

# Applicazioni dell'Automatica

## Introduction to mobile robotics: Automated Lane Keeping

(slides prepared by Tommaso Belvedere)

Prof. Giuseppe Oriolo

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INFORMATICA  
AUTOMATICA E GESTIONALE ANTONIO RUBERTI

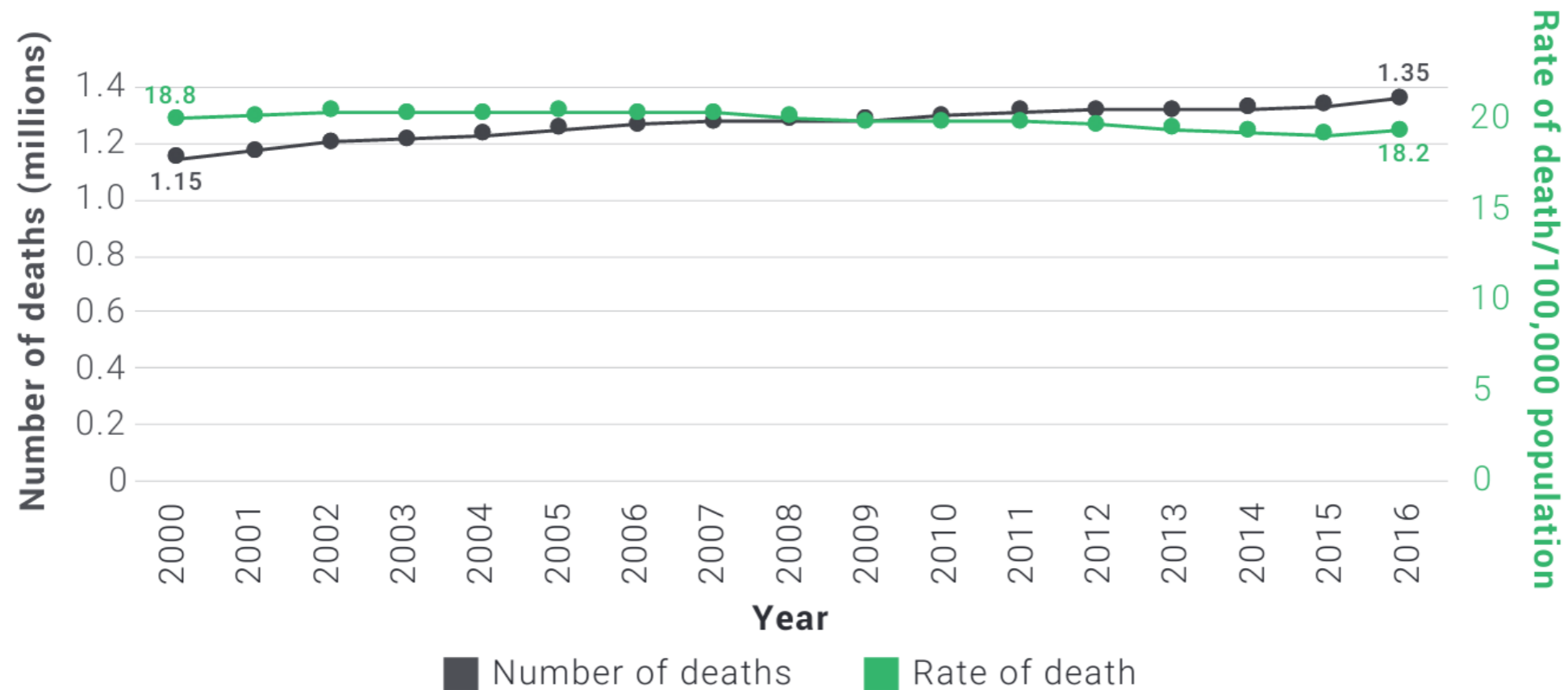


SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Introduzione

# Statistiche

- 1.35 milioni di morti/anno in incidenti stradali (WHO)
- 94% incidenti per cause riconducibili al conducente (tra cui comportamenti errati, affaticamento, etc...) (NHTSA)
- 30% incidenti legati a tamponamenti
- 20% incidenti legati all'uscita dalla corsia



# Sicurezza

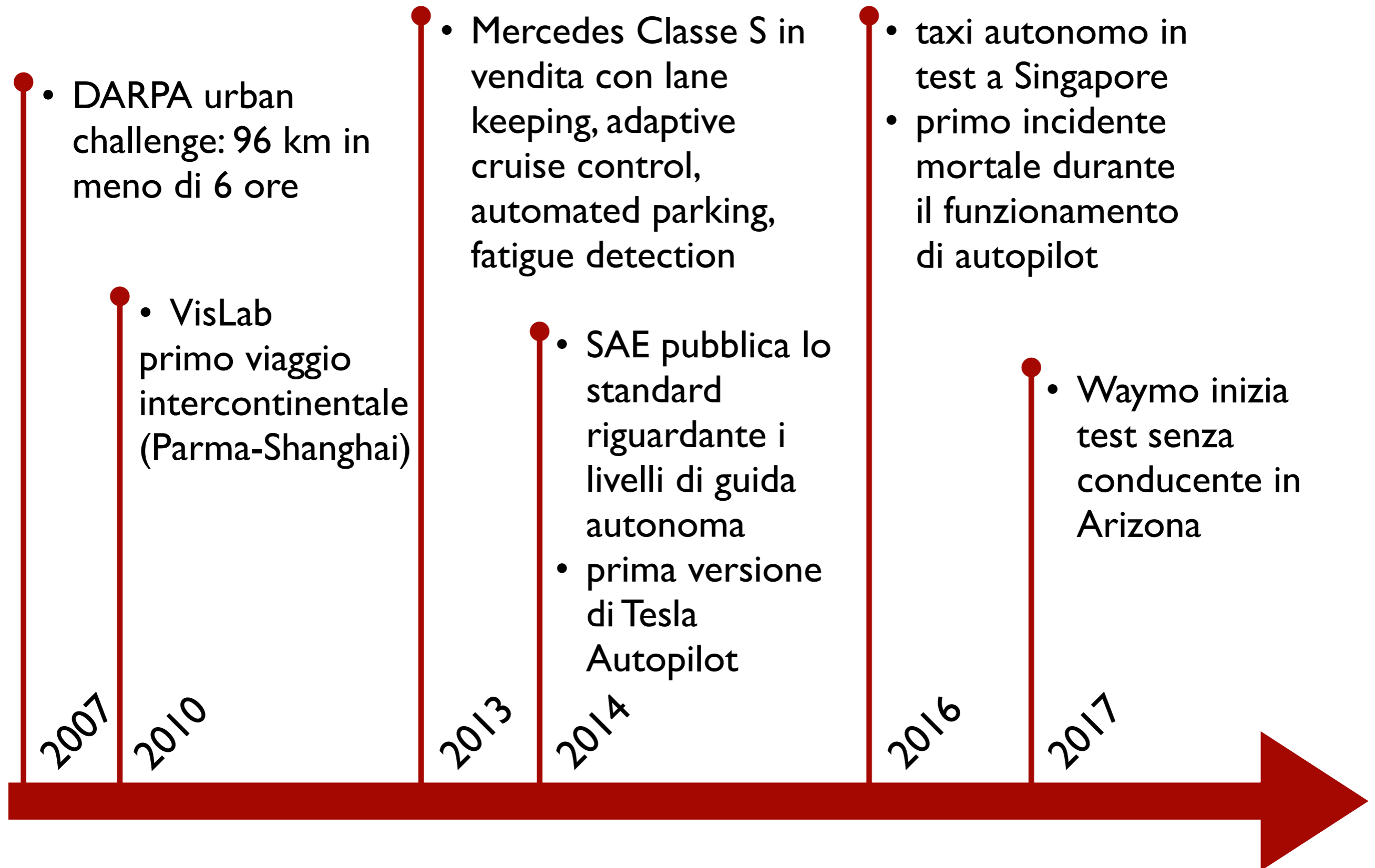
- diverse vie per l'incremento della sicurezza sulle strade (tutti gli utenti)
- **sicurezza passiva**: limitare i danni causati dagli incidenti
  - cinture di sicurezza, airbag, deformazione strutturale...
- **sicurezza attiva**: evitare gli incidenti
  - da ABS/ESC/TC e sistemi di guida **assistita**, fino alla guida **autonoma**



[https://youtu.be/85OysZ\\_4lp0](https://youtu.be/85OysZ_4lp0)



# Storia recente



# I 6 livelli di guida autonoma (SAE)

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?	You <u>are</u> driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You <u>are not</u> driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver's seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
What do these features do?	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatic emergency braking</li> <li>• blind spot warning</li> <li>• lane departure warning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering OR</li> <li>• adaptive cruise control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lane centering AND</li> <li>• adaptive cruise control at the same time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• traffic jam chauffeur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• local driverless taxi</li> <li>• pedals/steering wheel may or may not be installed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions</li> </ul>
Example Features						

# Legislazione

- i livelli SAE sono solo uno standard
- la legislazione è ancora indietro
  - ad oggi sulle strade solo livello 2
- recente regolamento delle Nazioni Unite (60 paesi) riguardo all'Automated Lane Keeping (livello 3):
  1. il guidatore si trova al suo posto con la cintura di sicurezza
  2. non vengono rilevati problemi tecnici
  3. la black-box è attiva
  4. il veicolo si trova su una strada a cui **l'accesso di pedoni e ciclisti è vietato**
  5. il veicolo si trova su una strada il cui **traffico in direzioni opposte è fisicamente separato**
- in UK consultazione per Automated Lane Keeping fino a 60 km/h



# Consultazione UK

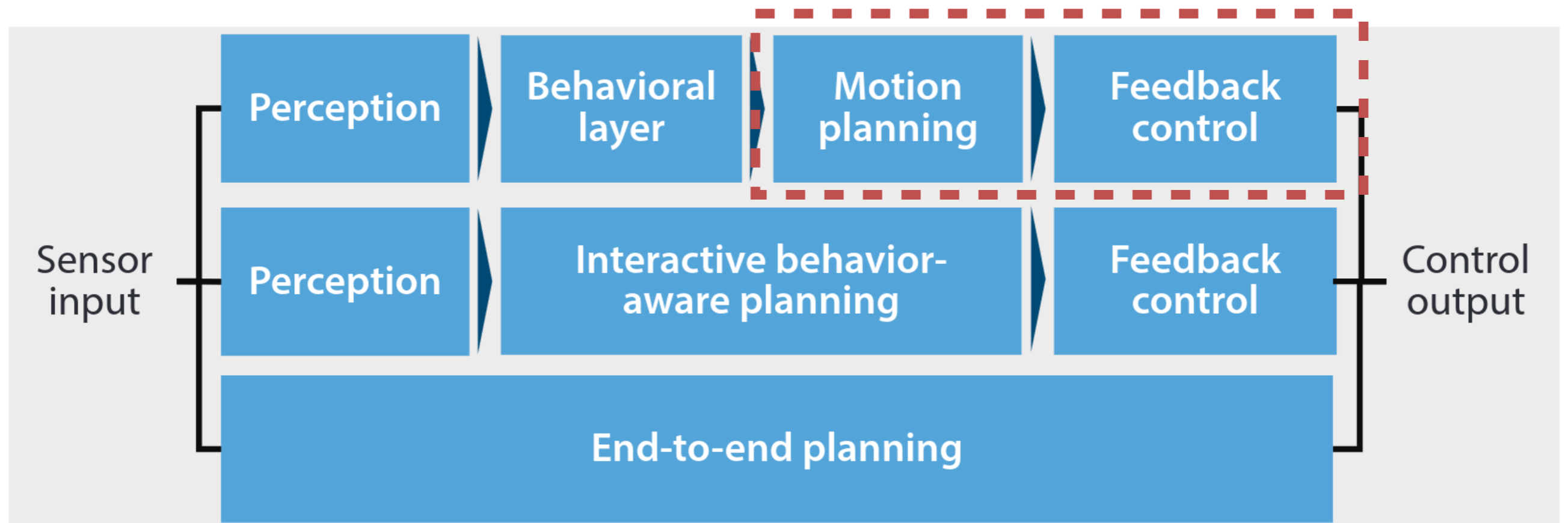
- “ Automated vehicles can perform all the tasks involved in driving, **in at least some situations**. They differ from vehicles fitted with assisted driving features (like cruise control and lane-keeping assistance), which carry out some tasks, but where the driver is still responsible for driving. **If you are driving a vehicle with assisted driving features, you MUST stay in control of the vehicle.**”
- “ Automated vehicles are vehicles that are listed by the Secretary of State for Transport. **While an automated vehicle is driving itself, you are not responsible for how it drives, and you do not need to pay attention to the road.** But you must follow the manufacturer’s instructions about when it is appropriate to engage the self-driving function.
- “ **If the vehicle is designed to require you to resume driving after being prompted to, while the vehicle is driving itself, you MUST remain in a position to be able to take control.** For example, you should not move out of the driving seat. You should not be so distracted that you cannot take back control when prompted by the vehicle.
- “ You are still responsible for the vehicle being in a roadworthy condition, having a current MOT test certificate if applicable, and being taxed and insured.”

# Legislazione - responsabilità

- per i sistemi di assistenza alla guida (livello 1/2) la responsabilità ricade sul **guidatore**
- nel passaggio al livello 3 la responsabilità di un incidente potrebbe ricadere sul **produttore**
- servono leggi chiare e precise sulle specifiche che il sistema deve soddisfare per poter determinare il suo eventuale fallimento
- problematica sul trasferimento del controllo da auto a guidatore
- per questo Audi ha annunciato di puntare direttamente al livello 4 (2020, vedremo...)

# Il problema

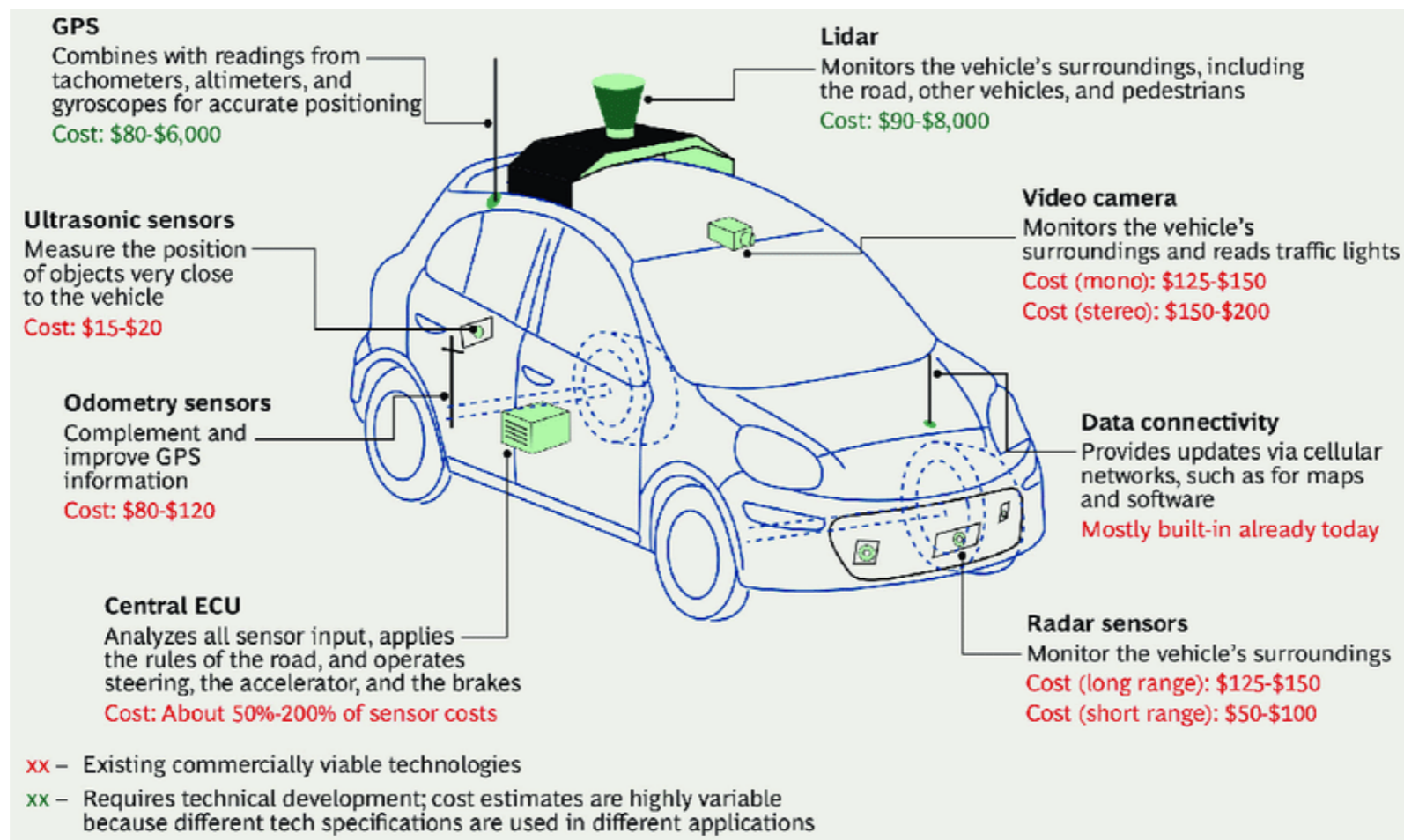
- **obiettivo**: trasformare ciò che viene percepito dai sensori in un'azione
- possibile dividere il problema in sottoproblemi (**pipeline**)
  - approccio modulare più "semplice", ma errori si propagano lungo la pipeline (Tesla)
- esistono approcci end-to-end (tipicamente data-driven)
  - promettente ma difficile seguire specifiche e generalizzare





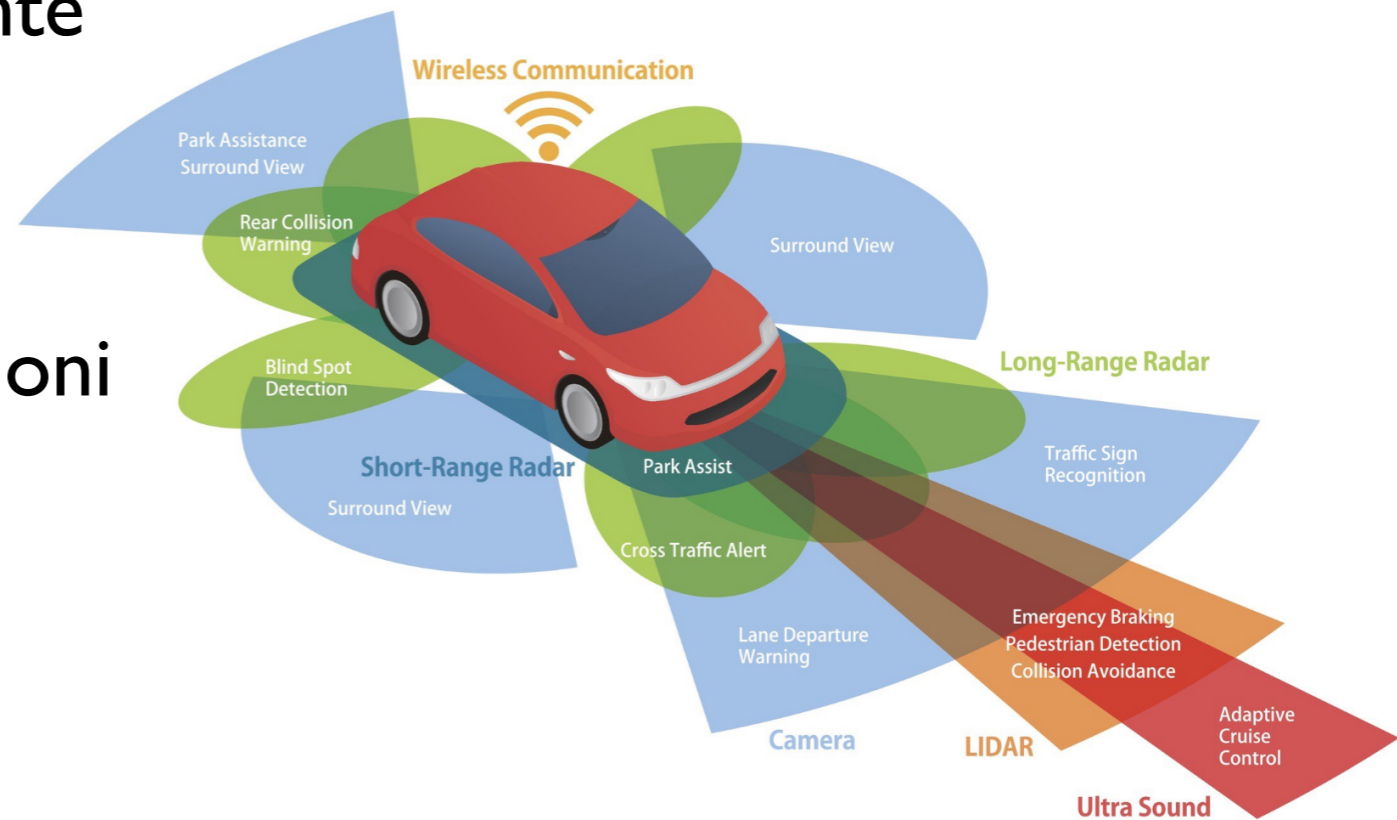
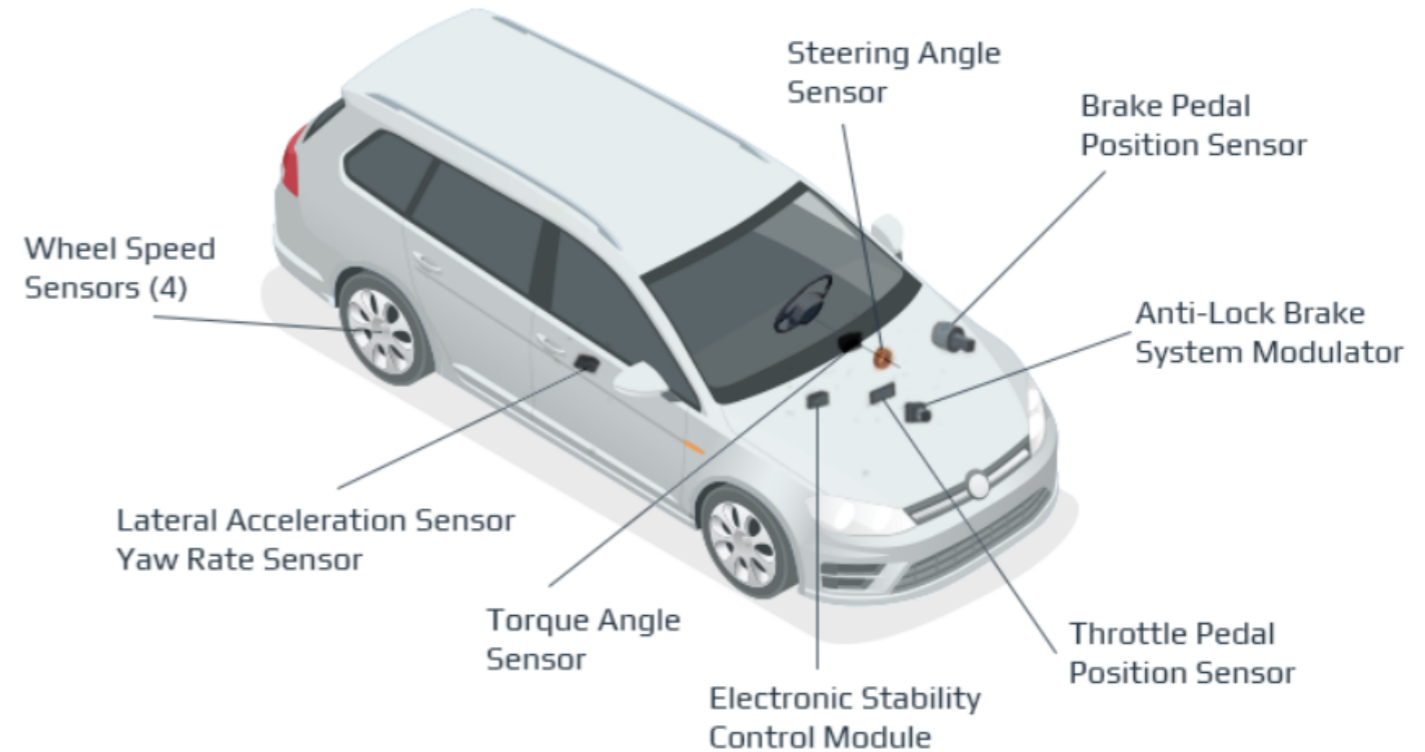
# Sensori

- array di sensori di diverso tipo e con diverse specifiche
- necessità di **ridondanza** e **robustezza** rispetto alle condizioni atmosferiche
- combinazione di sensori diversi per lo stesso compito aumenta l'accuratezza (**sensor fusion**)





# Sensori

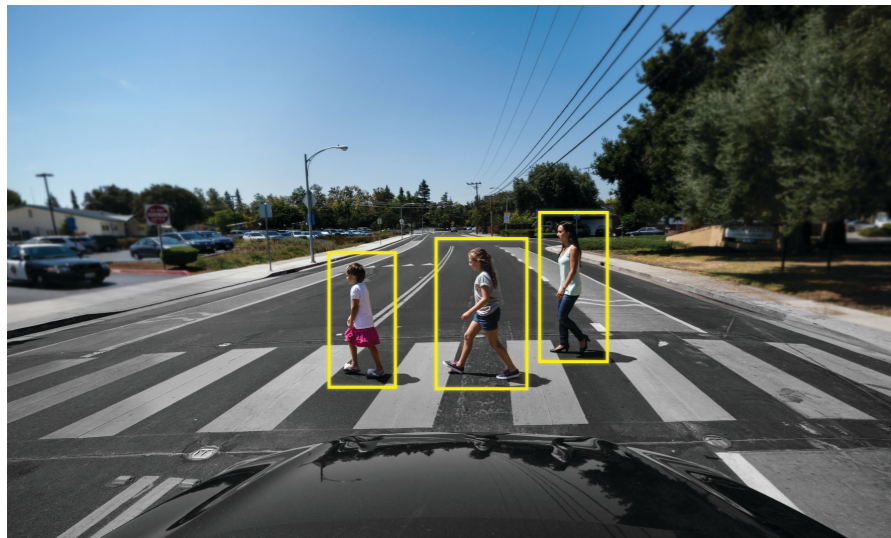
- **sensori propriocettivi**
- stimano lo stato "interno" del sistema
  - assetto del veicolo e input del guidatore
- **sensori esteroceettivi**
- percepiscono l'ambiente circostante
  - altri veicoli, segnali stradali (verticali e orizzontali), pedoni, ciclisti, ostacoli generici, condizioni stradali
  - radar, lidar, ultrasuoni, camera, camera infrarossi...



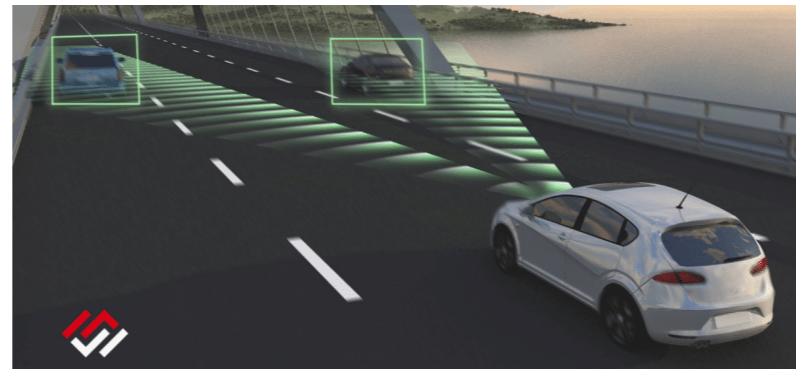


# Sensori

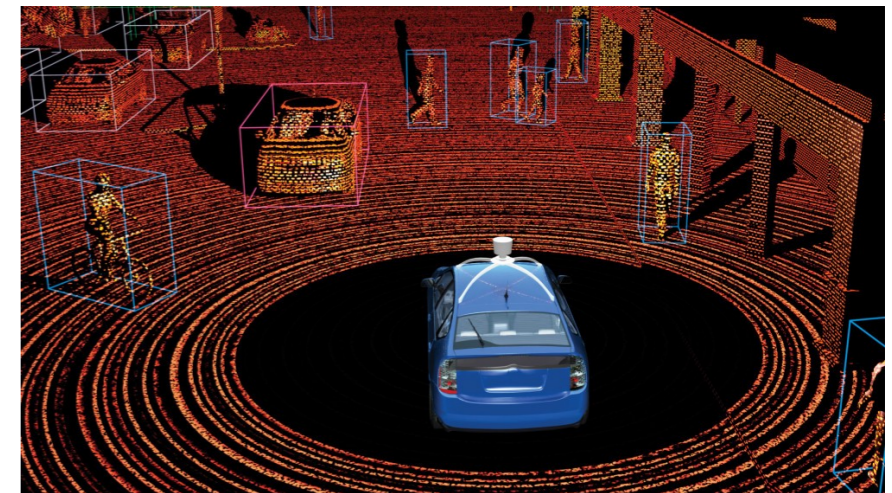
		
Camera	informazione elevata	no distanza, condizioni atmosferiche
Radar	velocità e posizione, anche scarsa visibilità	problemi con pedoni e ciclisti, informazione ridotta
Lidar	mappatura 3D dettagliata, anche ridotta visibilità	costoso, range relativamente limitato



camera



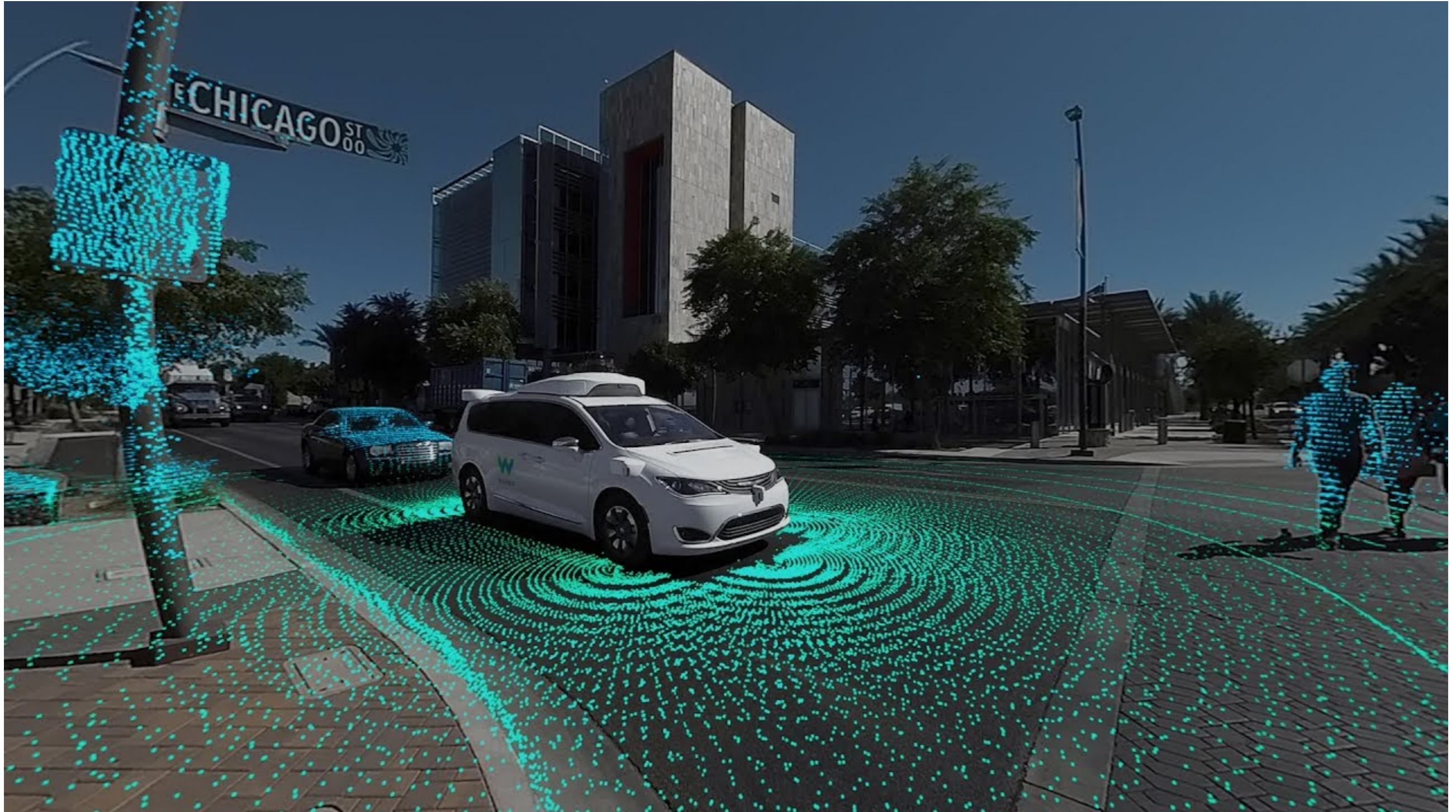
radar



lidar



# Sensori

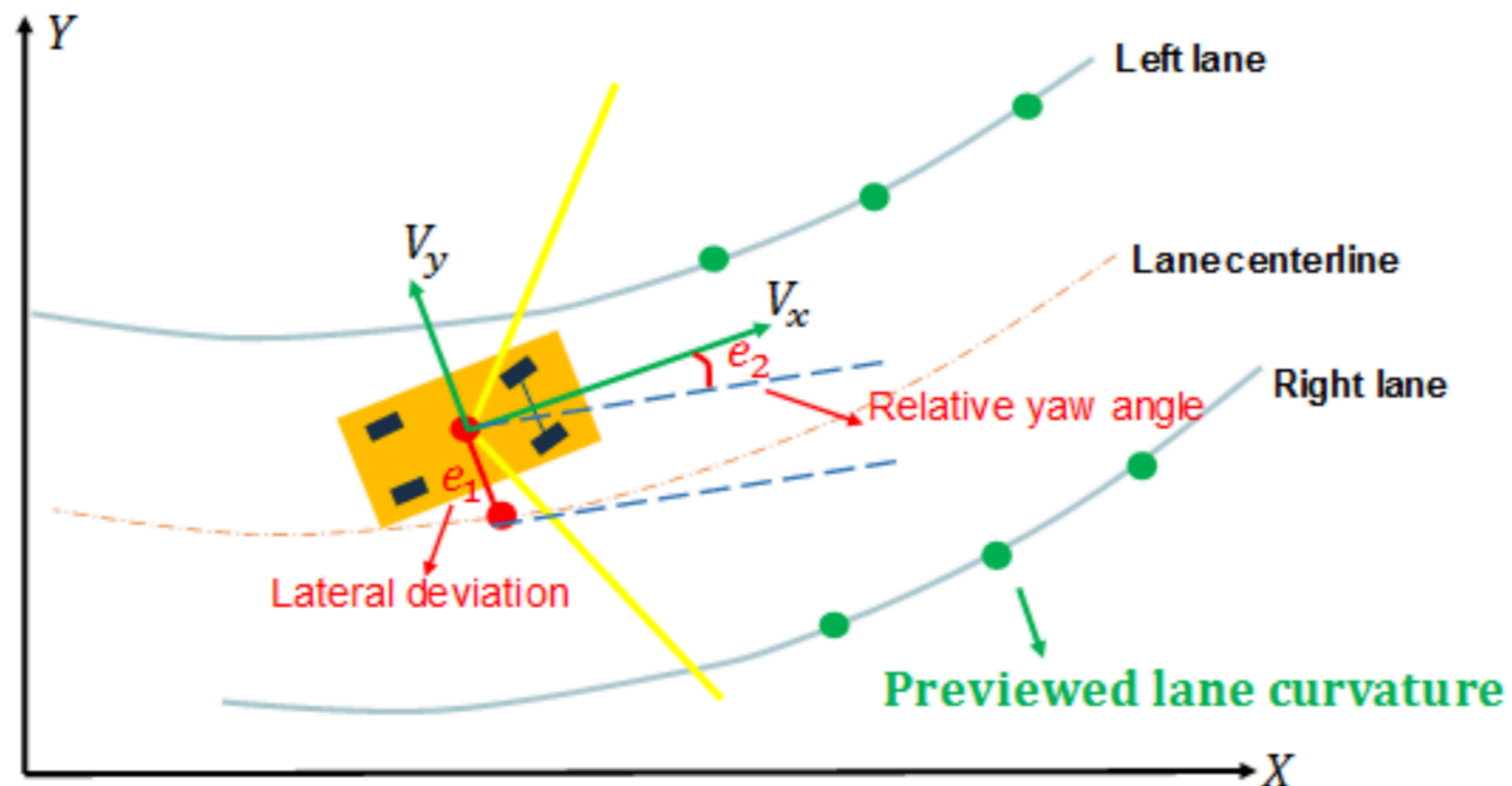


<https://youtu.be/B8R148hFxPw>



# Esempi

- Lane Keeping Assist (LKA)
  - corregge gli input dati dal conducente per non uscire dalla corsia
  - possibilità di feedback aptico al volante per l'override del conducente
  - come capire quando una brusca sterzata è volontaria?
- Lane Centering Assist (LCA)
  - mantiene il veicolo centrato nella corsia



# Esempi

- Intelligent Speed Assist (ISA)
  - regolazione velocità (solo accelerazione) in base a segnali stradali e dati GPS
  - limiti di velocità e possibili pericoli
- Lane Change Assist
  - controllo dell'angolo cieco
- Adaptive Cruise Control (ACC)
  - mantenimento della velocità desiderata (acceleratore e freno), eventualmente rallentando per mantenere la distanza di sicurezza



# Sfide

- gestione del takeover in sicurezza (livello 3)
- guida in ambienti urbani
- robustezza
- formazione degli utenti

# Cosa vedremo nel prossimo futuro?

- sistemi di livello 3 in autostrada
- sistemi di livello 4 in ambienti controllati (servizio taxi)
- riduzione costo apparecchiature (soprattutto lidar)
- ...
  
- sistemi attuali si basano su agenti isolati
  - aggiornamento infrastrutture (smart roads)
  - interconnessione veicoli

# **Safe vehicle control: Model Predictive Control and Control Barrier functions**

# Cosa vedremo

- controllo di un uniciclo lungo un percorso
- obiettivi **primari**
  - tracking della posizione cartesiana
  - velocità desiderata
- obiettivi di **sicurezza**
  - adaptive speed regulation (ACC)
  - lane keeping (LK)
  - obstacle avoidance (tramite lane keeping)
- **strumenti**
  - Model Predictive Control
  - Control Barrier Function

# Controllo tramite ottimizzazione

- **controllori classici**

- struttura fissata (PID, PI, lead-lag...)
- tuning parametri per ottenere prestazioni desiderate
- • legge di controllo in forma chiusa

- **alternativa**

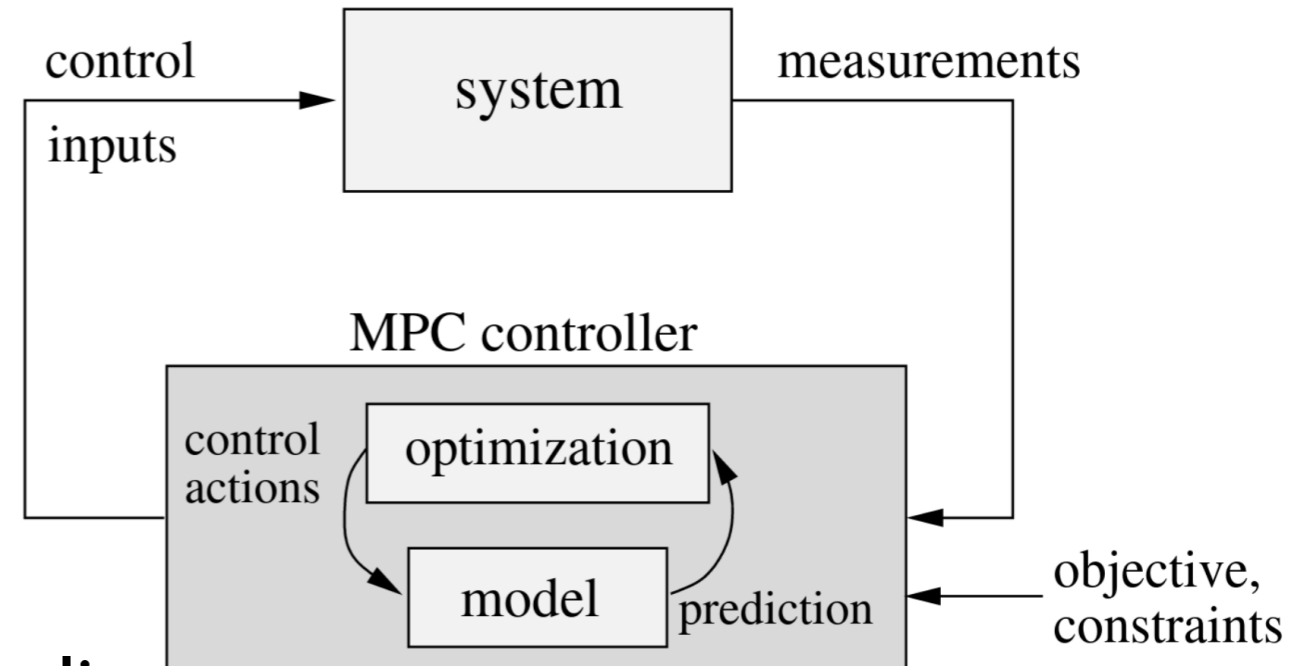
- definire gli obiettivi in un problema di ottimizzazione per trovare l'azione "migliore"
- comunque presente un tuning dei parametri
- spesso non esiste una forma chiusa: per avere un feedback è necessario risolvere un problema di ottimizzazione ad ogni istante di controllo
- si possono inserire vincoli che la soluzione deve soddisfare

# Model Predictive Control

- usato dagli anni '80 per controllo di processi industriali (chimici)
- nei decenni successivi numerosi sviluppi teorici e applicativi
- ad oggi molto usato in diversi ambiti, tra cui robotica e automotive
- permette di integrare facilmente vincoli (e.g. di sicurezza)

- **ingredienti:**

- modello
- funzione di costo
- vincoli
- "ottimizzatore"



$$u^* = \arg \min \sum_{i=0}^{N-1} L(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i) + E(\mathbf{x}_N)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}_0 = \bar{\mathbf{x}}_0$$

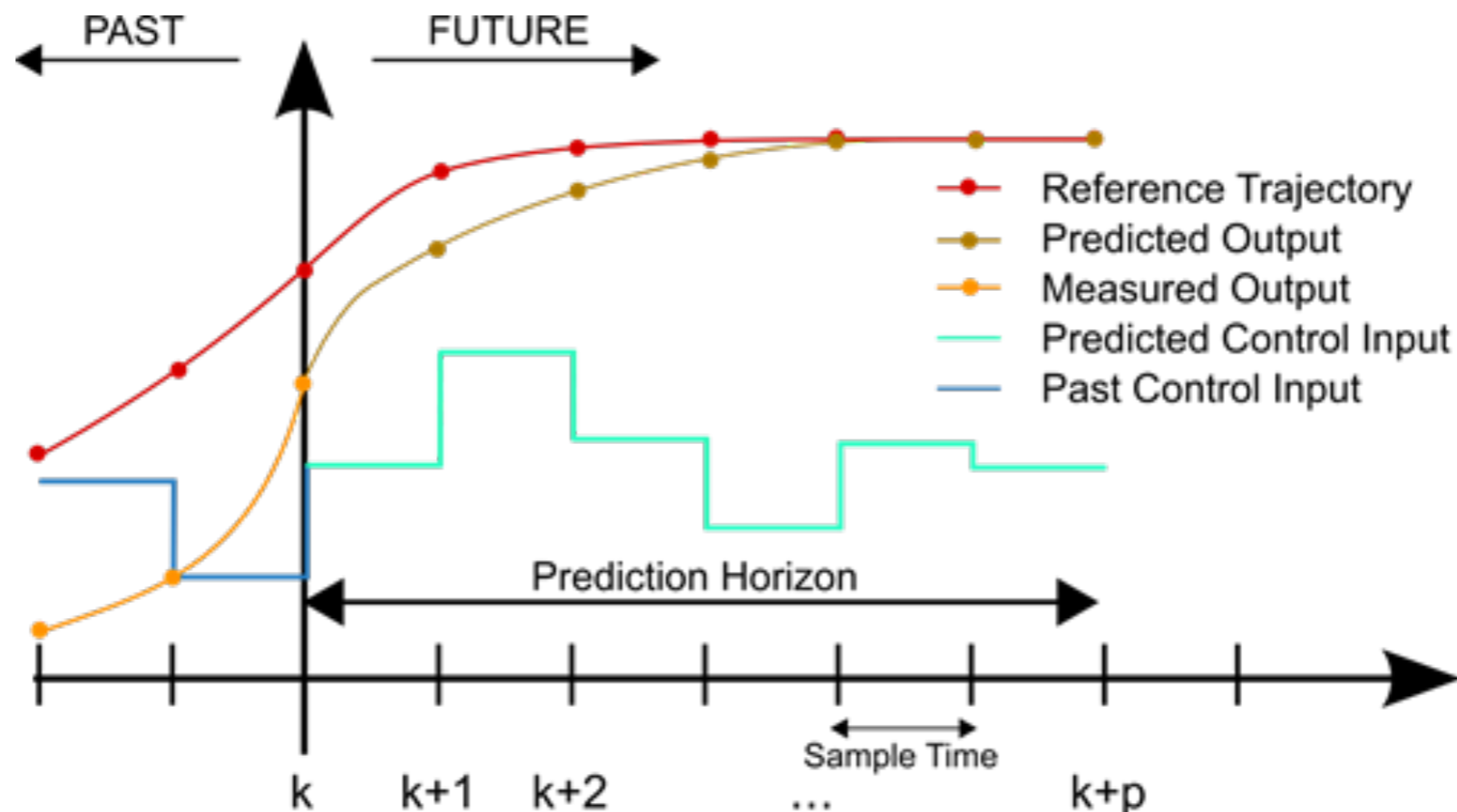
$$\mathbf{x}_{i+1} = F(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i), \quad i = 0, \dots, N - 1,$$

$$G(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i) \leq 0, \quad i = 0, \dots, N - 1$$



# Receding horizon control

- viene ottimizzata la **predizione** del sistema lungo una finestra temporale finita (**orizzonte**)
- dall'ottimizzazione si ottiene una sequenza di input "ottimi"
- viene applicato il primo input
- il sistema evolve durante l'intervallo di campionamento
- il processo si ripete (l'orizzonte trasla in avanti)





# Vincoli di sicurezza

- insieme sicuro  $\mathcal{C} = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) \geq 0\}$
- vogliamo che gli input siano sempre tali da mantenere il sistema in sicurezza
- in formule  $u \in \{u : h(x) \geq 0, \forall t\}$
- semplicemente imponendo  $h(x) \geq 0$  nel problema di ottimizzazione la correzione avviene solo quando il vincolo è **attivo**
- le control barrier functions (CBF) forniscono una condizione sugli input affinché il sistema ad anello chiuso rimanga nell'insieme sicuro
- questa condizione dipende da  $\dot{h}(x)$ :
  - più siamo vicini al bordo dell'insieme sicuro (pericolo) e più dobbiamo muoverci lentamente

# Control Barrier Functions - definizioni

- **definizione** (funzione di classe  $\mathcal{K}$  estesa) una funzione continua  $\alpha : (-b, a) \rightarrow (-\infty, \infty)$  con  $a, b > 0$  è una funzione di classe  $\mathcal{K}$  estesa se è strettamente crescente e  $\alpha(0) = 0$
- esempio: tutte le funzioni del tipo  $\alpha(\cdot) = \alpha \cdot$  con  $\alpha$  costante positiva
- **definizione** (derivata di Lie) presi una funzione scalare  $c(x)$  ed un campo vettoriale  $V(x)$ , la derivata di Lie di  $c(x)$  rispetto a  $V(x)$  è

$$L_V c(x) = \frac{\partial c(x)}{\partial x} V(x)$$

# Control Barrier Functions - definizioni

- **definizione** (grado relativo) preso un sistema non lineare input-affine  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$  con output  $y = h(x)$ , tale output ha grado relativo  $r$  rispetto al sistema se

$$L_g L_f^k h(x) = 0 \quad \text{per } k < r - 1$$

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$$

- questo implica che

$$y = h(x)$$

$$\dot{y} = L_f h(x)$$

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x)$$

$$\vdots$$

$$y^{(r-1)} = L_f^{r-1} h(x)$$

$$y^{(r)} = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x)u$$

# Control Barrier Functions

- dato un insieme  $\mathcal{C}$ , una funzione  $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  di classe  $C^1$  è una control barrier function definita su un insieme  $\mathcal{D}$  con  $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^n$ , se esiste una funzione  $\alpha$  di classe  $\mathcal{K}$  estesa tale che, per ogni  $x \in \mathcal{D}$

$$\sup_{u \in U} [L_f h(x) + L_g h(x)u + \alpha(h(x))] \geq 0$$

- una legge di controllo che soddisfi tale condizione rende l'insieme  $\mathcal{C}$  **invariante**

- puntualmente si può riscrivere la condizione come

$$\dot{h}(x) \geq -\alpha(h(x))$$

- stiamo imponendo un **lower bound sulla variazione** temporale di  $h(x)$ 
  - $h(x)$  può decrescere, ma più ci si avvicina al bordo e più deve “rallentare”
  - $\alpha$  diventa un parametro di design per regolare la **conservatività** del vincolo



# Esempio

- consideriamo il sistema

$$\dot{x}_1 = -x_1 + u_1$$

$$\dot{x}_2 = -x_2 + u_2$$

$$f(x) = \begin{pmatrix} -x_1 \\ -x_2 \end{pmatrix} \quad g(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- definiamo la regione sicura al di fuori di un cerchio di raggio 0.5 centrato in (1,1):

$$h(x) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 1)^2 - 0.25$$

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) = -2(x_1 - 1)x_1 - 2(x_2 - 1)x_2,$$

$$L_g h(x)u = \frac{\partial h}{\partial x} g(x)u = 2(x_1 - 1)u_1 + 2(x_2 - 1)u_2$$

- l'input deve quindi soddisfare

$$\sup_{u \in \mathbb{R}^2} [2(x_1 - 1)(u_1 - x_1) + 2(x_2 - 1)(u_2 - x_2) + \alpha(h(x))] \geq 0$$

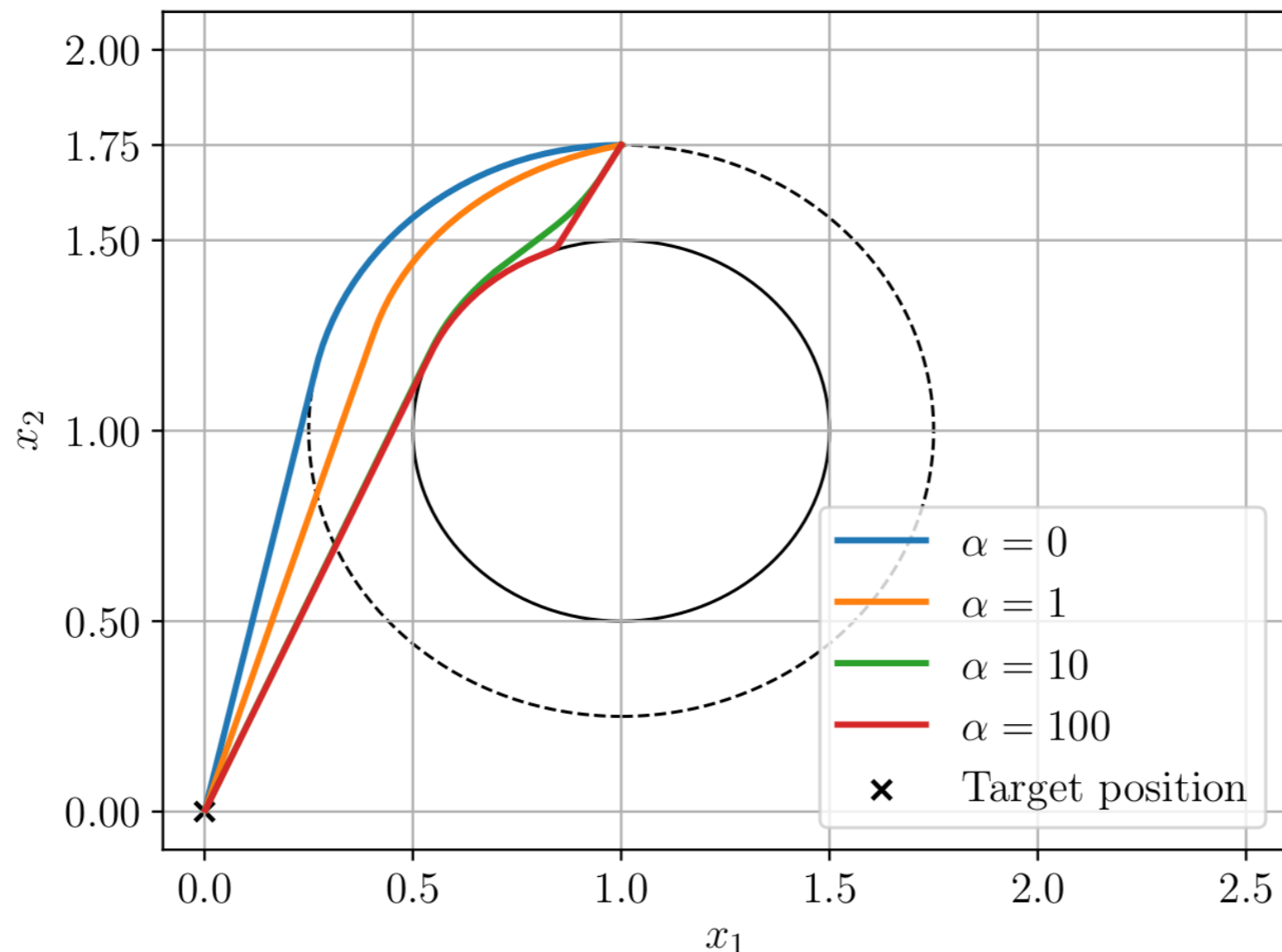
# Esempio

- definiamo quindi la legge di controllo secondo il problema

$$u^*(x) = \arg \min_{u \in \mathbb{R}^2} u^T u$$

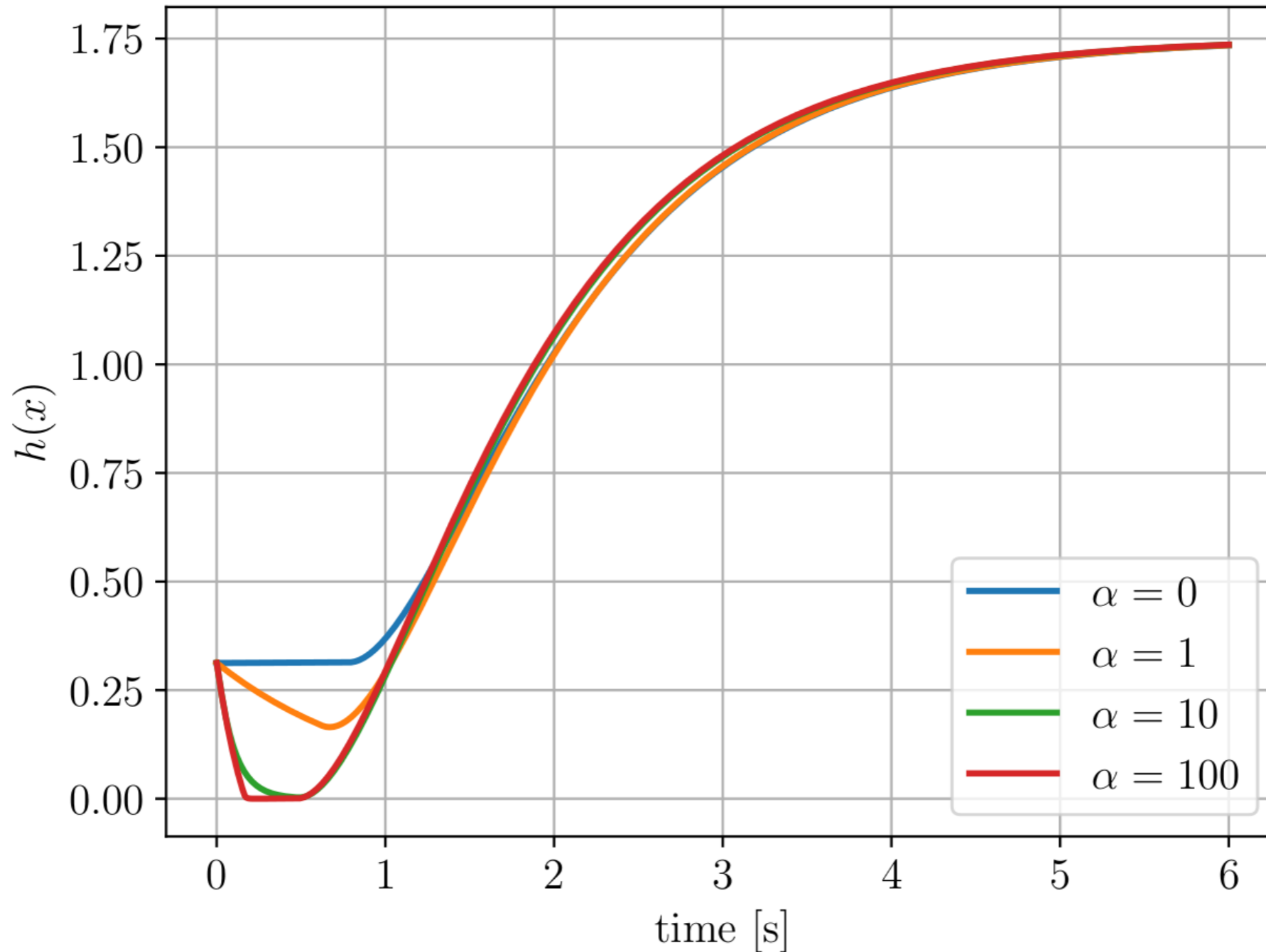
$$\text{s.t. } \dot{h}(x) + \alpha h(x) \geq 0$$

- la traiettoria del sistema dipende da  $\alpha$



# Esempio

- al variare di  $\alpha$  cambia l'andamento di  $h(x)$
- per  $\alpha = 0$  si ha  $h(x) \geq h(x_0)$  (caso limite)



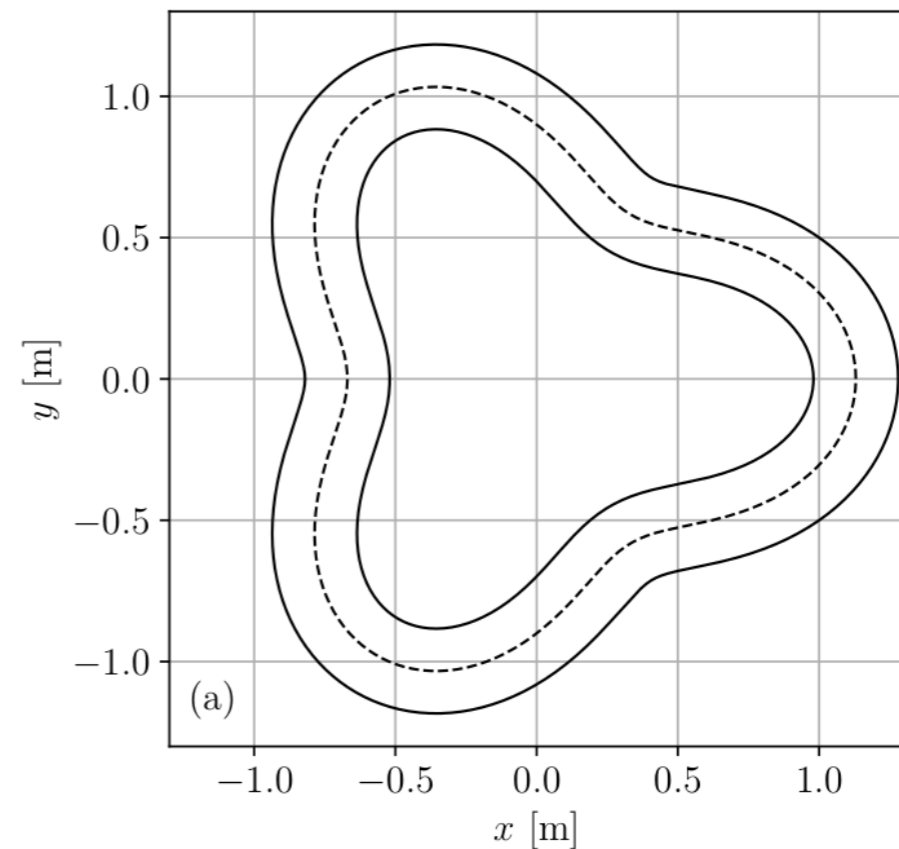
# Percorso e modello

- definito in coordinate polari

$$R_{path} = R + b \cos(n\phi)$$

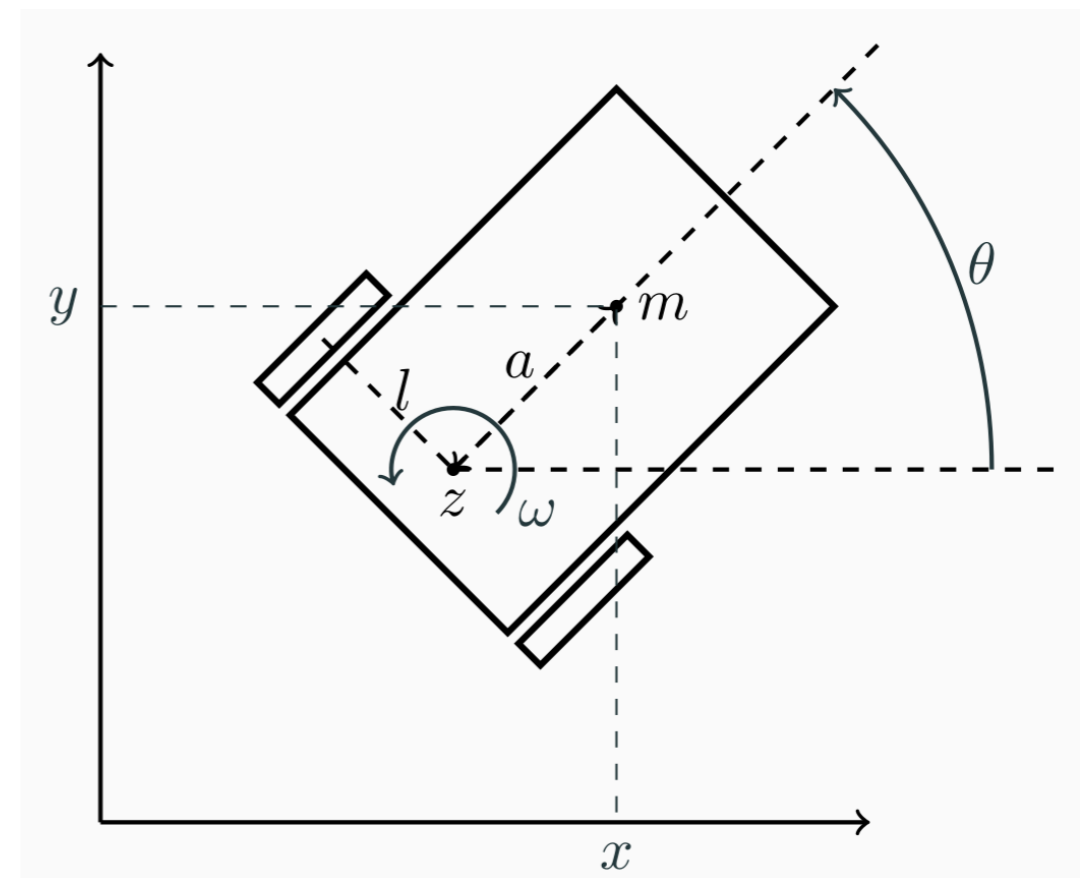
$$x_d = R_{path} \cos(\phi)$$

$$y_d = R_{path} \sin(\phi)$$



- modello dinamico

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \theta - \omega a \sin \theta \\ v \sin \theta + \omega a \cos \theta \\ \omega \\ \frac{1}{m} u_l \\ \frac{1}{I_{cm}} u_a \end{pmatrix}$$



# Approccio di controllo

- considereremo un MPC la cui **funzione di costo** minimizza l'errore rispetto agli **obiettivi primari** e mentre i **vincoli** garantiscono la **sicurezza** tramite delle CBF

$$\begin{aligned} u^* &= \arg \min J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \text{s.t. } \quad \mathbf{x}_0 &= \bar{\mathbf{x}}_0 \\ \mathbf{x}_{i+1} &= F(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i), \quad i = 0, \dots, N - 1, \\ \dot{h}(\mathbf{x}_i) + \alpha(h(\mathbf{x}_i)) &\geq 0, \quad i = 0, \dots, N - 1, \end{aligned}$$

- per analizzare l'effetto della predizione consideriamo un orizzonte di 30 step (MPC) e di un singolo step (1-step)

# Funzione di costo

- vogliamo
  - minimizzare l'errore in posizione (x,y)
  - minimizzare l'errore in velocità
  - minimizzare (leggermente) la velocità angolare per evitare oscillazioni e rotazioni non necessarie

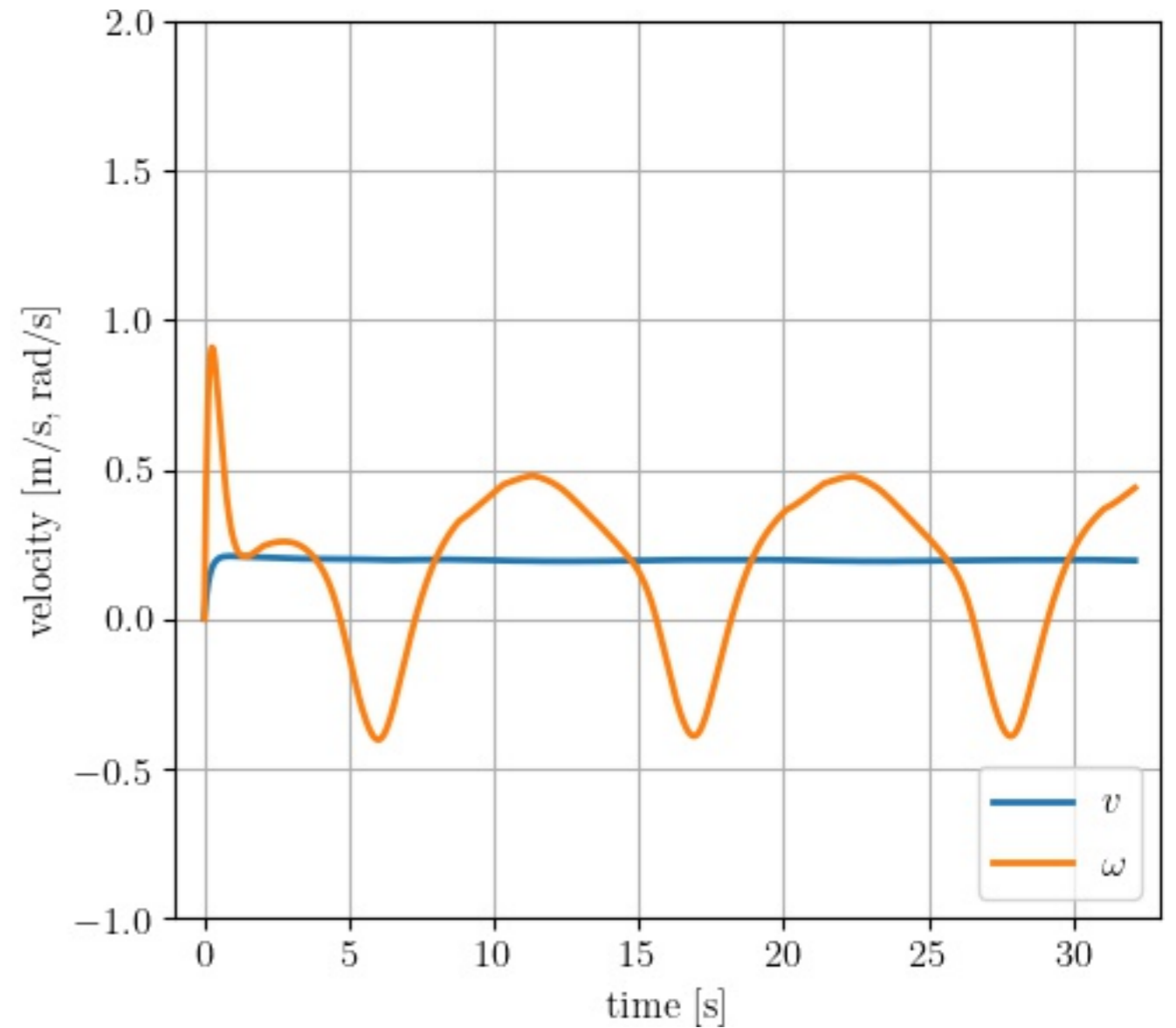
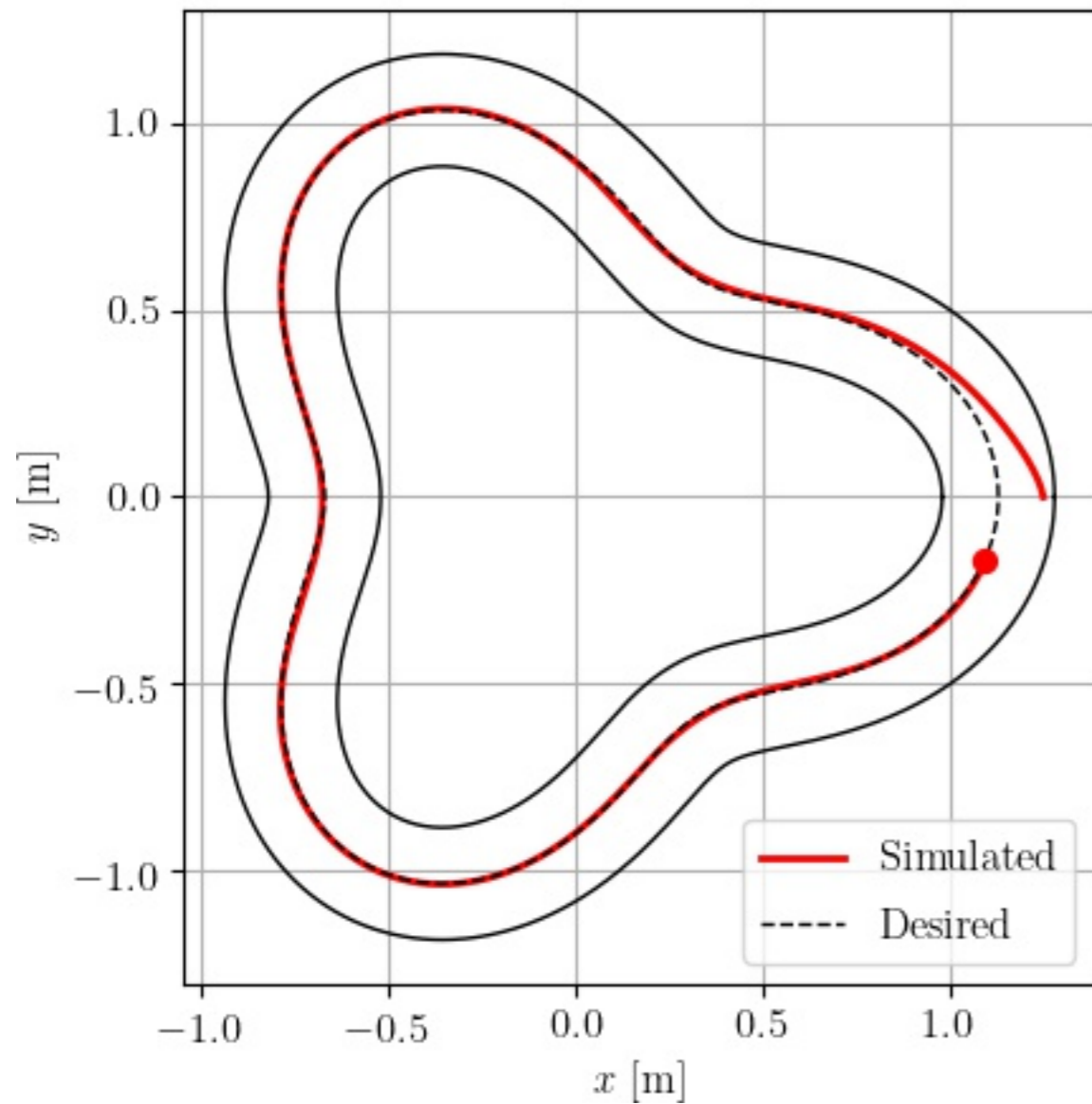
$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{i=0}^{N-1} (q_i^T \mathbf{W} q_i + u_i^T \mathbf{R} u_i) + q_N^T \mathbf{W} q_N,$$

$$q_i = \begin{pmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ v - v_d \\ \omega \end{pmatrix} \quad u_i = \begin{pmatrix} u_l \\ u_a \end{pmatrix}$$

	$N = 30$	$N = 1$
$\mathbf{W}$	diag( $10^2, 10^2, 50, 0.1$ )	diag( $10^4, 10^4, 50, 0.1$ )
$\mathbf{R}$	diag(1, 10)	diag(1, 10)

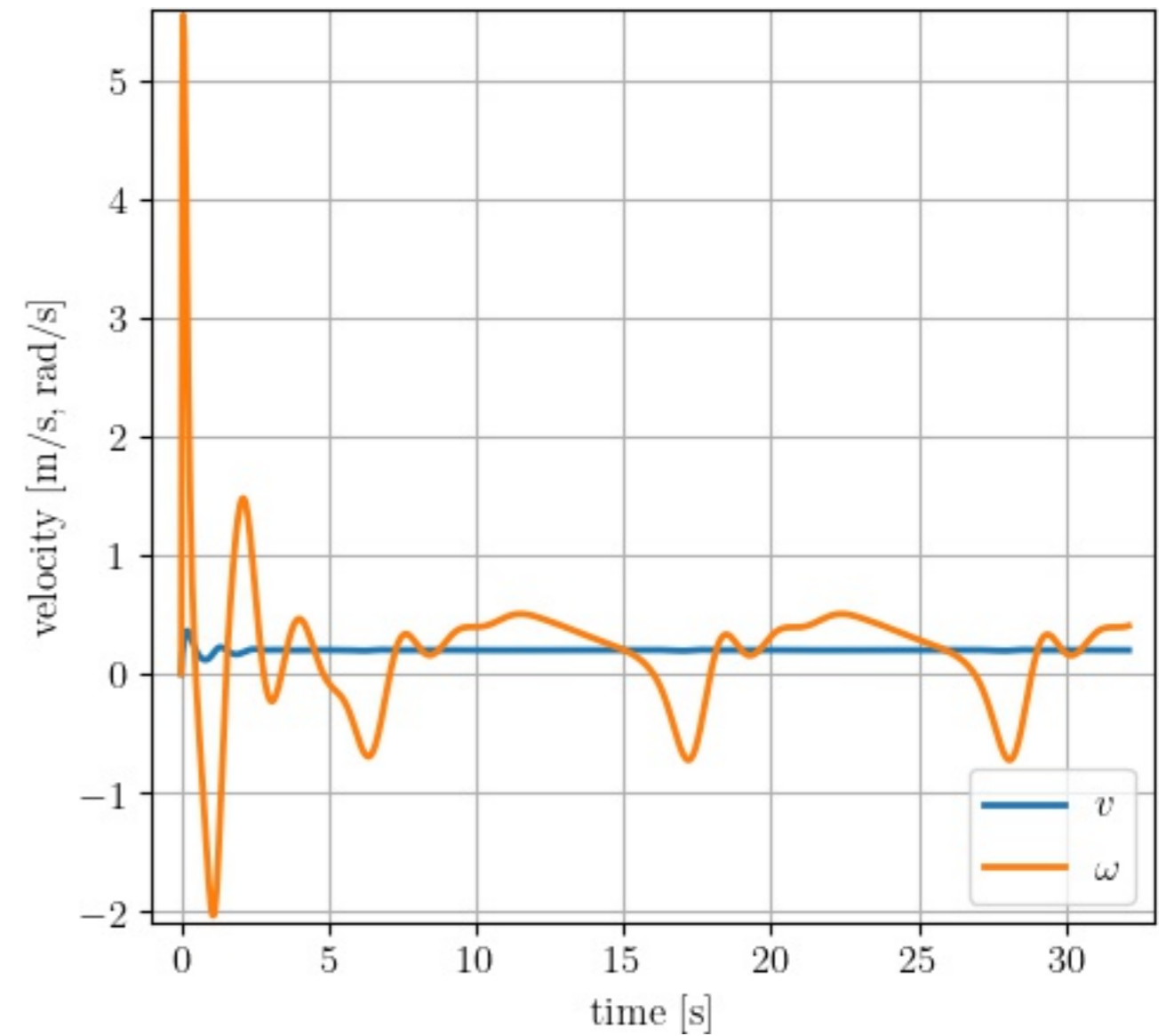
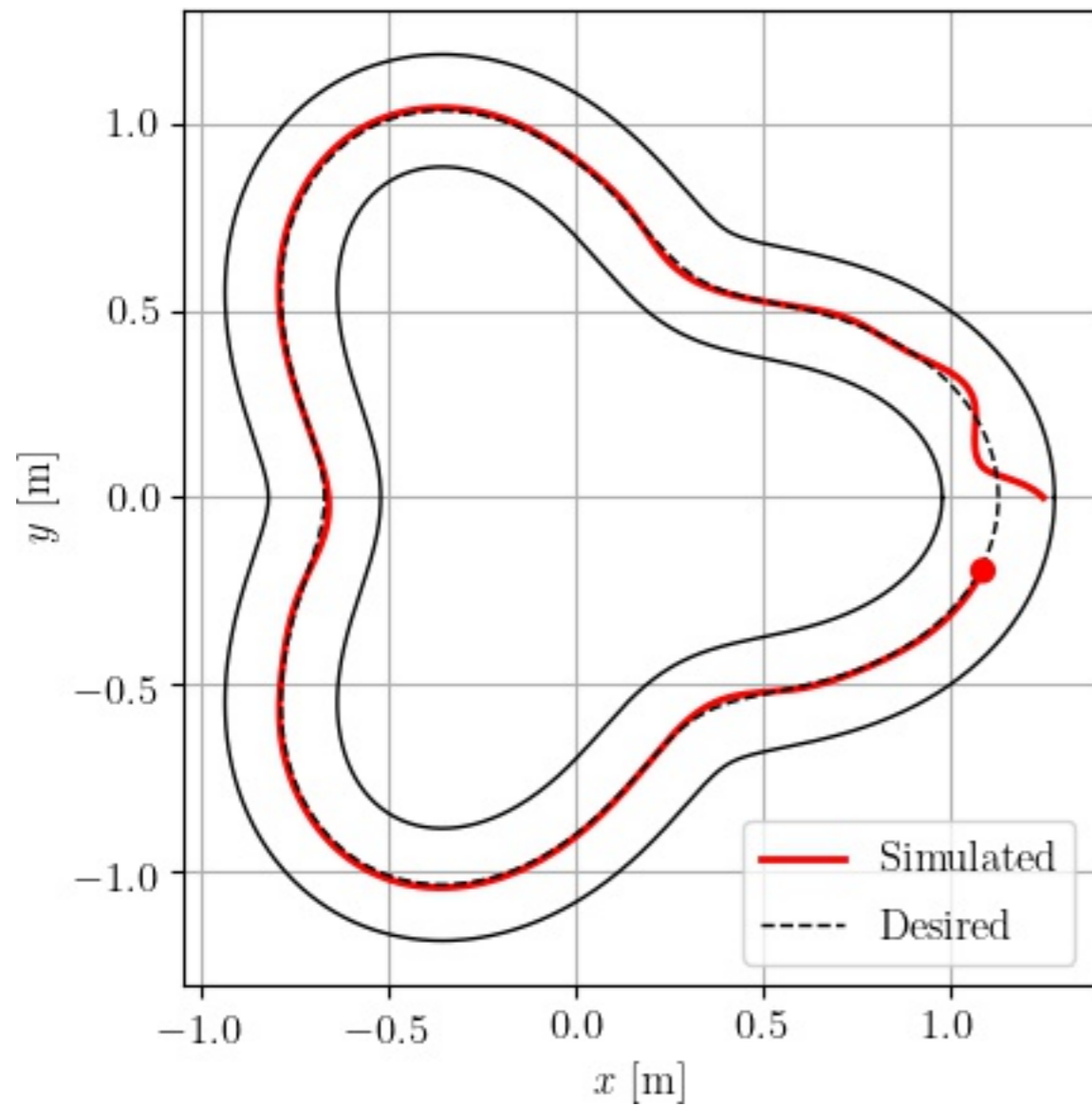


# Tracking (MPC)



	$N = 30$	$N = 1$
<b>W</b>	$\text{diag}(10^2, 10^2, 50, 0.1)$	$\text{diag}(10^4, 10^4, 50, 0.1)$
<b>R</b>	$\text{diag}(1, 10)$	$\text{diag}(1, 10)$

# Tracking (1-step)



	$N = 30$	$N = 1$
<b>W</b>	$\text{diag}(10^2, 10^2, 50, 0.1)$	$\text{diag}(10^4, 10^4, 50, 0.1)$
<b>R</b>	$\text{diag}(1, 10)$	$\text{diag}(1, 10)$

# Adaptive speed regulation

- **obiettivo:** rallentare il veicolo qualora si trovasse troppo vicino ad un veicolo che lo precede
- control barrier function

$$h_{\text{asr}} = \cos \theta_l(x_l - x) + \sin \theta_l(y_l - y) - \tau v$$

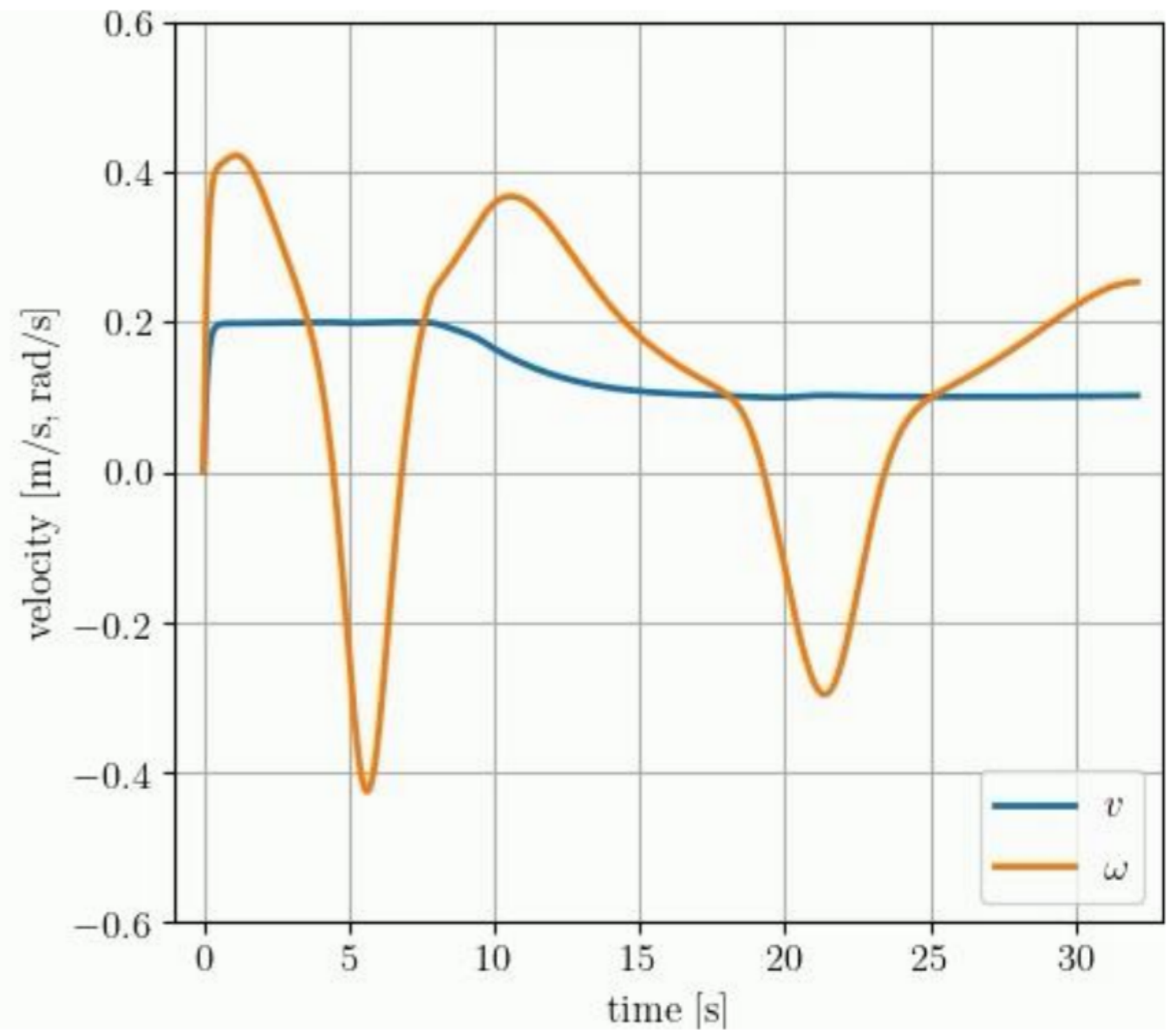
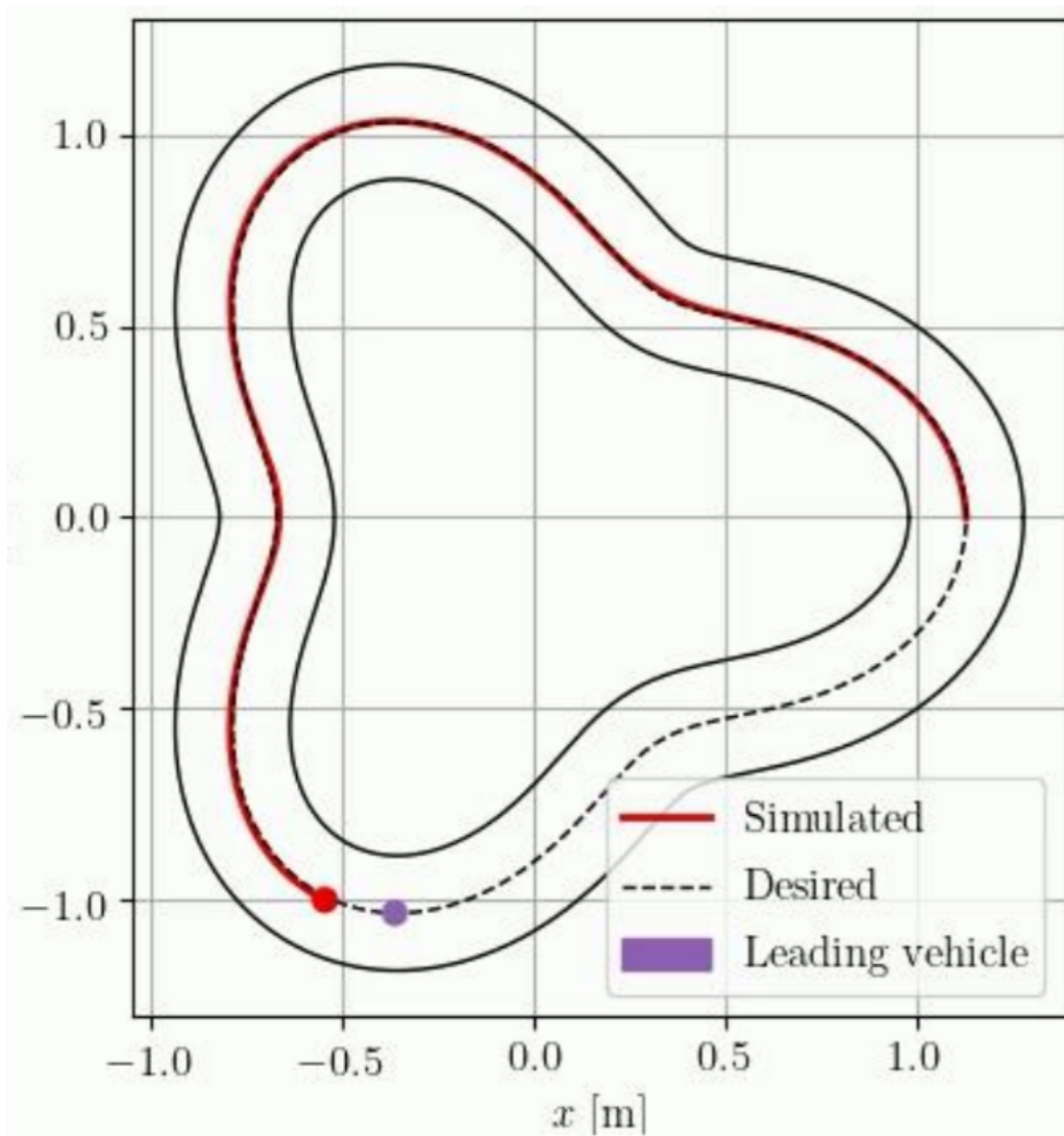
“half the  
speedometer rule”  
 $\tau = 1.8$

$$\begin{aligned} \dot{h}_{\text{asr}} &= v_l - (\dot{x} \cos \theta_l + \dot{y} \sin \theta_l) - \tau \dot{v} + \dot{\theta}_l(-\sin \theta_l(x_l - x) + \cos \theta_l(y_l - y)) \\ &= v_l - (v \cos \theta - a\omega \sin \theta) \cos \theta_l - (v \sin \theta + a\omega \cos \theta) \sin \theta_l \\ &\quad - \tau \frac{u_l}{m} + \omega_l(-\sin \theta_l(x_l - x) + \cos \theta_l(y_l - y)) \end{aligned}$$

- è necessario conoscere (nella realtà stimare) lo stato del leading vehicle  $(x_l, y_l, \theta_l, v_l, \omega_l)$

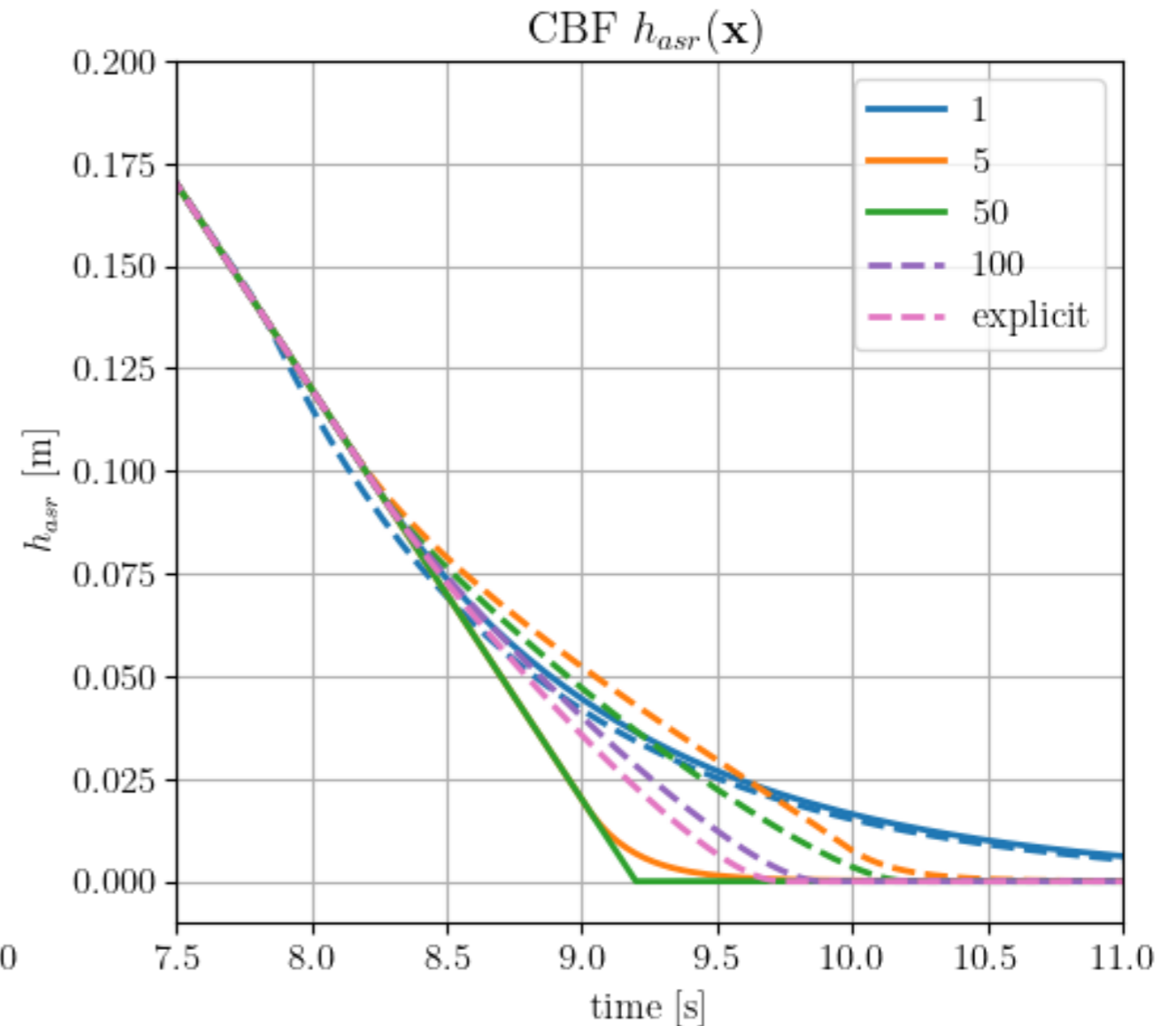
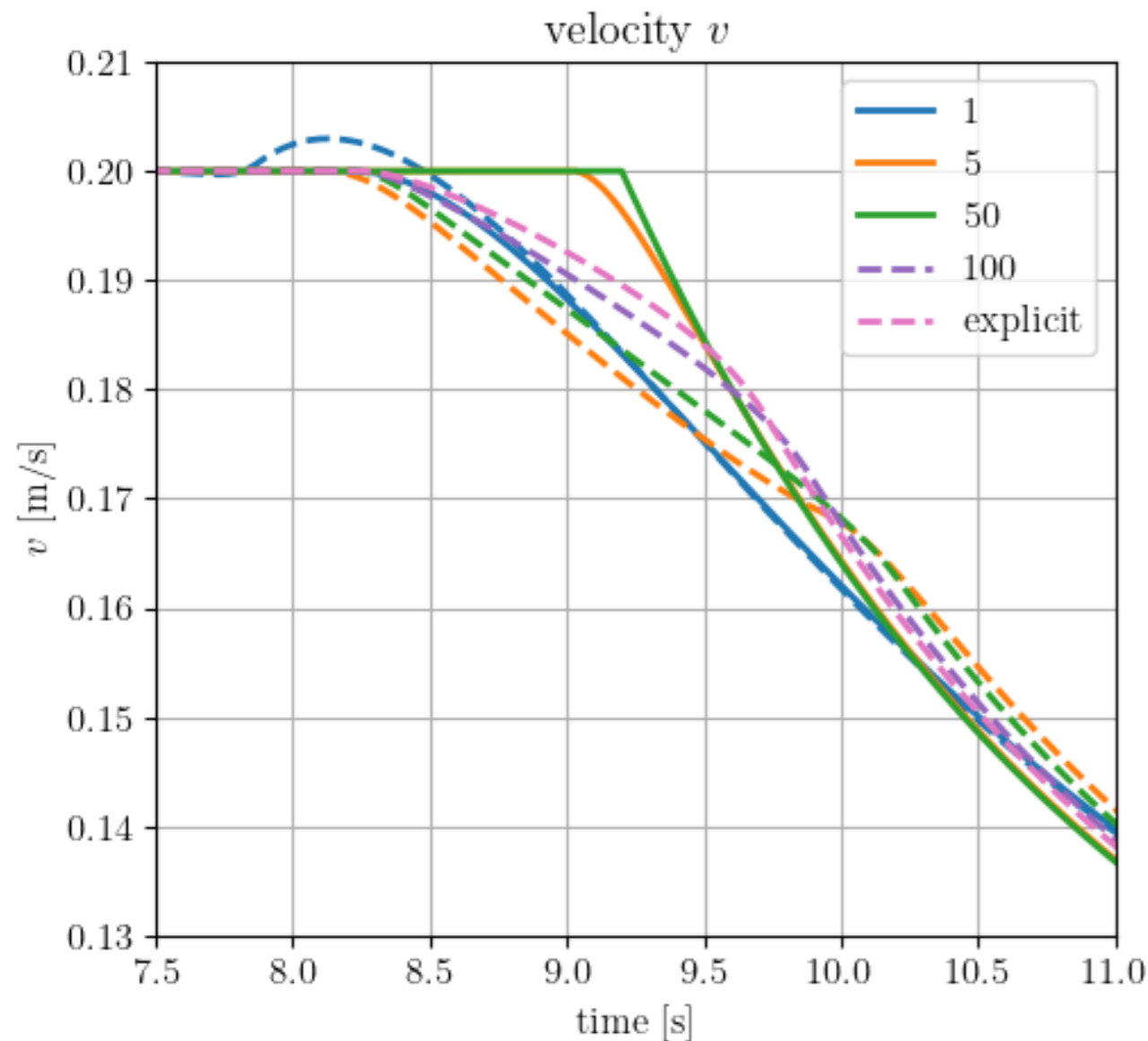
# Adaptive speed regulation

- il leading vehicle si muove ad una velocità di 0.1 m/s



# Adaptive speed regulation

- per  $\alpha \gg 1$  l-step reagisce quando si raggiunge il bordo del safe set
- per  $\alpha = 1$  sostanzialmente la stessa risposta
- per  $\alpha \rightarrow \infty$  la CBF tende al vincolo “esplicito”  $h(x) \geq 0$





# Lane keeping

- **obiettivo:** mantenere il veicolo ad una distanza laterale minore di un limite fissato
- due lati  $\rightarrow$  due CBF (ma è possibile anche con una)

- proviamo con

$$\hat{h}_{\mathbb{K}}^L = d_L - y_{\text{lat}} = d_L + \sin \theta_d (x - x_d) - \cos \theta_d (y - y_d)$$

$$\begin{aligned}\dot{\hat{h}}_{\mathbb{K}}^L &= -\dot{y}_{\text{lat}} = -\dot{x} \sin \theta_d + \dot{y} \cos \theta_d \\ &= -\sin \theta_d (v \cos \theta - a\omega \sin \theta) + \cos \theta_d (v \sin \theta + a\omega \cos \theta)\end{aligned}$$

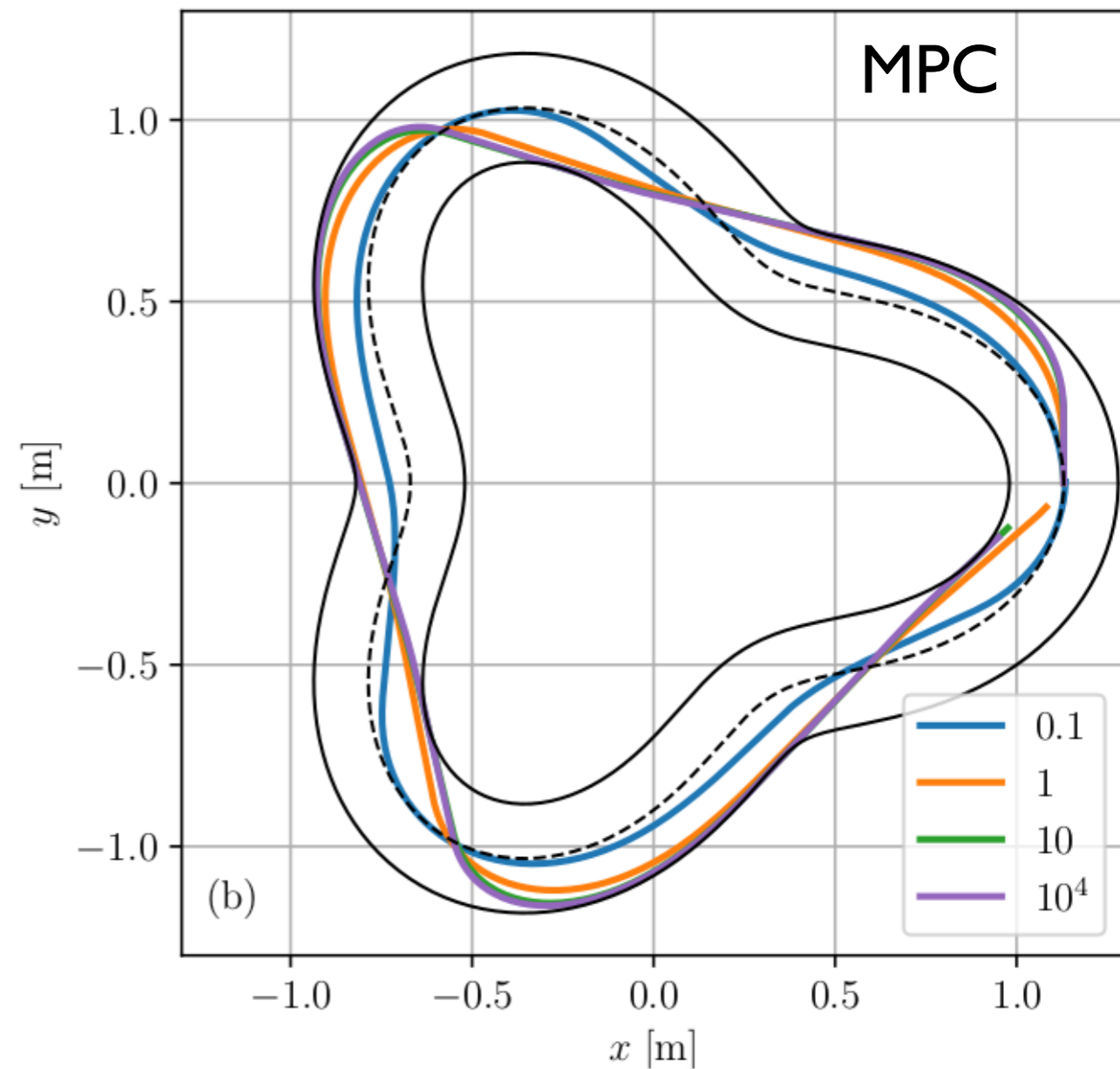
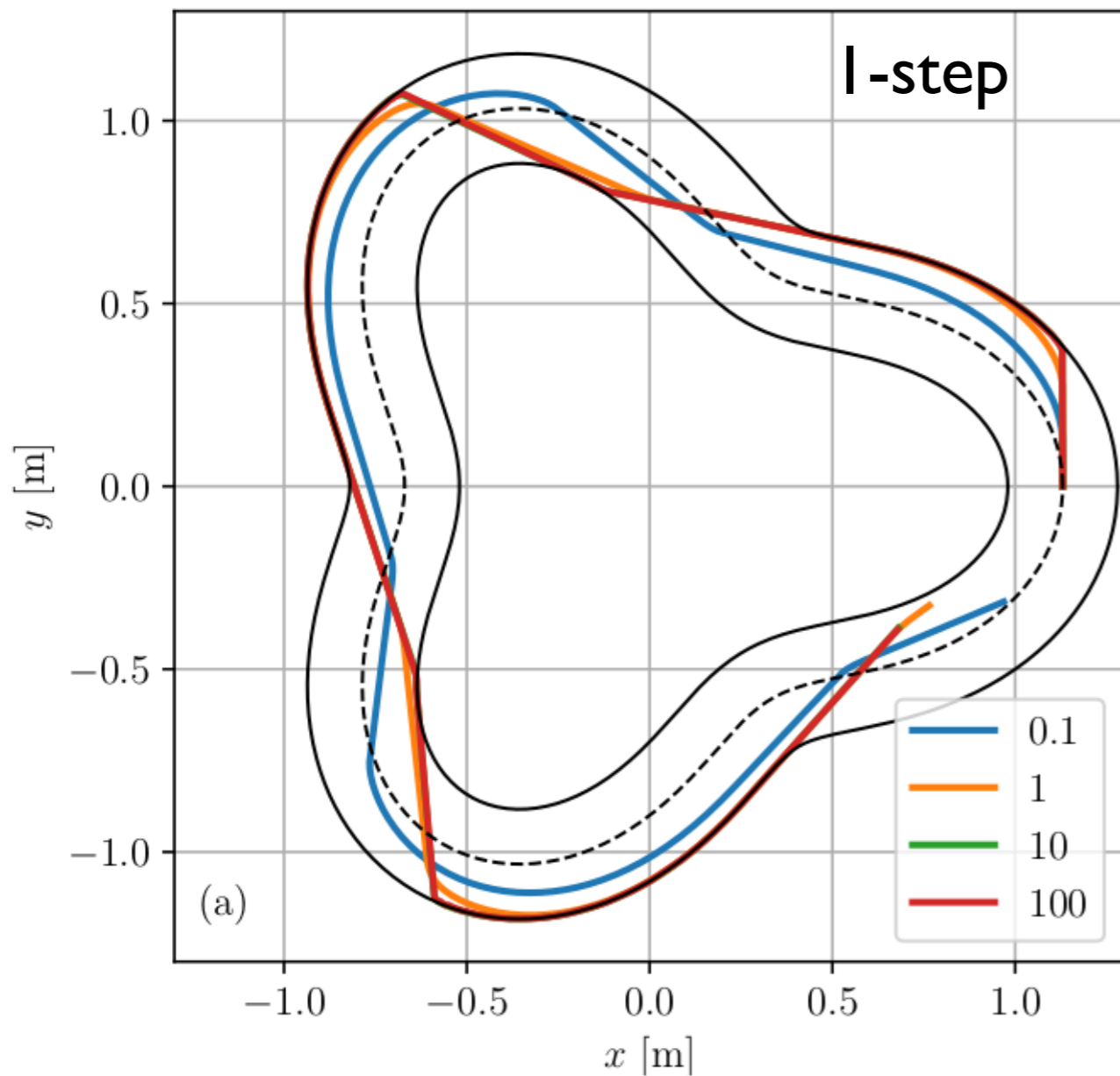
- qualche problema in questo?

nessun input appare in  $\dot{\hat{h}}_{\mathbb{K}}^L \Rightarrow \hat{h}_{\mathbb{K}}^L$  non ha grado relativo 1!

# Lane keeping

- bisogna trovare una funzione che abbia grado relativo 1 e che comunque implichi l'obiettivo desiderato
- prendiamo  $h_{\|k}^L = \dot{\hat{h}}_{\|k}^L + \gamma \hat{h}_{\|k}^L$
- **motivazione**  $h_{\|k}^L \geq 0 \implies \dot{\hat{h}}_{\|k}^L \geq -\gamma \hat{h}_{\|k}^L \implies \hat{h}_{\|k}^L \geq 0$
- $h_{\|k}^L = \gamma(d_L - y_{\text{lat}}) - \dot{y}_{\text{lat}}$  ha grado relativo 1, quindi è una CBF valida

# Lane keeping



- diminuendo (artificialmente) i pesi del tracking di  $(x,y)$  lasciamo che il veicolo si muova verso il bordo della lane
- nel caso l-step sono necessari valori minori di  $\alpha$  per curvare prima di raggiungere il limite



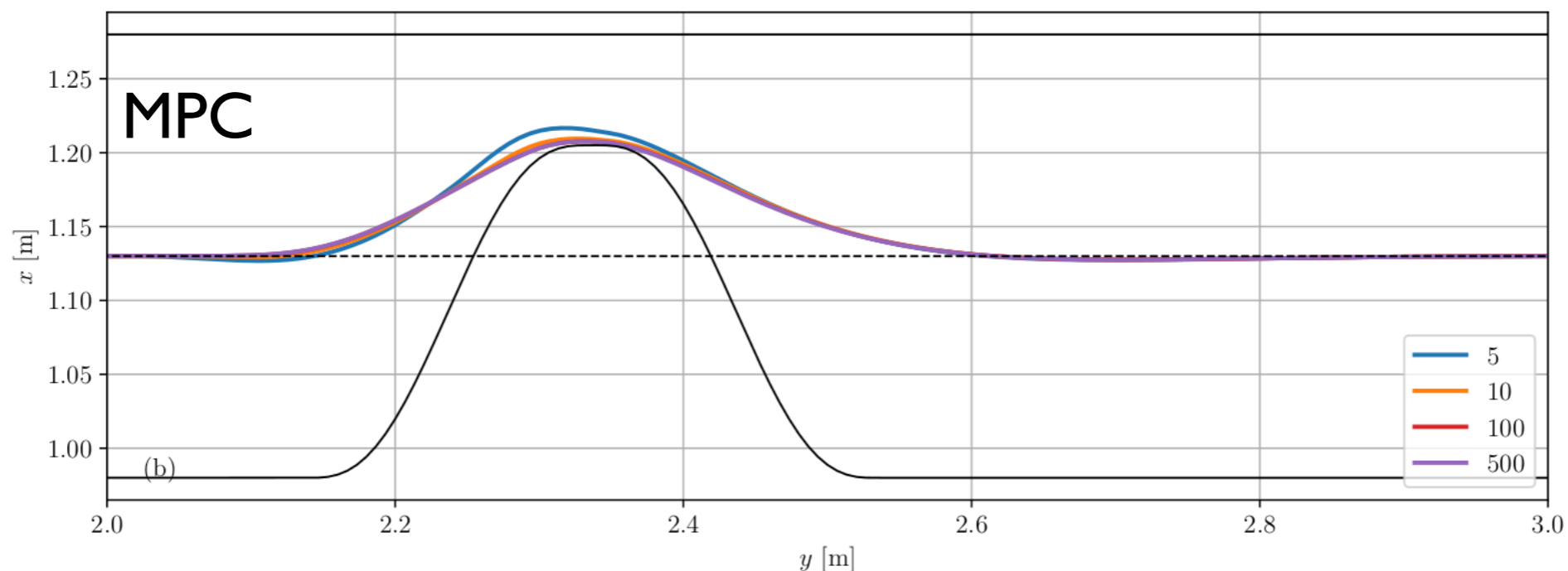
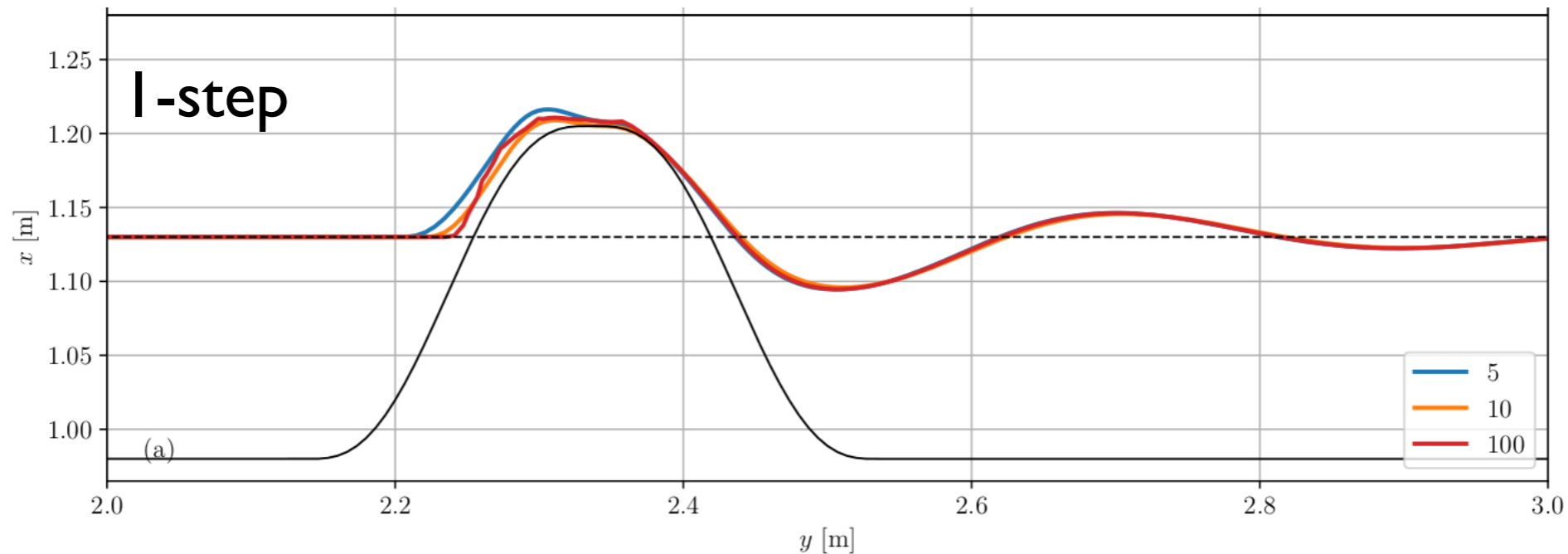
# Obstacle avoidance

- possiamo sfruttare la stessa CBF del lane keeping tenendo conto del fatto che i limiti laterali non sono più fissi
- $\hat{h}_{oa}^L = d_L - y_{lat}$
- $h_{oa}^L = \dot{\hat{h}}_{oa}^L + \gamma \hat{h}_{oa}^L = \gamma(d_L - y_{lat}) + (\dot{d}_L - \dot{y}_{lat})$
- questa CBF induce il sistema a seguire il profilo di velocità del bordo
  - se  $y_{lat} = d_L$ ,  $h_{oa} \geq 0 \implies \dot{y}_{lat} \leq \dot{d}_L$
  - ma per la natura delle CBF l'effetto si può vedere anche quando non ci troviamo sul bordo

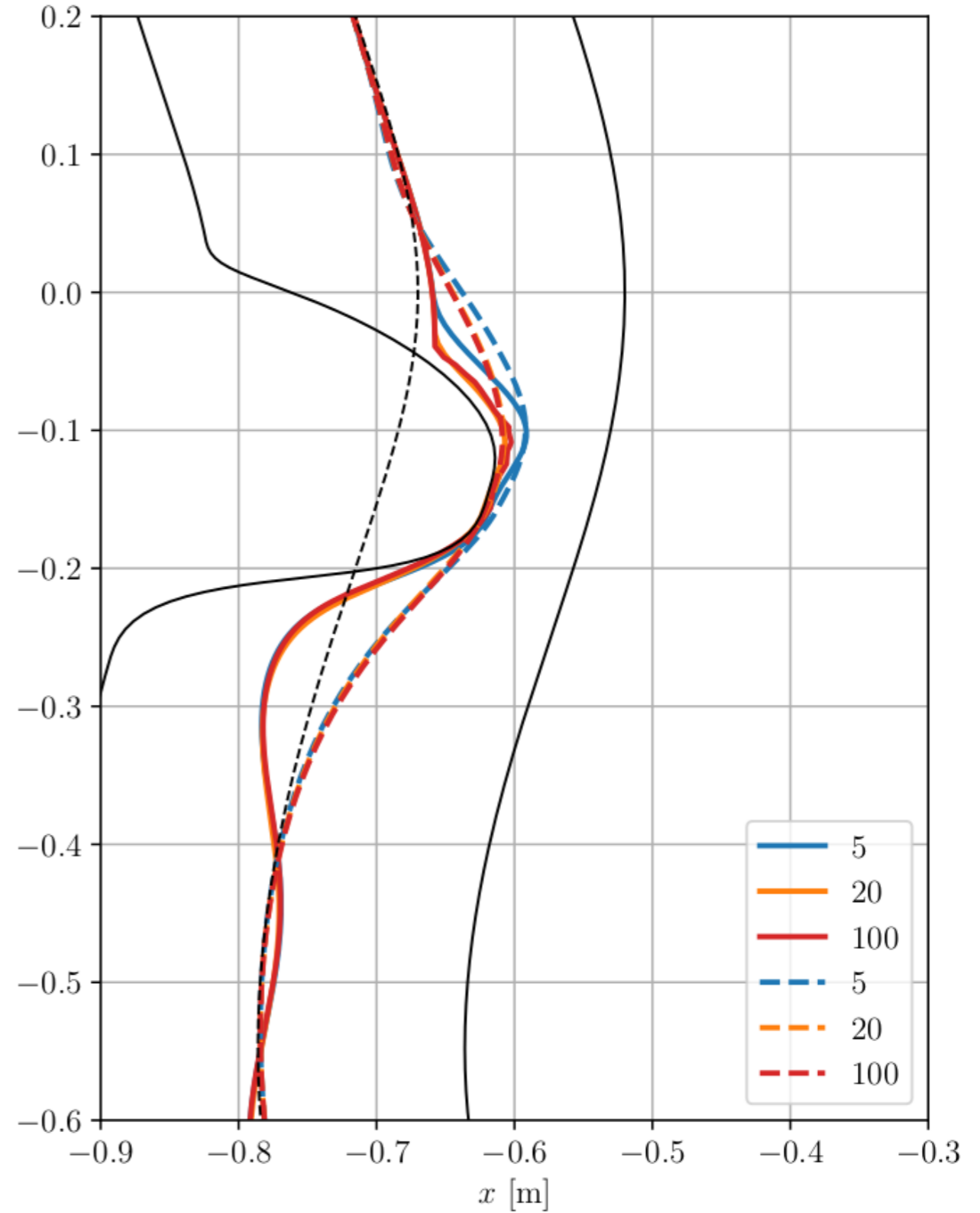
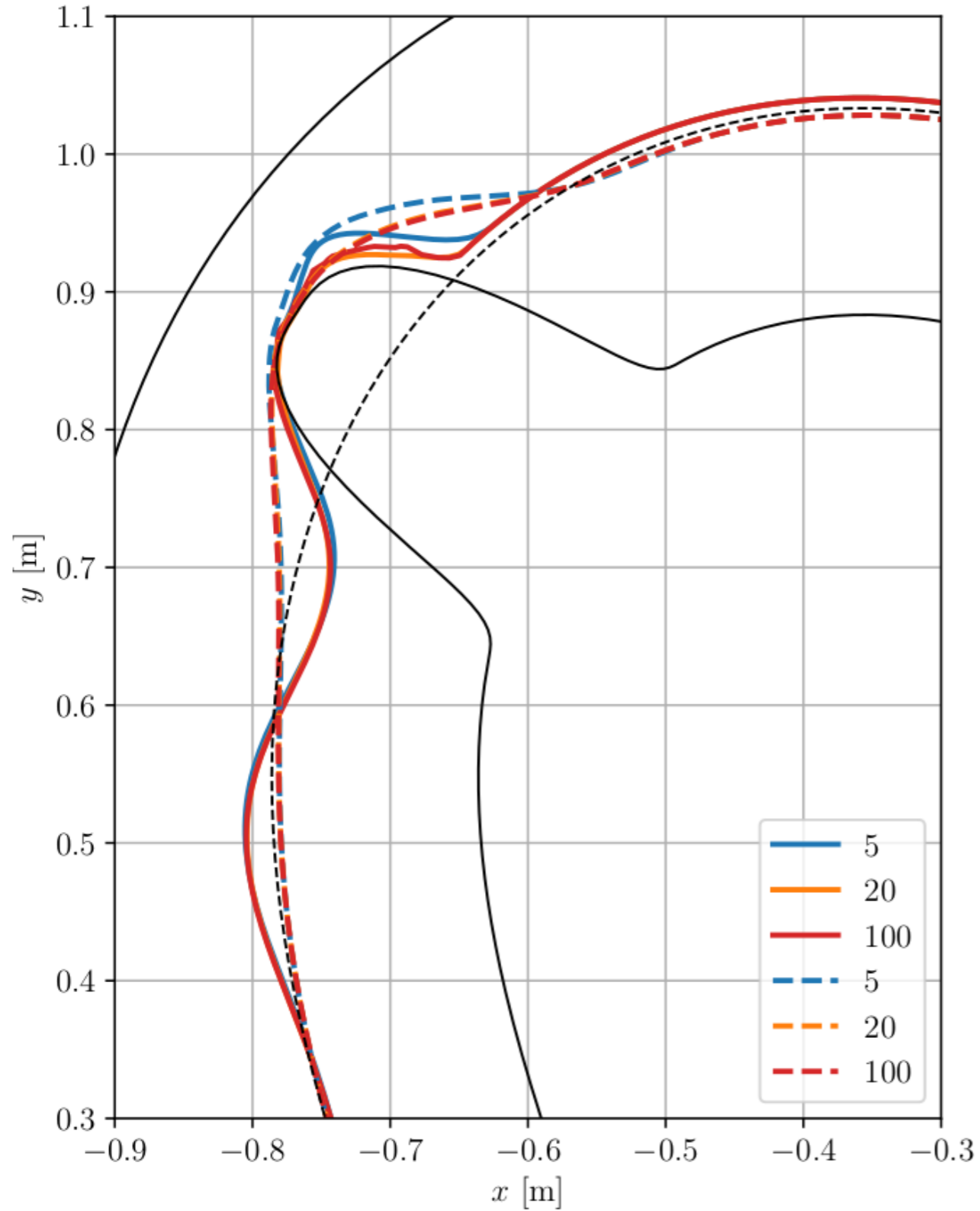


# Obstacle avoidance

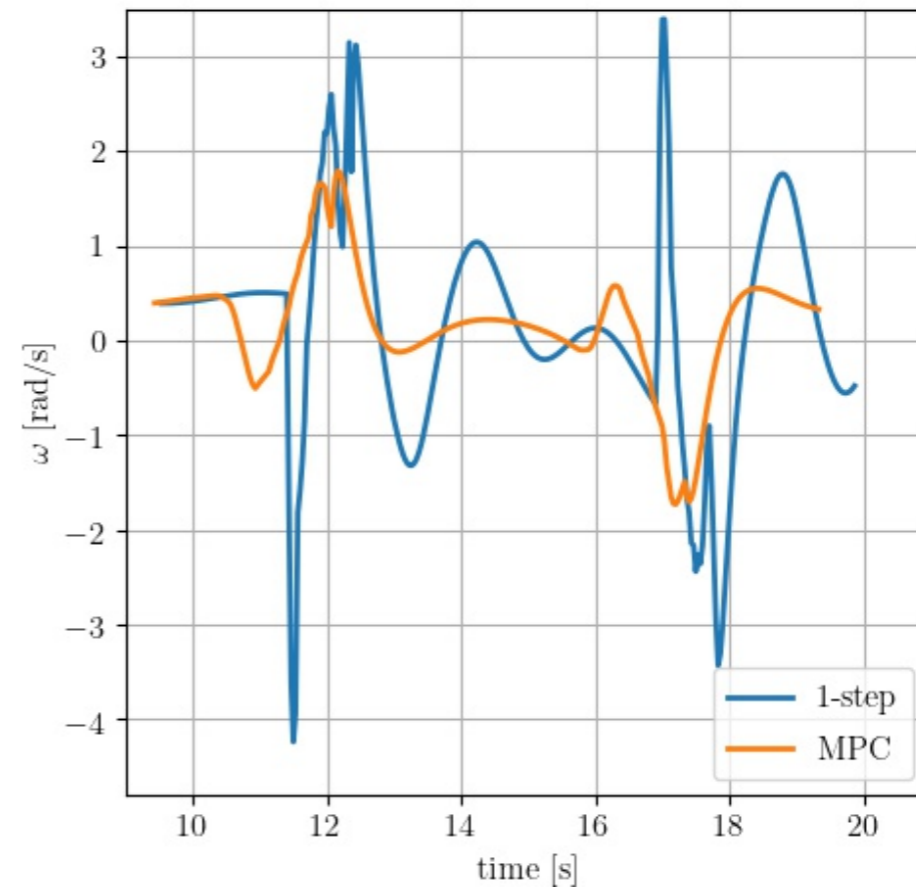
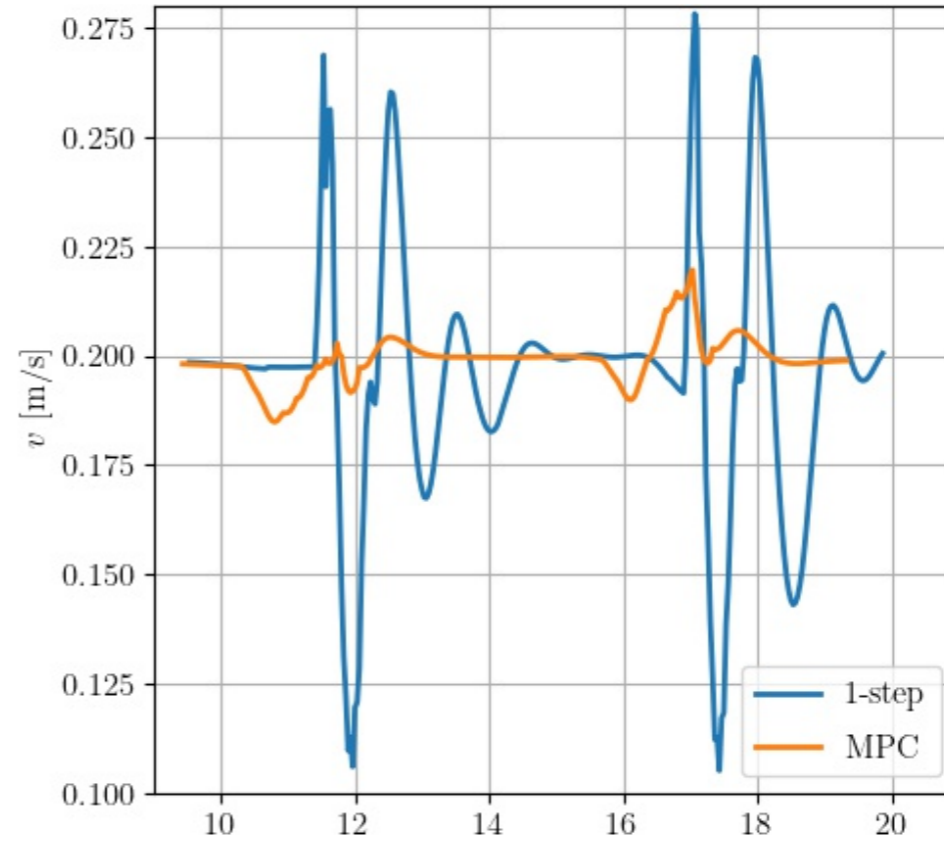
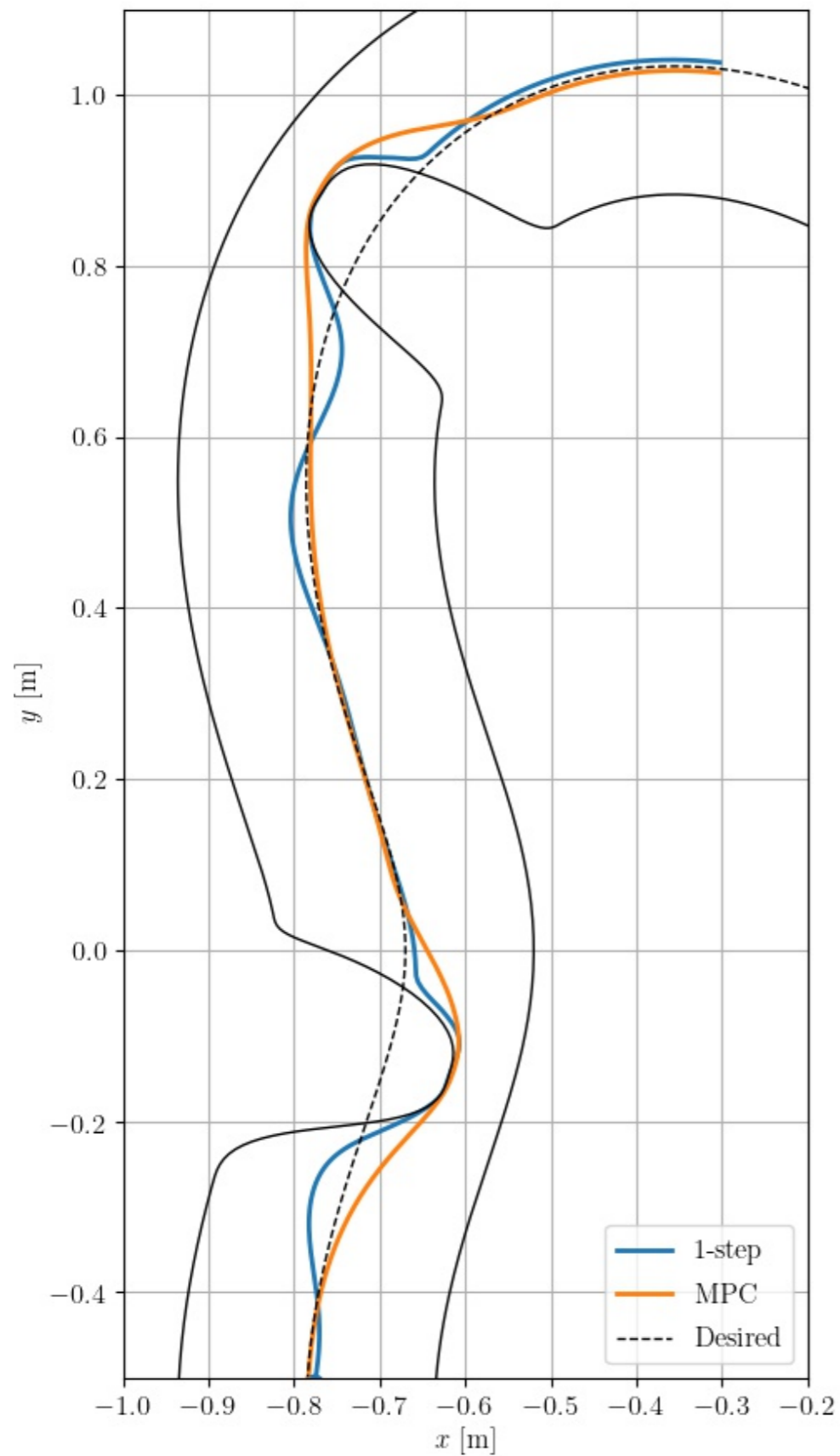
- il controllore I-step non ha modo di predire l'azione
  - per valori di  $\alpha$  elevati la qualità della traiettoria ne risente (effetto della discretizzazione)



# Obstacle avoidance



# Obstacle avoidance (MPC vs 1-step)



# Conclusione

- il Model Predictive Control può ottenere prestazioni migliori tramite la predizione
- le Control Barrier Function permettono di definire vincoli di sicurezza che si attivano prima di raggiungere il bordo dell'insieme sicuro
- è possibile modificare la conservatività del vincolo tramite  $\alpha$
- il grado relativo fa sì che l'input appaia nel vincolo, garantendo la feasibility del problema (quando non ci sono vincoli sugli input...)