

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DEPARTMENT OF ELECTRICAL, ELECTRONIC AND INFORMATION ENGINEERING
MASTER'S DEGREE IN AUTOMATION ENGINEERING

Control of an autonomous aerodynamic airshield for training Olympics 100m sprint athletes

Candidata:

Giulia Cutini

Relatore:

Prof. Giuseppe Notarstefano

Co-Relatori:

Prof. Melanie Zeilinger

Dr. Andrea Carron

Ing. Lorenzo Sforzi

Venezia – 12 Aprile 2025

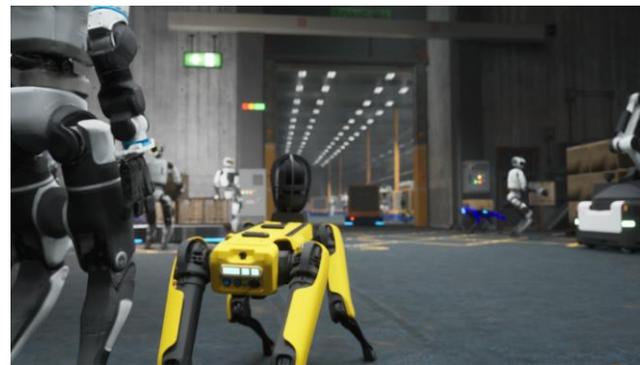
ETH Zürich



Scelta del progetto di tesi



Scelta del progetto di tesi



Motivazioni

Nell'atletica leggera, l'**allenamento sovra massimale** permette all'atleta di migliorare le proprie performance in gara.

Tecnica innovativa: isolare il corridore dalla resistenza dell'aria utilizzando uno scudo per l'aria di plexiglass.



Motivazioni

Nell'atletica leggera, l'**allenamento sovra massimale** permette all'atleta di migliorare le proprie performance in gara.

Tecnica innovativa: isolare il corridore dalla resistenza dell'aria utilizzando uno scudo per l'aria di plexiglass.



Idea di utilizzare un **go-kart autonomo** per trainare lo scudo con l'obiettivo di:

- Permettere un allenamento sovra massimale minimizzando il rischio di infortuni per l'atleta
- Avere un sistema affidabile e riutilizzabile nel futuro
- Non avere emissioni di gas fastidiosi per l'atleta, grazie all'uso di un go-kart elettrico

Motivazioni



Contributi

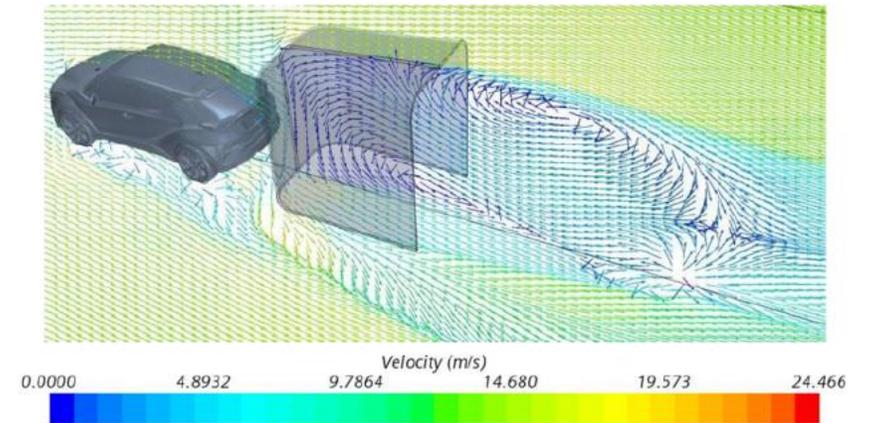
- Formulazione di un modello matematico approssimato del sistema costituito dal go-kart e dallo scudo di plexiglass
- Progettazione di un controllore automatico in grado di regolare la posizione dello scudo in modo ottimale rispetto a quella del corridore
- Implementazione software del controllore
- Test software del controllore in ambiente simulato
- Test Hardware-in-the-loop del sistema completo in ambiente reale

Alcuni studi di aerodinamica¹ hanno dimostrato che correndo nella scia dello scudo:

- Il corridore beneficia dell'isolamento dalla resistenza dell'aria
- Una forza dovuta al ricircolo dell'aria spinge il corridore avanti, aumentando la sua velocità

Distanza di riferimento ottimale $d_{des} = 2.5$ meters

¹ Italian National Olympic Committee (CONI) Institute of Sports Science
"Aerodynamic Shield – new training support technologies"

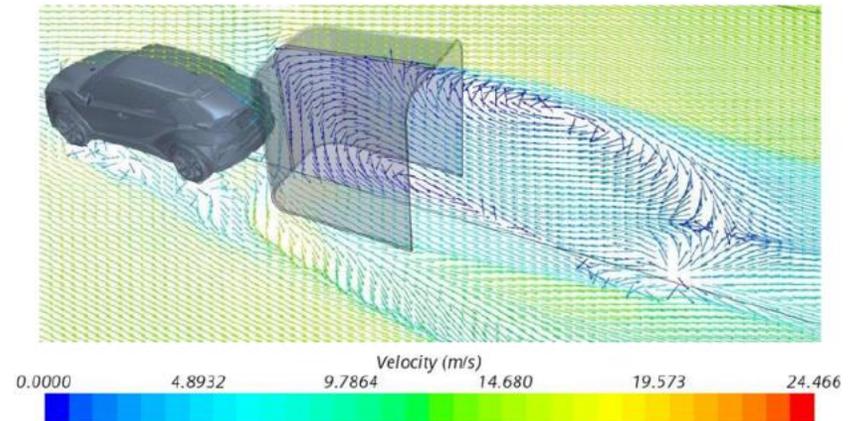


Alcuni studi di aerodinamica¹ hanno dimostrato che correndo nella scia dello scudo:

- Il corridore beneficia dell'isolamento dalla resistenza dell'aria
- Una forza dovuta al ricircolo dell'aria spinge il corridore avanti, aumentando la sua velocità

Distanza di riferimento ottimale $d_{des} = 2.5$ meters

¹ Italian National Olympic Committee (CONI) Institute of Sports Science
"Aerodynamic Shield – new training support technologies"



Obiettivi del controllore da progettare:

- Mantenere la distanza di riferimento ottimale tra lo scudo ed il corridore
- Far coincidere, quanto più possibile, la velocità del go-kart con quella del corridore

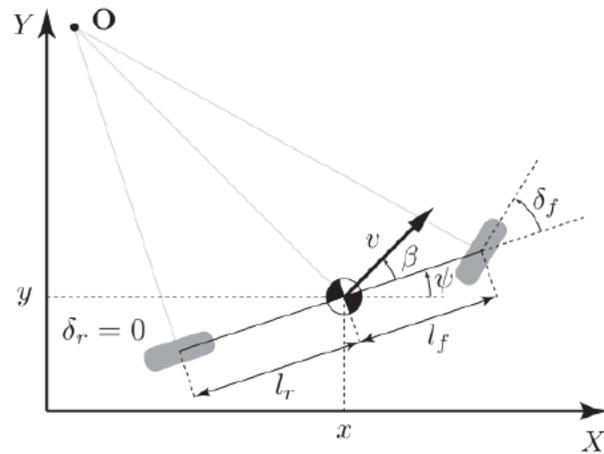
Tre diverse architetture di controllo progettate ed implementate:

Gain Scheduling Linear
Quadratic Regulator

Linear Model Predictive Controller

Offset-free Model Predictive
Controller

Modellazione del sistema: go-kart e scudo per l'aria

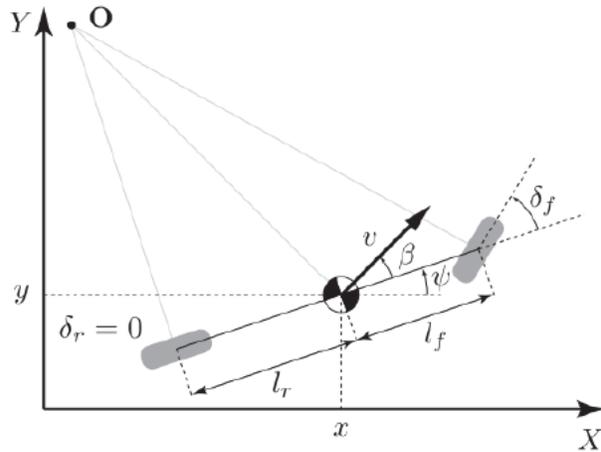


Modello non-lineare di un biciclo

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos(\psi(t) + \beta(t)) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin(\psi(t) + \beta(t)) \\ \dot{\psi}(t) = \frac{v(t)}{l_r} \sin(\beta(t)) \\ \dot{v}(t) = \frac{F_x(t)}{m} = \frac{1}{m} (C_{m1} a(t) - C_f v(t) - C_d v^2(t) - C_{roll}) \end{cases}$$

- L'allenamento sovra massimale è estremamente faticoso
- Viene eseguito su distanze di 50-80 metri

Modellazione del sistema: go-kart e scudo per l'aria



Modello non-lineare di un biciclo

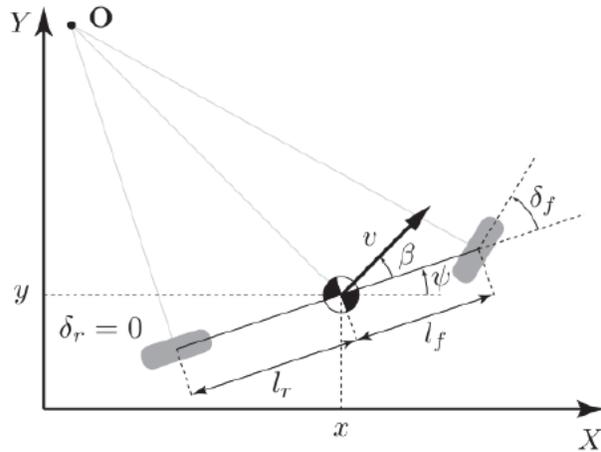
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos(\psi(t) + \beta(t)) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin(\psi(t) + \beta(t)) \\ \dot{\psi}(t) = \frac{v(t)}{l_r} \sin(\beta(t)) \\ \dot{v}(t) = \frac{F_x(t)}{m} = \frac{1}{m} (C_{m1} a(t) - C_f v(t) - C_d v^2(t) - C_{roll}) \end{cases}$$

- L'allenamento sovra massimale è estremamente faticoso
- Viene eseguito su distanze di 50-80 metri

⇒

- Il grado di libertà di sterzata può essere omesso
- Il movimento rimane solo **longitudinale**
- I termini non lineari possono essere trascurati

Modellazione del sistema: go-kart e scudo per l'aria



Modello non-lineare di un biciclo

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos(\psi(t) + \beta(t)) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin(\psi(t) + \beta(t)) \\ \dot{\psi}(t) = \frac{v(t)}{l_r} \sin(\beta(t)) \\ \dot{v}(t) = \frac{F_x(t)}{m} = \frac{1}{m} (C_{m1} a(t) - C_f v(t) - C_d v^2(t) - C_{roll}) \end{cases}$$

- L'allenamento sovra massimale è estremamente faticoso
- Viene eseguito su distanze di 50-80 metri

⇒

- Il grado di libertà di sterzata può essere omesso
- Il movimento rimane solo **longitudinale**
- I termini non lineari possono essere trascurati

$$\begin{cases} \dot{p}(t) = v(t) \\ \dot{v}(t) = \frac{F(t)}{m} = \frac{1}{m} (C_{m1} a(t) - C_f v(t)) \end{cases}$$

Sistema lineare tempo-invariante

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_{k,t+1} \\ v_{k,t+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 - dt \frac{C_f}{m} \end{bmatrix} x_{k,t} + \begin{bmatrix} 0 \\ dt \frac{C_{m1}}{m} \end{bmatrix} u_t \\ &= A x_{k,t} + B u_t \end{aligned}$$

Architetture di controllo progettate e implementate

Gain Scheduling Linear Quadratic Regulator

Funzionamento:

- Calcolo offline del guadagno pesato K
- Calcolo online dell'azione di controllo

$$u^* = -K(h_t - h_{des})$$

Pro:

- Costo di calcolo computazionale basso

Contro:

- Saturazione degli attuatori da gestire
- Distanza di sicurezza non garantita
- Architettura di controllo complessa (gain scheduling)
- Impossibilità di incorporare un modello predittivo sulla velocità futura del runner

Linear Model Predictive Controller

Funzionamento:

Problema di ottimizzazione risolto real-time per calcolare l'azione di controllo ottima.

$$\begin{aligned} \min_{x,u} \quad & \sum_{i=t}^{t+N-1} \|x_{p,i|t} - x_{p,des}\|_Q + \|u_{i|t}\|_R \\ \text{subj. to} \quad & x_{p,i+1|t} = A_p x_{p,i|t} + B_p u_{i|t} + a_t \\ & a_{\min} \leq u_{i|t} \leq a_{\max} \\ & d_{\text{safe}} \leq \Delta p_{i|t} \\ & x_{p,t|t} = x_{p,\text{meas}} \end{aligned}$$

Pro:

- Distanza di sicurezza garantita
- Evita by design la saturazione degli attuatori
- Incorpora un modello predittivo sulla velocità futura del runner

Contro:

- Costo di calcolo computazionale alto
- Si basa su un modello semplificato

Offset-free Model Predictive Controller

Funzionamento:

Problema di ottimizzazione risolto real-time per calcolare l'azione di controllo ottima, che tiene conto della semplificazione del modello.

$$\begin{aligned} \min_{x,u} \quad & \sum_{i=t}^{t+N-1} \|x_{p,i|t} - \bar{x}_t\|_Q + \|u_{i|t} - \bar{u}_t\|_R \\ \text{subj. to} \quad & x_{p,i+1|t} = A_p x_{p,i|t} + B_p u_{i|t} + a_t + B_d d_{i|t} \\ & d_{i+1|t} = d_{i|t} \\ & a_{\min} \leq u_{i|t} \leq a_{\max} \\ & d_{\text{safe}} \leq \Delta p_{i|t} \\ & x_{p,t|t} = \hat{x}_t \\ & d_{t|t} = \hat{d}_t \end{aligned}$$

Pro:

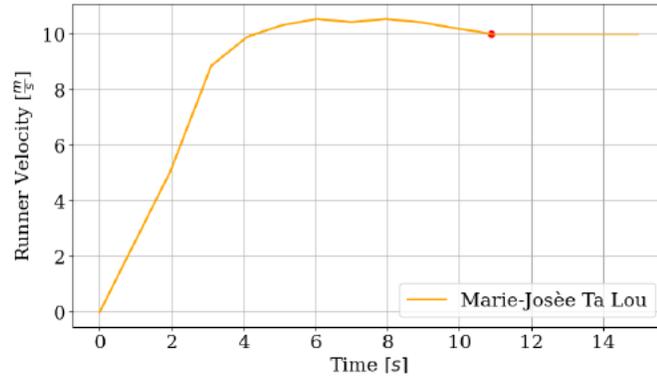
- Modifica la formulazione per adattarsi all'errore introdotto dal modello semplificato

Contro:

- Costo di calcolo computazionale alto

Test in simulazione e paragone dei tre controllori

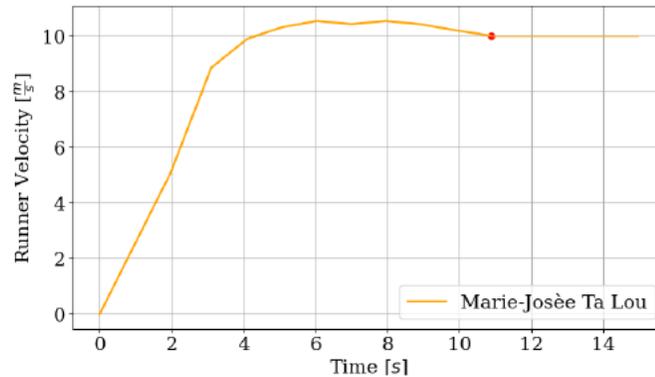
- L'implementazione Software dei tre diversi controllori è stata testata in simulazione
- Sono stati testati usando lo stesso profilo di velocità nel tempo di un'atleta professionista, rilevato durante una gara internazionale di 100m piani



Distanza iniziale: $\Delta p_{init} = d_{des} + \bar{d}$, $\bar{d} = 4m$

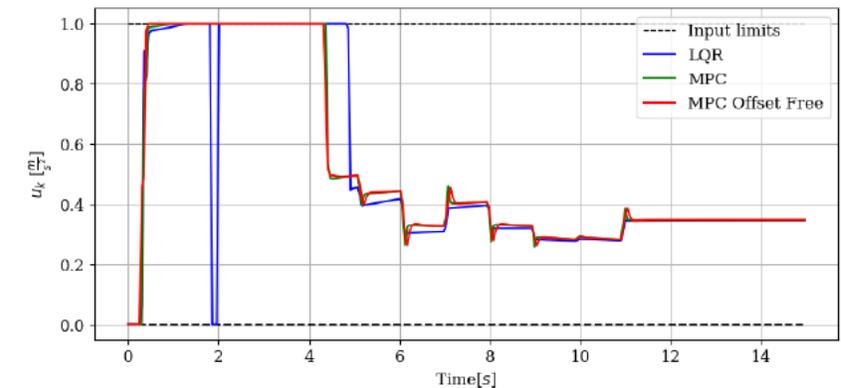
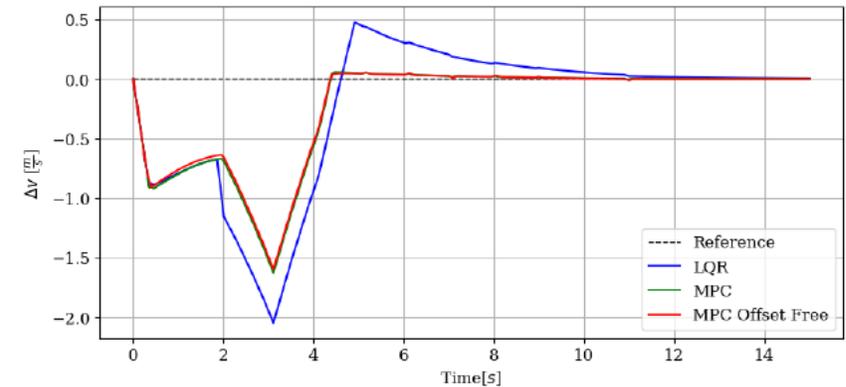
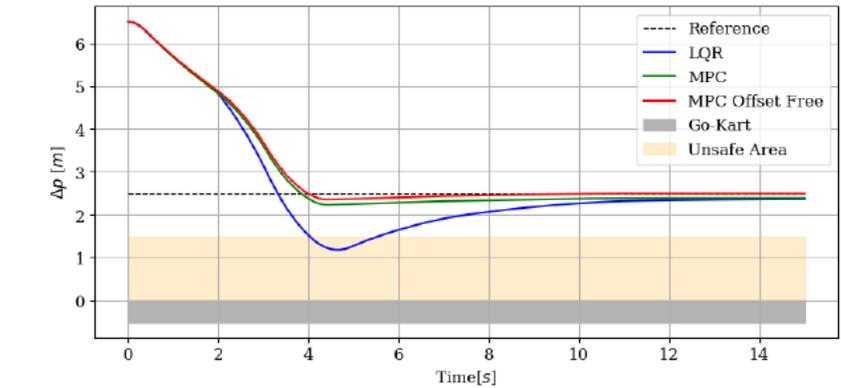
Test in simulazione e paragone dei tre controllori

- L'implementazione Software dei tre diversi controllori è stata testata in simulazione
- Sono stati testati usando lo stesso profilo di velocità nel tempo di un'atleta professionista



Distanza iniziale: $\Delta p_{init} = d_{des} + \bar{d}$, $\bar{d} = 4m$

	LQR	MPC	MPC Offset-free
mean(Δp)	0.8892	0.6867	0.6168
mean(Δv)	0.3987	0.2611	0.2522
IAE on Δp	13.2352	10.1978	9.1515
IAE on Δv	5.9811	3.9176	3.7826
min(Δp)	1.1885	2.2371	2.3605
Energy consumption	0.5208	0.5200	0.5207
Steady state error	0.1354	0.1079	0.0009
"Rise" time to d_{des}	3.3	3.75	3.85



Focus sulla prima parte di accelerazione (catch-up maneuver)



Test Hardware-in-the-loop

Focus sul mantenimento della distanza desiderata tra runner e go-kart, una volta raggiunta una velocità pressoché costante



Control of an autonomous aerodynamic airshield for training Olympics 100m sprint athletes

Grazie per l'attenzione

Domande? Curiosità?

Venezia – 12 Aprile 2025

ETH Zürich

