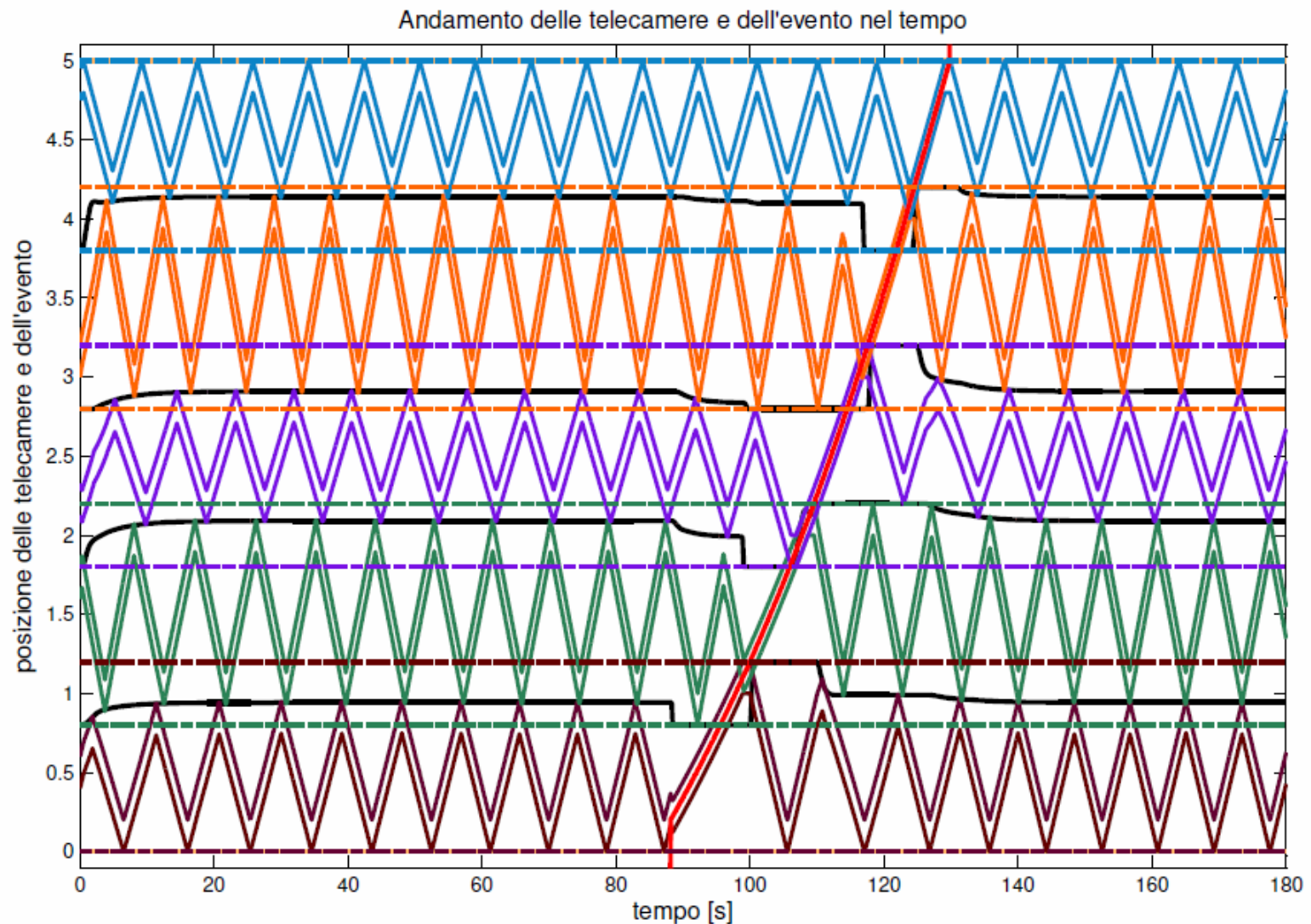
Evento generato fuori linea, un circuito logico simula il sistema di visione. Se l'evento è all'interno del *fov*, viene attivato il blocco di Kalman:



- **Ingressi:** bit di presenza, evento e bordi ottimi
- **Uscite:** stima dell'evento, tempi di arrivo stimati ai bordi, valore logico per inibire il patrolling e comandare aumento della forza di attrazione (con bias)
- **Interno:** filtro di Kalman, calcolo dei tempi di arrivo con differenza tra posizione e bordi

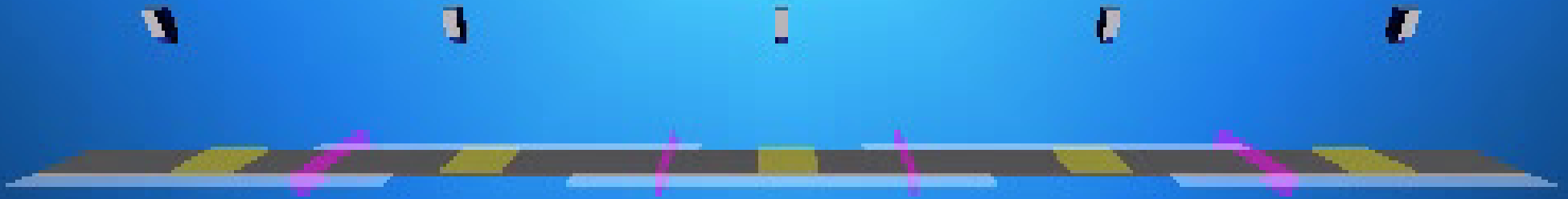
Simulazioni: tracking

Caso base: evento in moto uniforme, avvicinamento estremi di patrolling, chiamata delle camere adiacenti



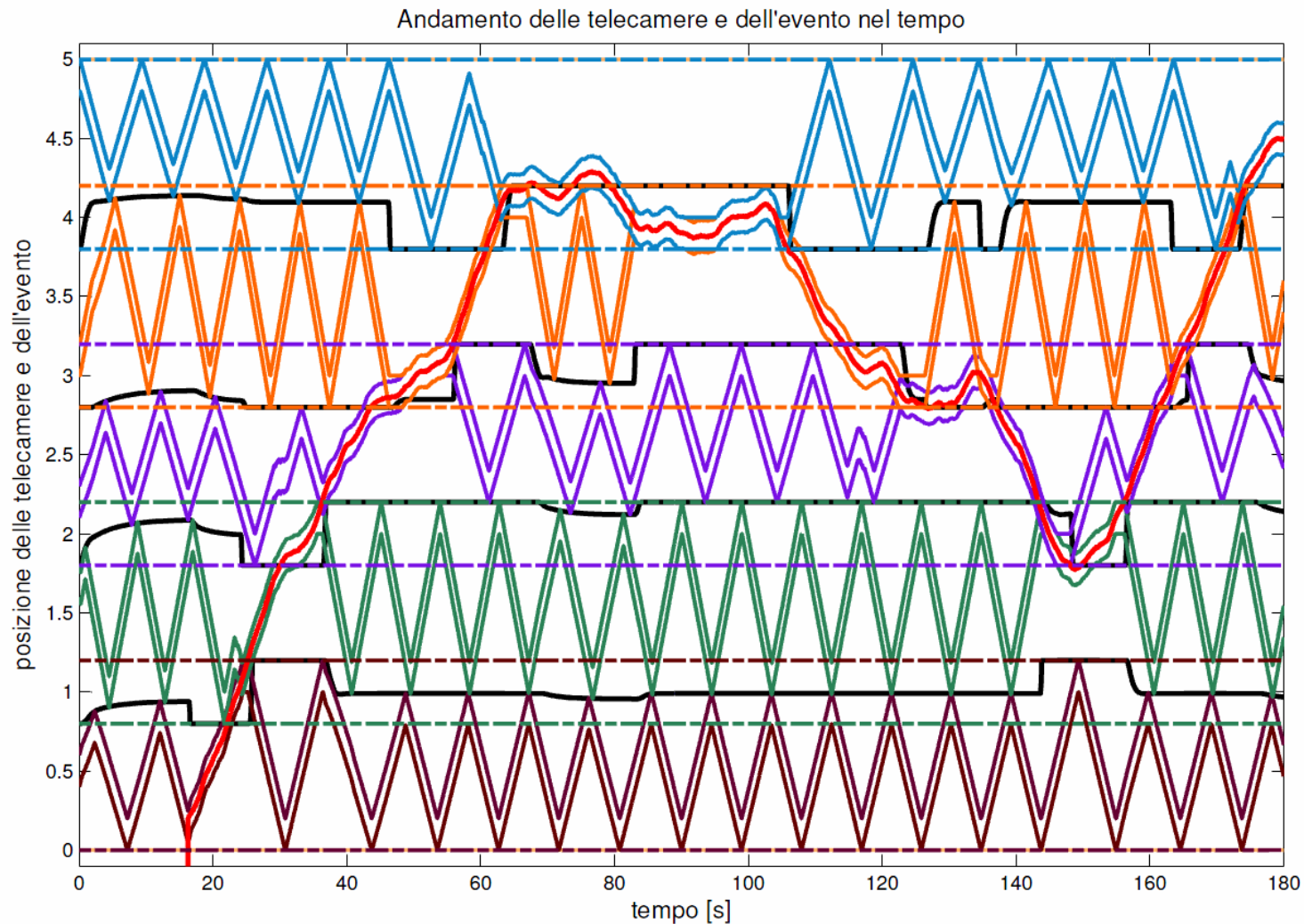


Video 3: tracking



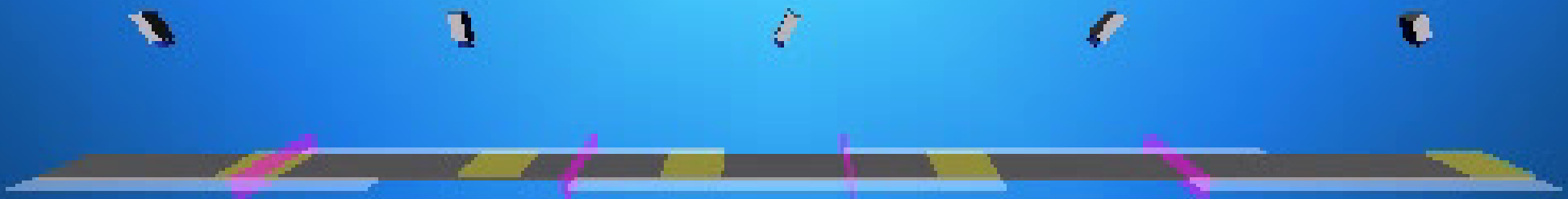
Simulazioni: tracking

Si sceglie un evento che possa essere seguito dalle telecamere, non troppo rumoroso e con comportamento variabile



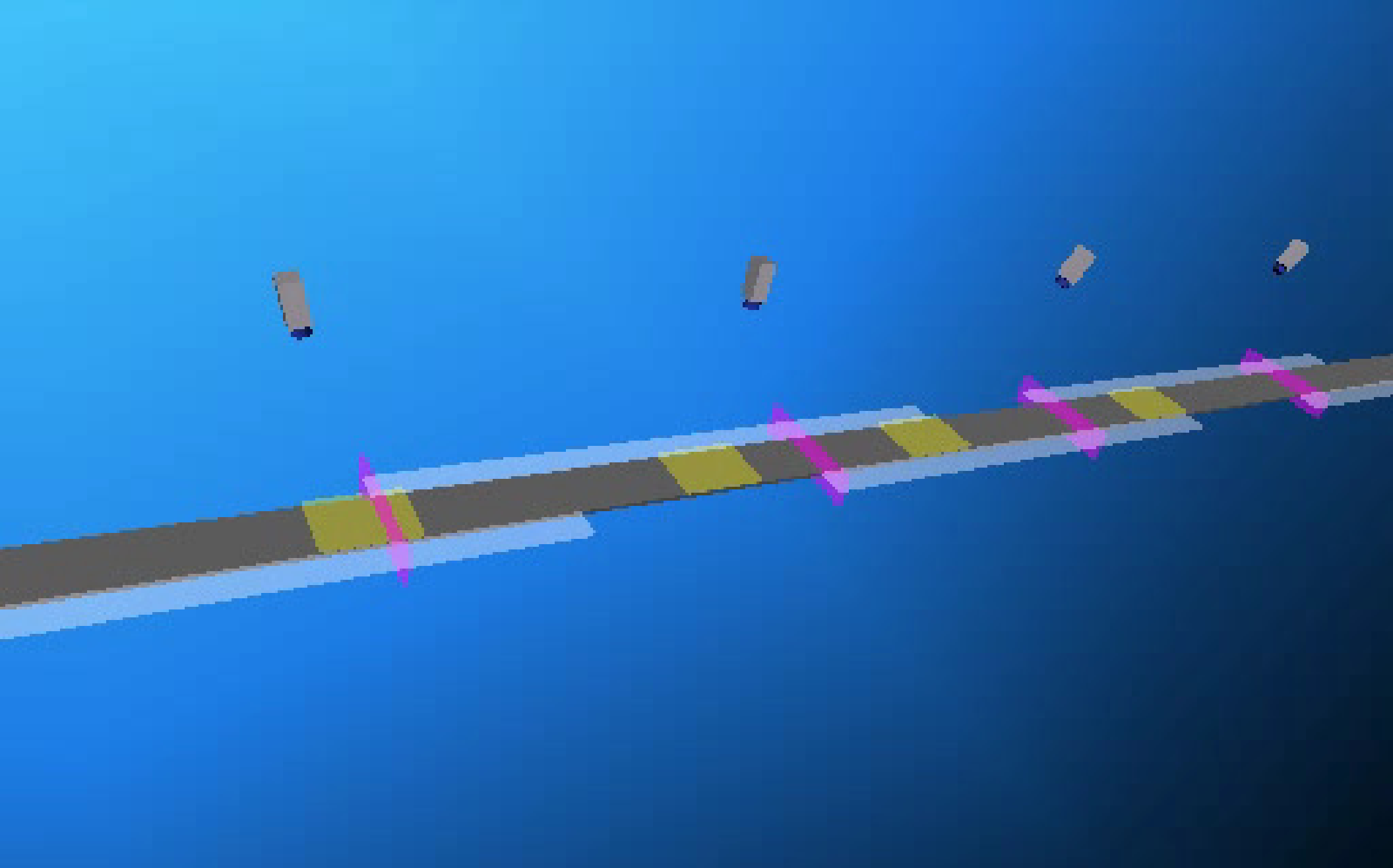


Video 4: tracking





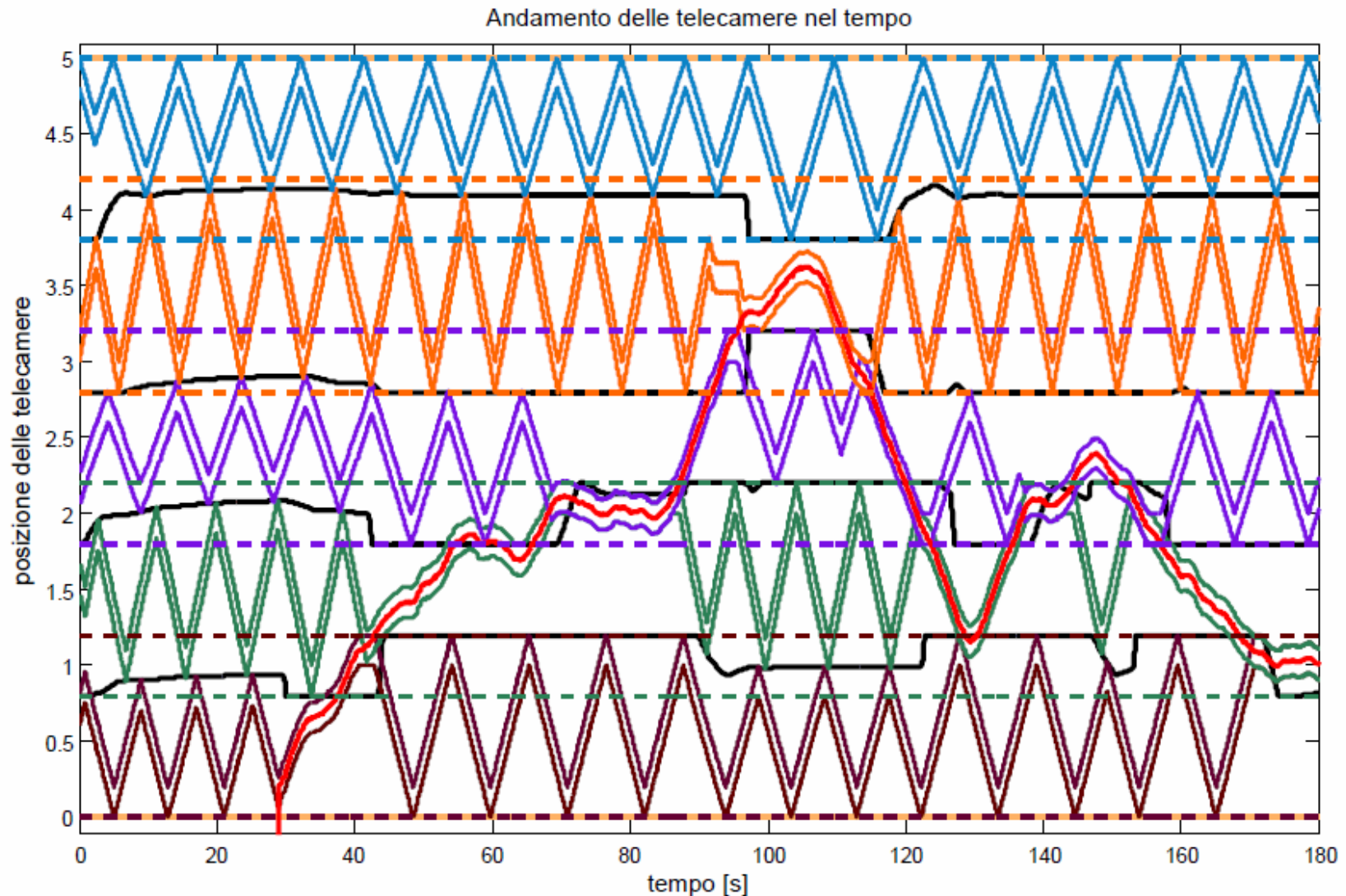
Video 4: zoom sull'evento



Simulazioni: tracking

Tracking con comunicazione sporadica (media 1s)

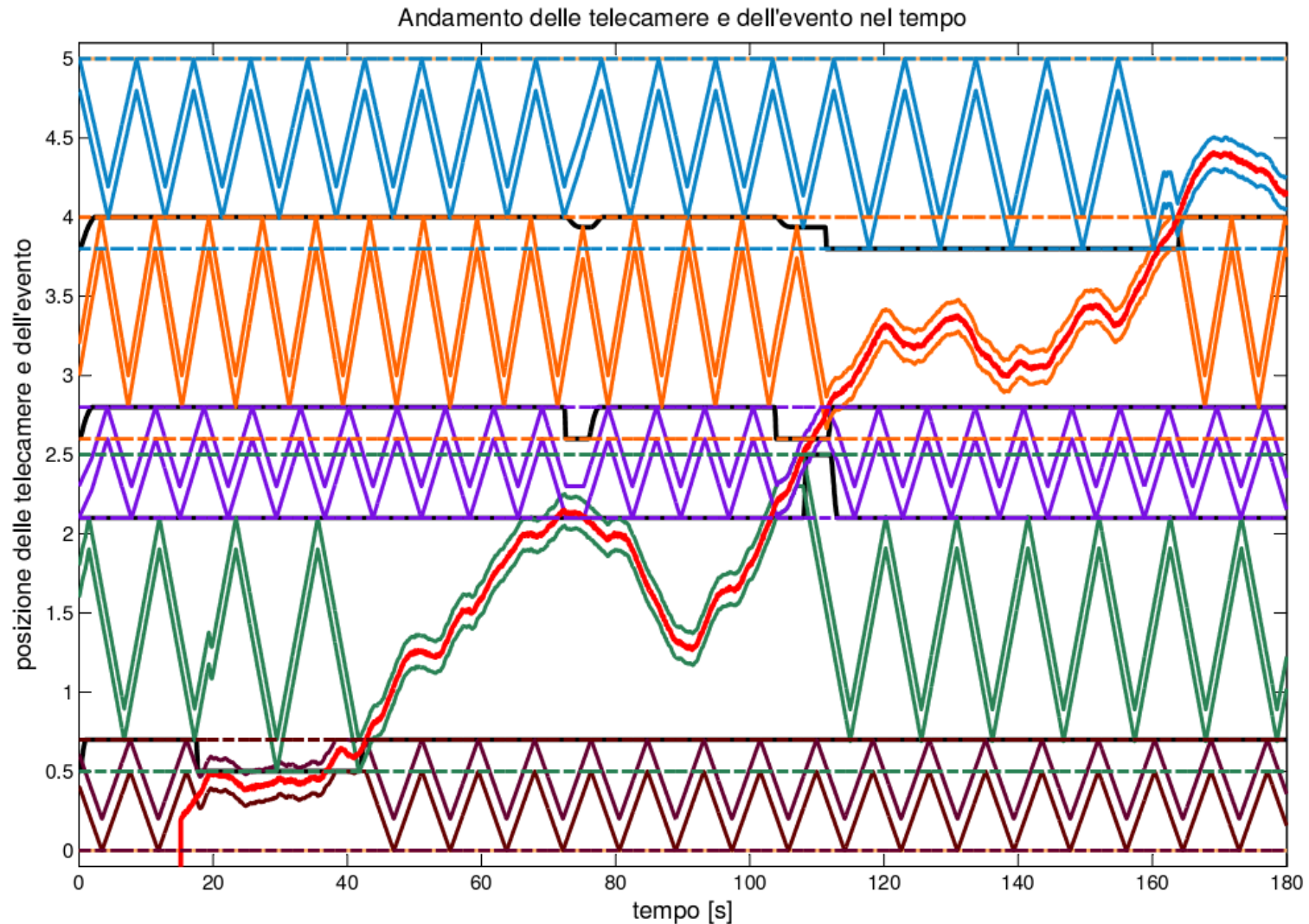
Buone prestazioni a parte inevitabili effetti di ritardo/attesa



Simulazioni: tracking

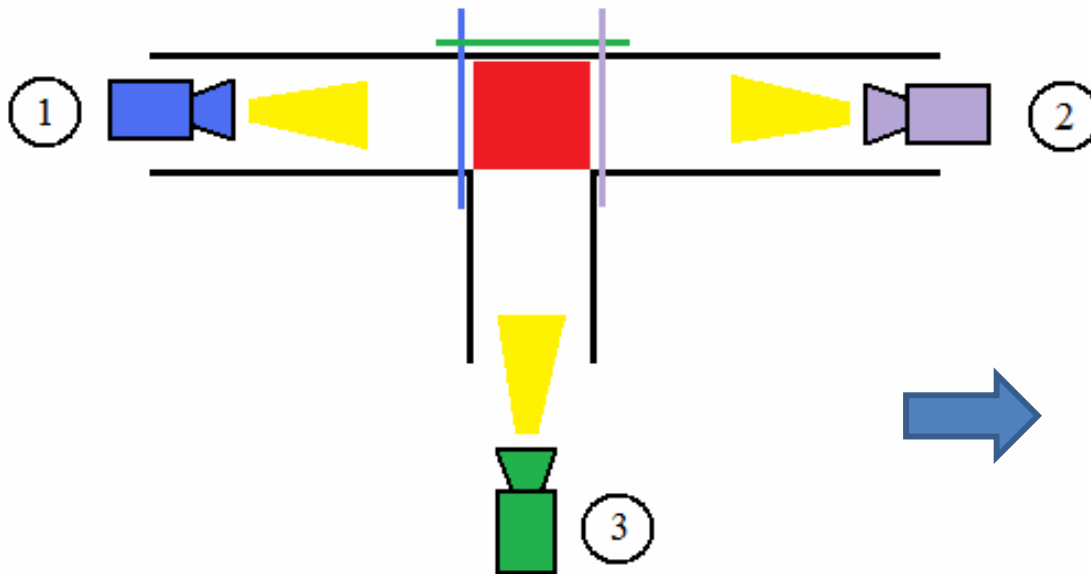
Tracking con vincoli di copertura e camere lente

Comportamento efficiente, nonostante sezioni di copertura differenti.



1.5 D :

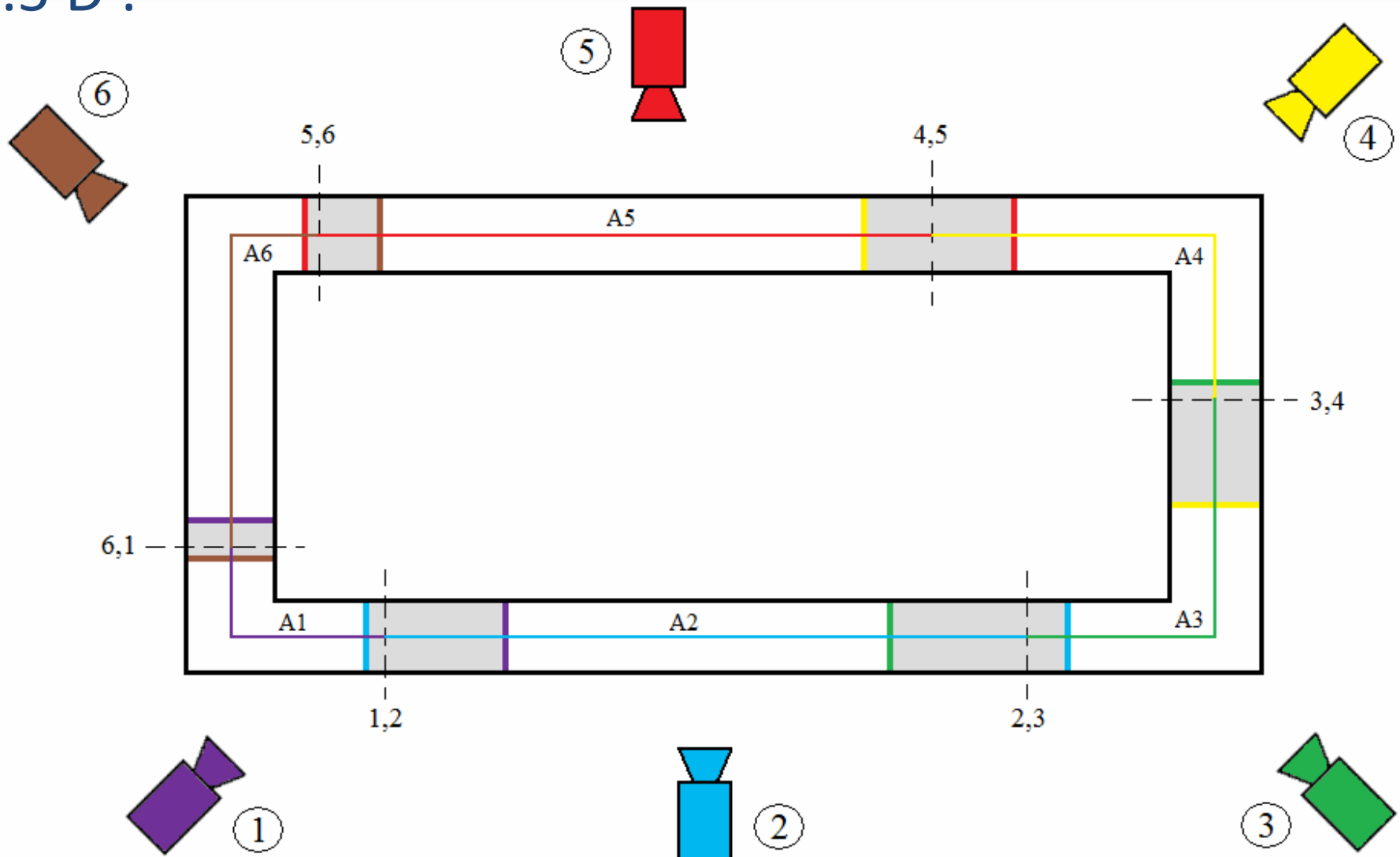
Il metodo proposto è stato concepito per risolvere problemi di copertura *monodimensionali* (1D) tuttavia presenta una naturale *estensione* a situazioni più complesse modellabili in *1.5 D*



Possibile modellizzazione di
un incrocio con zona condivisa
da più di 2 telecamere

Sviluppi futuri e conclusioni

1.5 D :





Vantaggi del metodo proposto :

- Soddisfa un criterio di ottimalità ragionevole per problemi di *patrolling*
- Adatto per effettuare il *tracking* di eventi
- *Semplicità* della soluzione adottata e facilità di dimostrarne le proprietà di convergenza tramite l'analogia con una sistema meccanico molto intuitivo
- Intrinsecamente *distribuito*
- *Robustezza* in caso di rottura di una telecamera o di un suo impiego nel tracking
- Efficace anche in presenza di *scarsa comunicazione* (perdita di pacchetti) e di *asincronismo* di comunicazione tra gli agenti
- Facilità ad una estensione a casi reali modellabili come *1.5 D* (perimetri aperti o chiusi, catene di montaggio, corridoi e percorsi stradali)