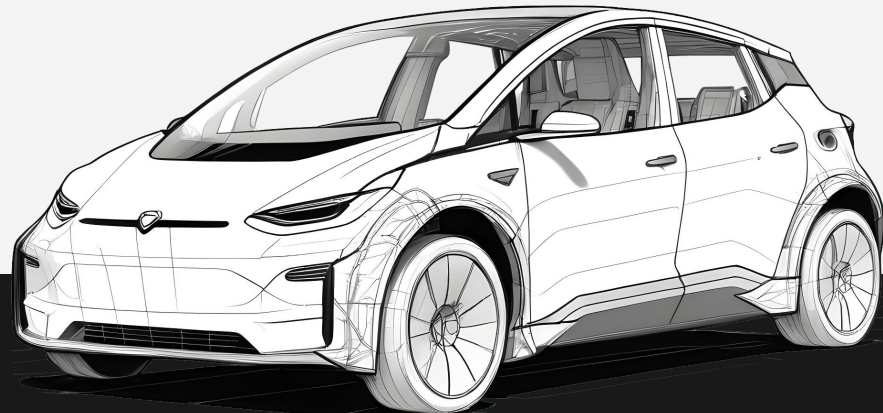


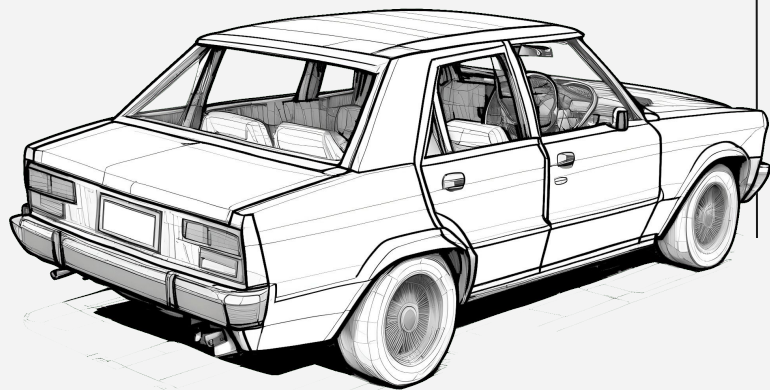
Progettazione e implementazione di un Sistema di Adaptive Cruise Control basato su Logica Fuzzy

Progetto Sistemi Complessi e Incerti

Simone Lesinigo ([GitHub](#))



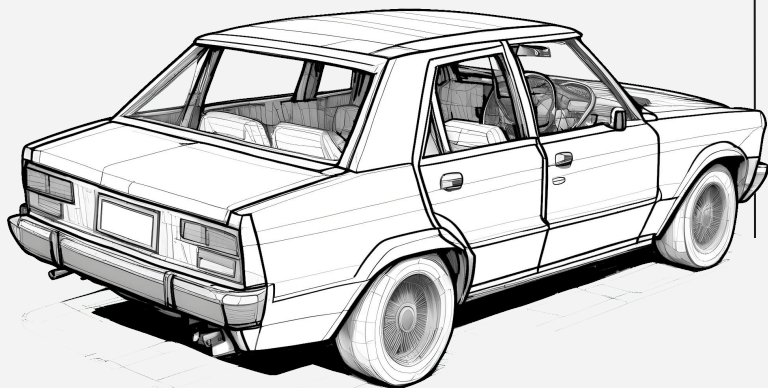
01 Introduzione



Introduzione

- Crescente diffusione dei sistemi ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) nei veicoli moderni per sicurezza e comfort.
- L'Adaptive Cruise Control (ACC) regola automaticamente velocità e distanza di sicurezza dal veicolo che precede.
- Particolare efficacia in contesto autostradale, con velocità e distanze variabili.
- Basato su Logica Fuzzy, per una gestione graduale e naturale di accelerazioni e decelerazioni.

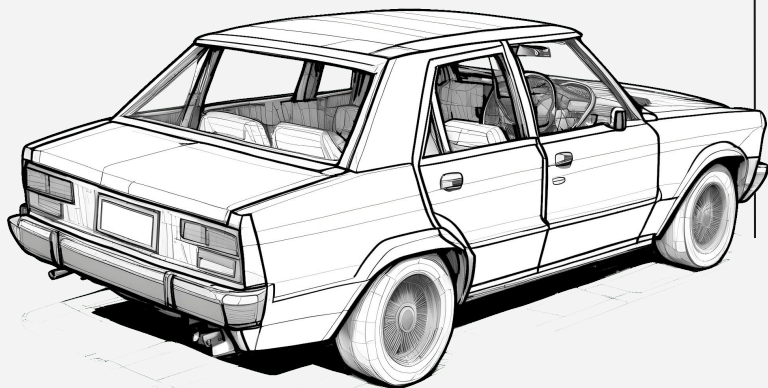
02 Stato dell'Arte



Stato dell'Arte

- **Controller PID:** ampiamente utilizzati, ma richiedono taratura complessa e offrono prestazioni limitate. [1]
- **Logica fuzzy:** consente un controllo più flessibile e graduale, adatto a situazioni variabili. [2]
- Architetture fuzzy **gerarchiche/cascata:** riducono il numero di regole e migliorano l'efficienza in tempo reale. [2]
- **Confronto fuzzy vs PID tradizionale:** maggiore fluidità e minore errore di distanza [3]
- **Approcci ibridi** (fuzzy + MPC + machine learning): combinano vantaggi complementari, aumentando comfort, precisione e robustezza. [4]

03 Modello Proposto



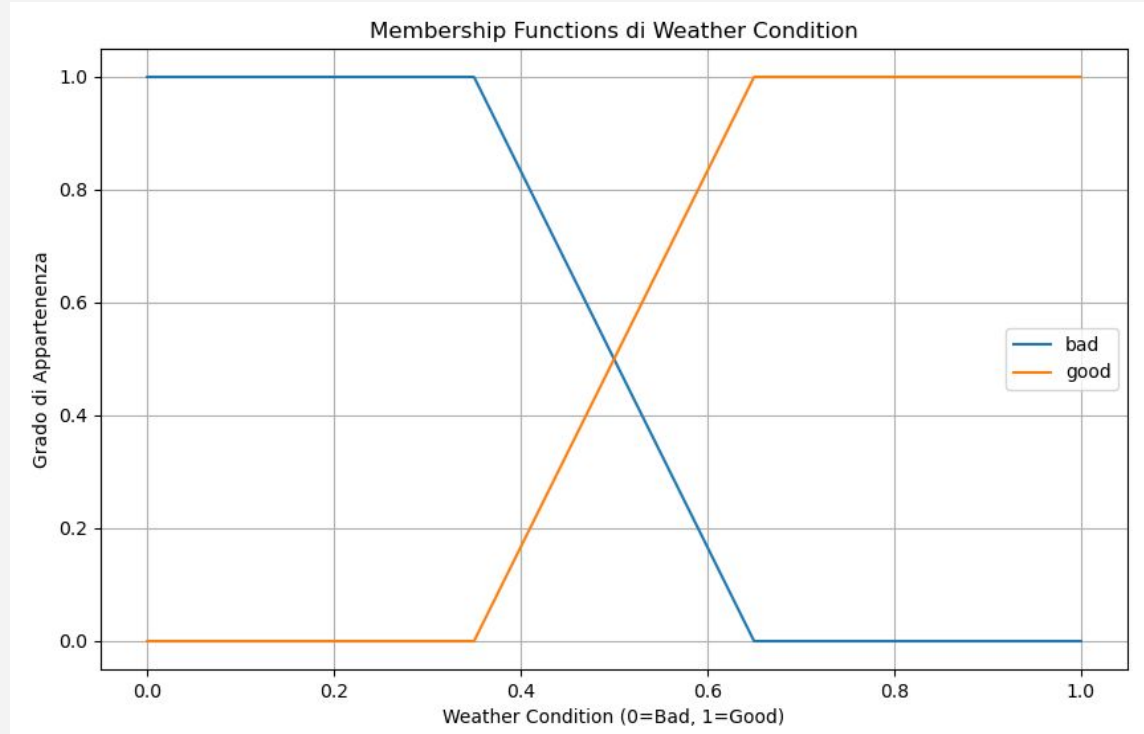
Modello Proposto

- Veicolo di riferimento:
 - categoria M1 (auto per trasporto persone, max 8 posti + conducente).
 - Prestazioni medie in accelerazione e decelerazione
- Scenario di applicazione: ambiente autostradale con traiettorie rettilinee.
- Terminologia:
 - **Ego** = veicolo dell'utilizzatore del sistema ACC.
 - **Leader** = veicolo che precede.
- Intervallo di velocità considerato: 70–150 km/h [5]
- Input:
 - Weather Condition
 - Time Headway
 - Relative Velocity
- Output:
 - Acceleration

Membership Functions - Weather Condition

- Termini Linguistici:
 - **bad**: trapezoidale definita dai punti $[0.0, 0.0, 0.35, 0.65]$.
 - **good**: trapezoidale definita dai punti $[0.35, 0.65, 1.0, 1.0]$.
- Universo: $[0, 1]$

Membership Functions - Weather Condition



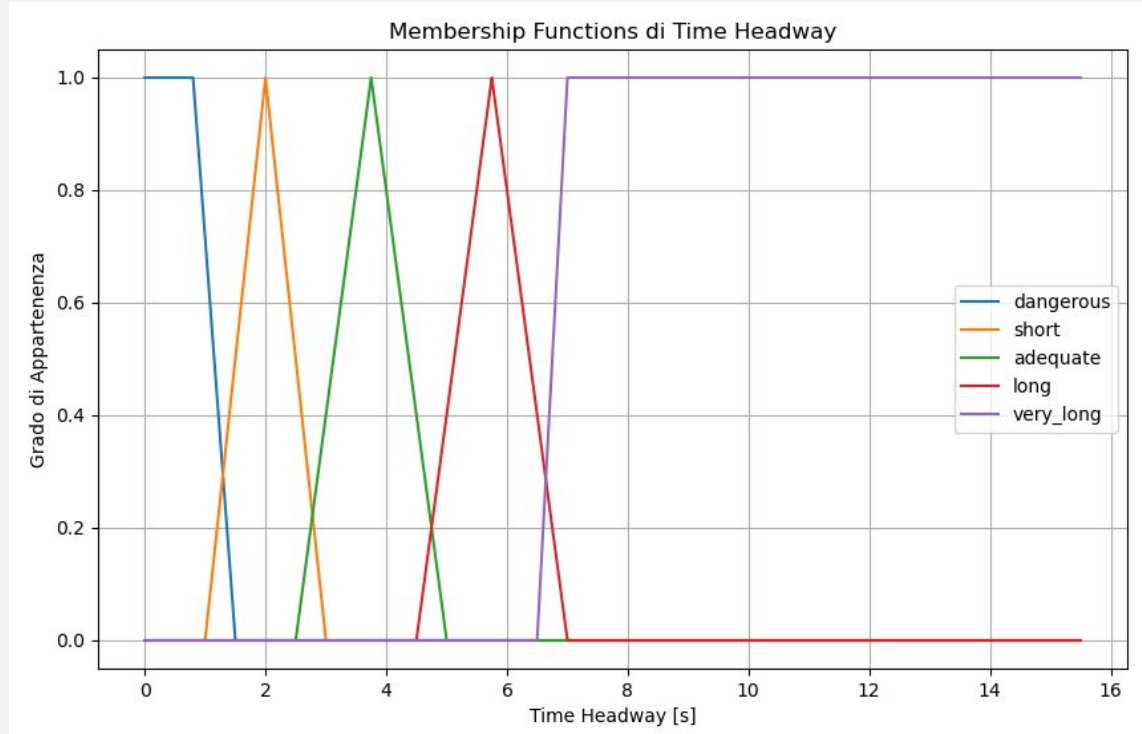
Membership Functions - Time Headway

$$time\ headway\ [s] = \frac{space\ gap\ [m]}{ego\ velocity\ [m/s]} \quad [6]$$

- Termini Linguistici:
 - **dangerous**: trapezoidale definita dai punti [0.0, 0.0, 0.8, 1.5].
 - **short**: triangolare definita dai punti [1.0, 2.0, 3.0].
 - **adequate**: triangolare definita dai punti [2.5, 3.75, 5.0].
 - **long**: triangolare definita dai punti [4.5, 5.75, 7.0].
 - **very_long**: trapezoidale definita dai punti [6.5, 7.0, 15.5, 15.5].
- Universo: [0, 15.5] s

$$max(time\ headway)\ [s] = \frac{300\ [m]}{\frac{70\ [km/h]}{3.6}} = \frac{300\ [m]}{19.4\ [m/s]} \approx 15.4\ [s] \quad [7]$$

Membership Functions - Time Headway



Time Headway - Motivazioni

$$d_{sicurezza} [m] = d_{reazione} [m] + d_{frenata} [m] = v \cdot t + \frac{v^2}{2 \cdot a \cdot \mu} \quad [8]$$

Ipotizzando $a = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ e $\mu = 0.8$ e che i due veicoli siano separati da 20m:

$$d_{sicurezza} \approx 12.75 \text{ [m]} \quad \text{alla velocità di 30 km/h}$$

$$d_{sicurezza} \approx 119.1 \text{ [m]} \quad \text{alla velocità di 130 km/h}$$

Time Headway - Scelta degli Intervalli

Velocità [km/h]	Time Headway [s]	Distanza da mantenere [m]	Distanza mantenuta [m]	Differenza %
70	0.5	62.977	33.810	-46.313
	1.0		43.533	-30.875
	2.0		62.977	0.000
	3.0		82.421	+30.875
	4.0		101.866	+61.751
	7.0		160.199	+154.377
	10.0		218.533	+247.004
	15.0		315.755	+401.381
110	0.5	120.594	74.761	-38.006
	1.0		90.038	-25.338
	2.0		120.594	0.000
	3.0		151.149	+25.338
	4.0		181.705	+50.675
	7.0		273.372	+126.688
	10.0		365.038	+202.700
	15.0		517.816	+329.388
150	0.5	193.942	131.442	-32.226
	1.0		152.275	-21.484
	2.0		193.942	0.000
	3.0		235.609	+21.484
	4.0		277.275	+42.968
	7.0		402.275	+107.421
	10.0		527.275	+171.873
	15.0		735.609	+279.293

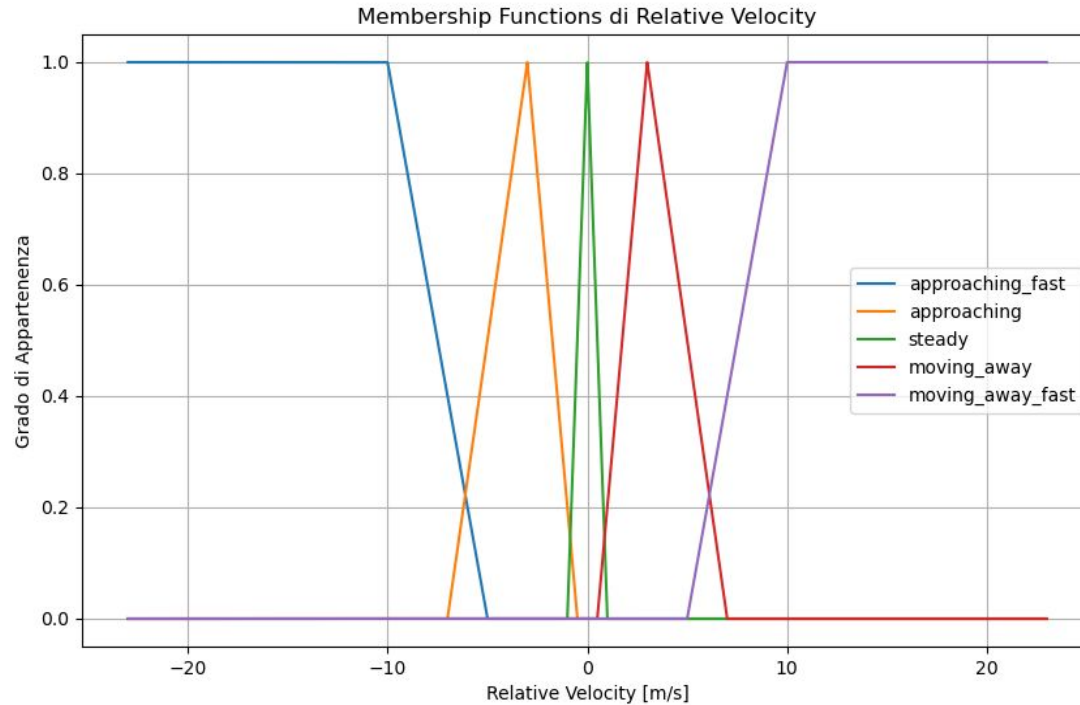
Membership Functions - Relative Velocity

$$\text{relative velocity} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \text{leader velocity} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] - \text{ego velocity} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

- Termini Linguistici:
 - **approaching_fast**: trapezoidale definita dai punti [-23.0, -23.0, -10.0, -5.0].
 - **approaching**: triangolare definita dai punti [-7.0, -3.0, -0.5].
 - **steady**: triangolare definita dai punti [-1.0, 0.0, 1.0].
 - **moving_away**: triangolare definita dai punti [0.5, 3.0, 7.0].
 - **moving_away_fast**: trapezoidale definita dai punti [5.0, 10.0, 23.0, 23.0].
- Universo: [-23.0, +23.0] m/s

$$\max(\text{relative velocity}) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{150 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] - 70 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{3.6} = 22.2 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Membership Functions - Relative Velocity

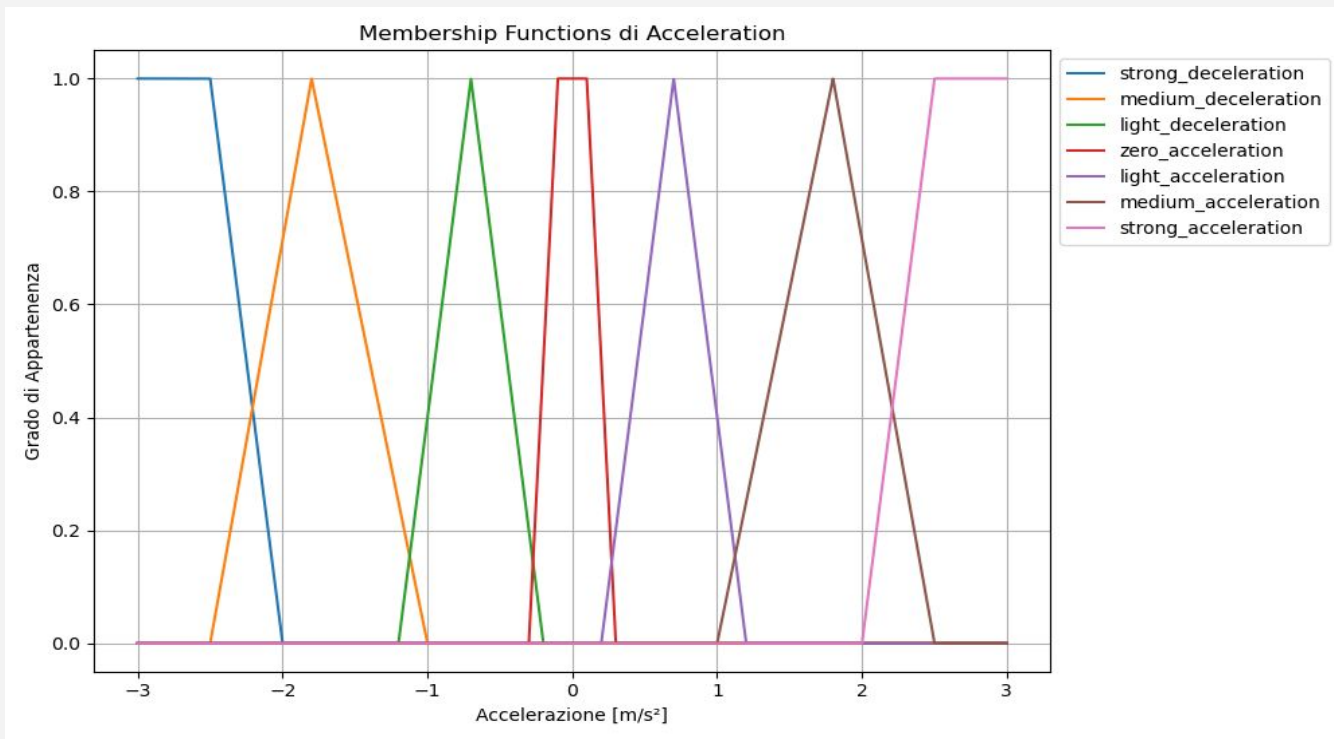


Membership Functions - Acceleration

- Termini Linguistici:
 - **strong_deceleration**: trapezoidale definita dai punti $[-3.0, -3.0, -2.5, -2.0]$.
 - **medium_deceleration**: triangolare definita dai punti $[-2.5, -1.8, -1.0]$.
 - **light_deceleration**: triangolare definita dai punti $[-1.2, -0.7, -0.2]$.
 - **zero_acceleration**: trapezoidale definita dai punti $[-0.3, -0.1, 0.1, 0.3]$.
 - **light_acceleration**: triangolare definita dai punti $[0.2, 0.7, 1.2]$.
 - **medium_acceleration**: triangolare definita dai punti $[1.0, 1.8, 2.5]$.
 - **strong_acceleration**: trapezoidale definita dai punti $[2.0, 2.5, 3.0, 3.0]$.
- Universo: $[-3.0, +3.0]$ m/s²

Accelerazioni più brusche (in modulo) sono considerate **non confortevoli** per il conducente e i passeggeri [10]

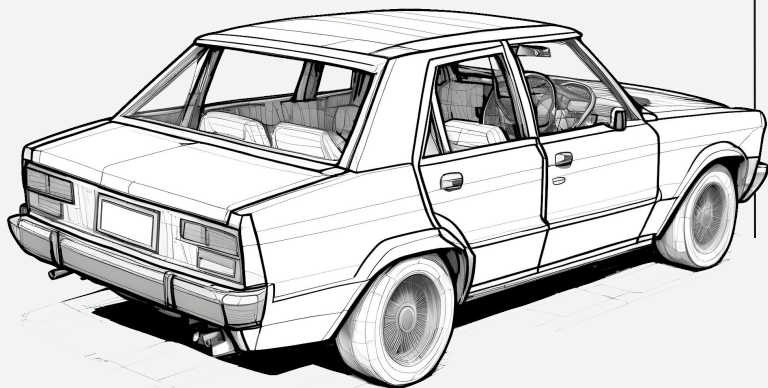
Membership Functions - Acceleration



Creazione delle Regole

- Definite tutte le combinazioni dei termini linguistici delle variabili in input
→ copertura completa degli scenari
- Numero totale di regole: $2 \times 5 \times 5 = 50$
- Scelta di una **singola base di regole** → sistema più semplice, senza approccio a cascata.
- Per ogni combinazione è stato assegnato il termine linguistico di output relativo all'accelerazione.
- In condizioni meteo avverse → regole con output più prudenti, a favore della sicurezza.
- È possibile consultare l'elenco delle regole in Appendice

04 Implementazione



Implementazione

- Implementato in Python con la libreria *scikit-fuzzy*
- Valori di input fuori intervallo → trasformati nel valore valido più vicino
- L'output non è stato usato direttamente, ma è stato applicato un filtro passa-basso con coefficiente di smoothing $\alpha = 0.1$ [11]

$$a_f(t) = \alpha \cdot a(t) + (1 - \alpha) \cdot a_f(t-1)$$

- Le accelerazioni filtrate con $|a| < 0.12 \left[\text{m/s}^2 \right]$ sono poste a zero per evitare micro-accelerazioni potenzialmente fastidiose

Dataset di Riferimento

- Dati raccolti nel 2019 da un veicolo dotato di ACC per un periodo di 15 minuti sulla Interstate 65 (autostrada americana) [\[12\]](#)
- Variabili:
 - **timestamps** [s]: istanti di campionamento (frequenza di 10 Hz)
 - **ego_velocity** [m/s]: velocità del veicolo ego
 - **leader_velocity** [m/s]: velocità del veicolo leader
 - **space_gap** [m]: distanza tra i veicoli
 - **ACC command acceleration** [m/s²]: accelerazione impartita dal sistema ACC per il veicolo ego
- Osservazioni:
 - **leader_velocity** compresa tra 25.667 e 34.799 m/s (92.401 – 125.276 km/h)
 - **space_gap** iniziale di 72.653 m

Dataset Simulazione

- Generato dalla simulazione del modello
- Condizioni iniziali poste uguali al Dataset di Riferimento
- Variabili:
 - **timestamps** [s]
 - **ego_acceleration** [m/s²]
 - **leader_acceleration** [m/s²]
 - **ego_velocity** [m/s]
 - **leader_velocity** [m/s]
 - **space_gap** [m]

Dataset Simulazione - Variabili

- **timestamps** [s]: 9000 passi con una frequenza di 10Hz (15 minuti)
- **ego_acceleration** [m/s²]: calcolata a ogni passo dal modello
- **leader_acceleration** [m/s²]: viene calcolata a partire dal dataset di riferimento

$$a_t(\text{leader}) = \frac{v_t(\text{leader}) - v_{t-1}(\text{leader})}{\Delta t}$$

- **ego_velocity** [m/s]: valore iniziale pari a 32.493 m/s, viene calcolata secondo la legge del moto uniformemente accelerato

$$v_t(\text{ego}) = v_{t-1}(\text{ego}) + a_t(\text{ego}) \cdot \Delta t$$

Dataset Simulazione - Variabili

- **leader_velocity** [m/s]: copiata dalla colonna corrispondente nel dataset di riferimento
- **space_gap** [m]: valore iniziale pari a 72.653m, viene aggiornato ad ogni passo come

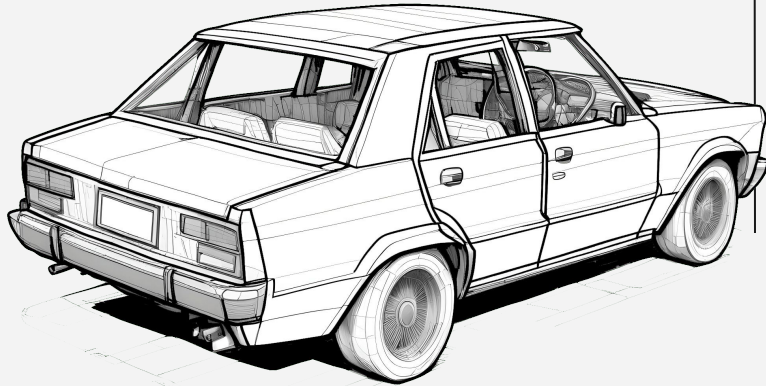
$$space\ gap_t = space\ gap_{t-1} + \left(leader\ travelled\ space_t - ego\ travelled\ space_t \right)$$

dove

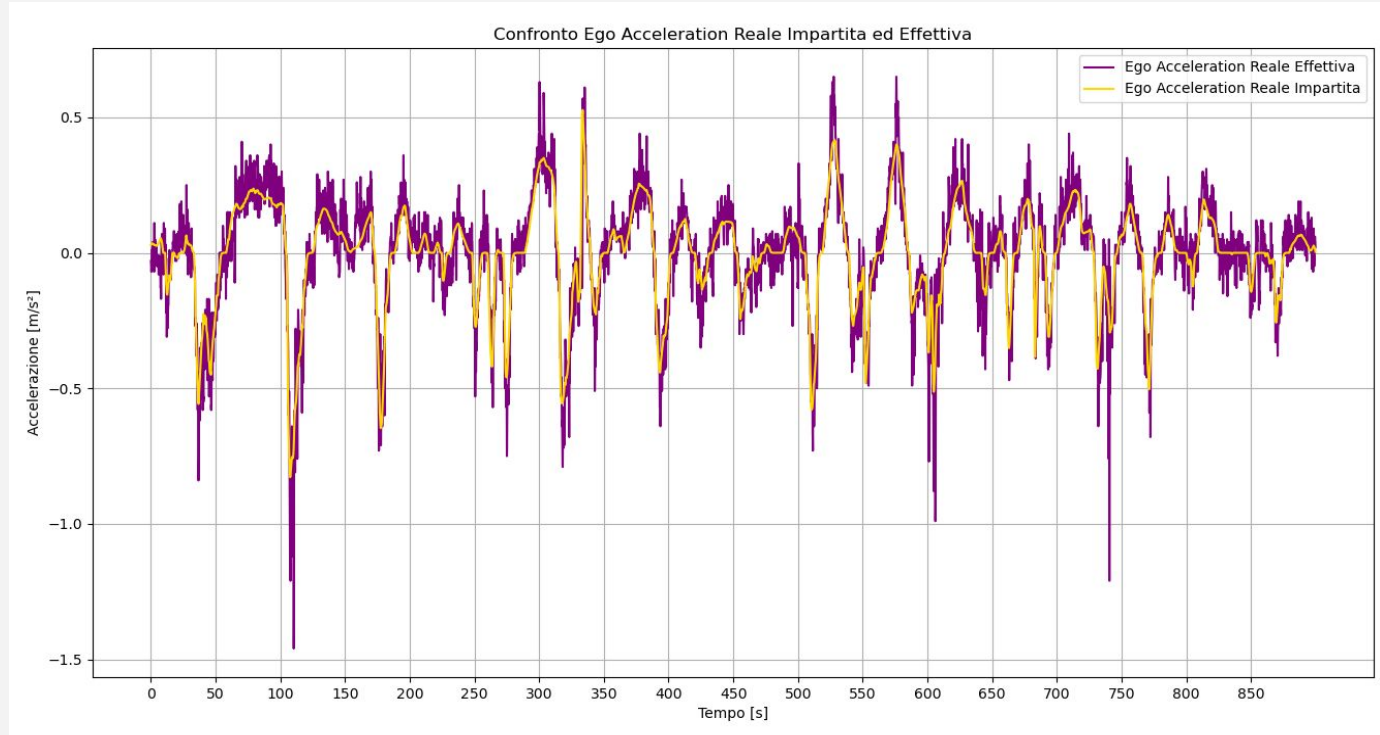
$$leader\ travelled\ space_t = v_{t-1}(\text{leader}) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_t(\text{leader}) \cdot (\Delta t)^2$$

$$ego\ travelled\ space_t = v_{t-1}(\text{ego}) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_t(\text{ego}) \cdot (\Delta t)^2$$

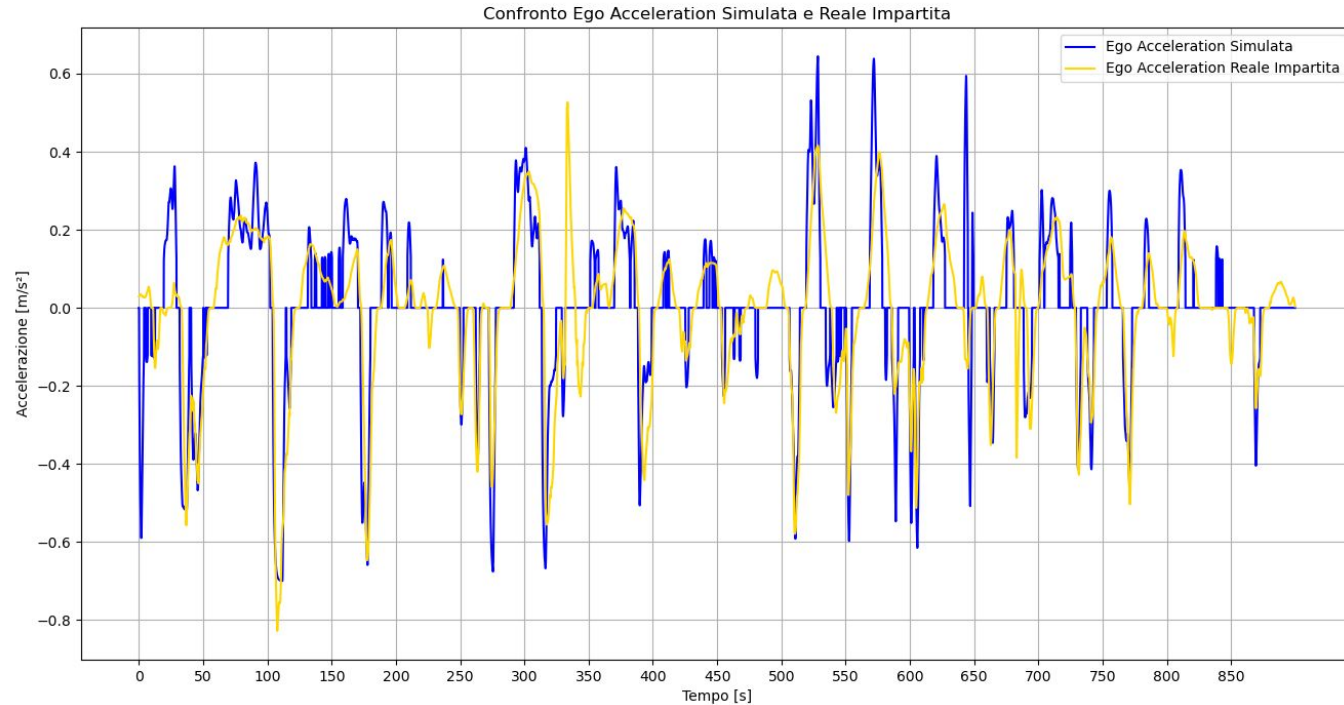
05 Risultati e Analisi



Premessa

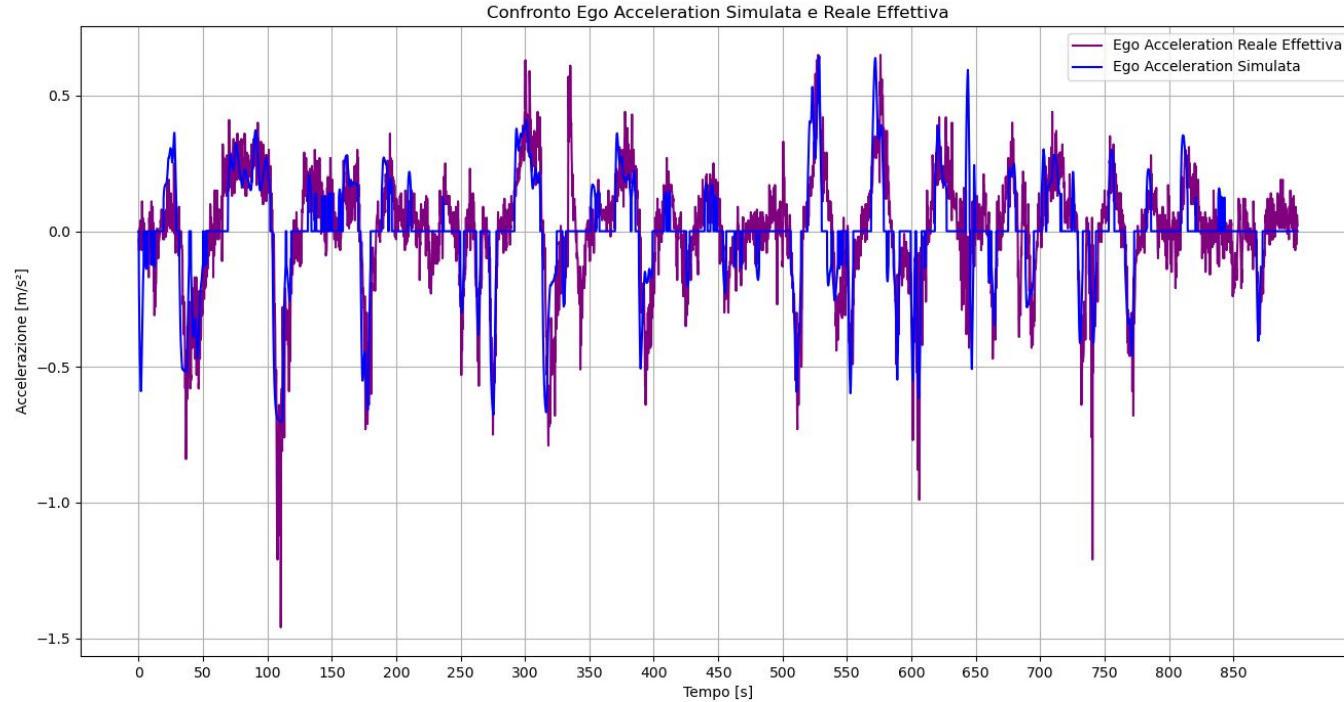


Ego Simulato VS Reale - Accelerazione Impartita



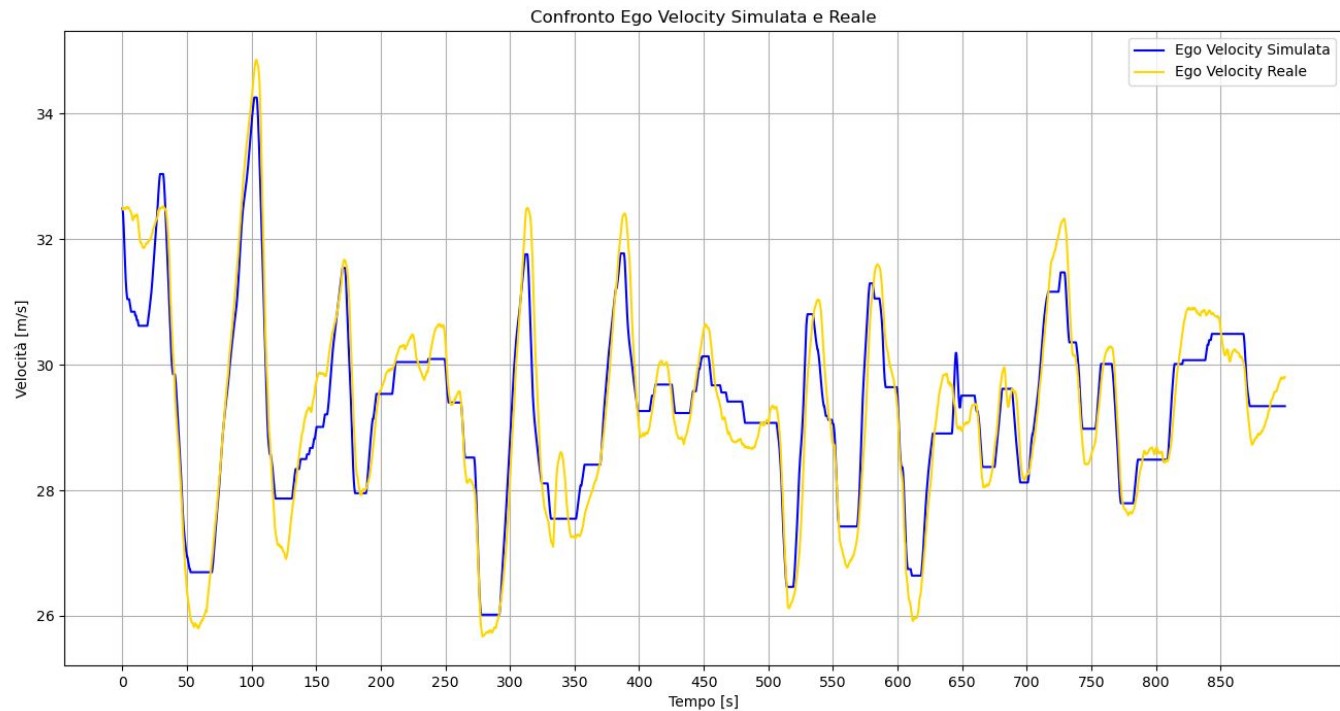
Pearson:
0.771

Ego Simulato VS Reale - Accelerazione Effettiva



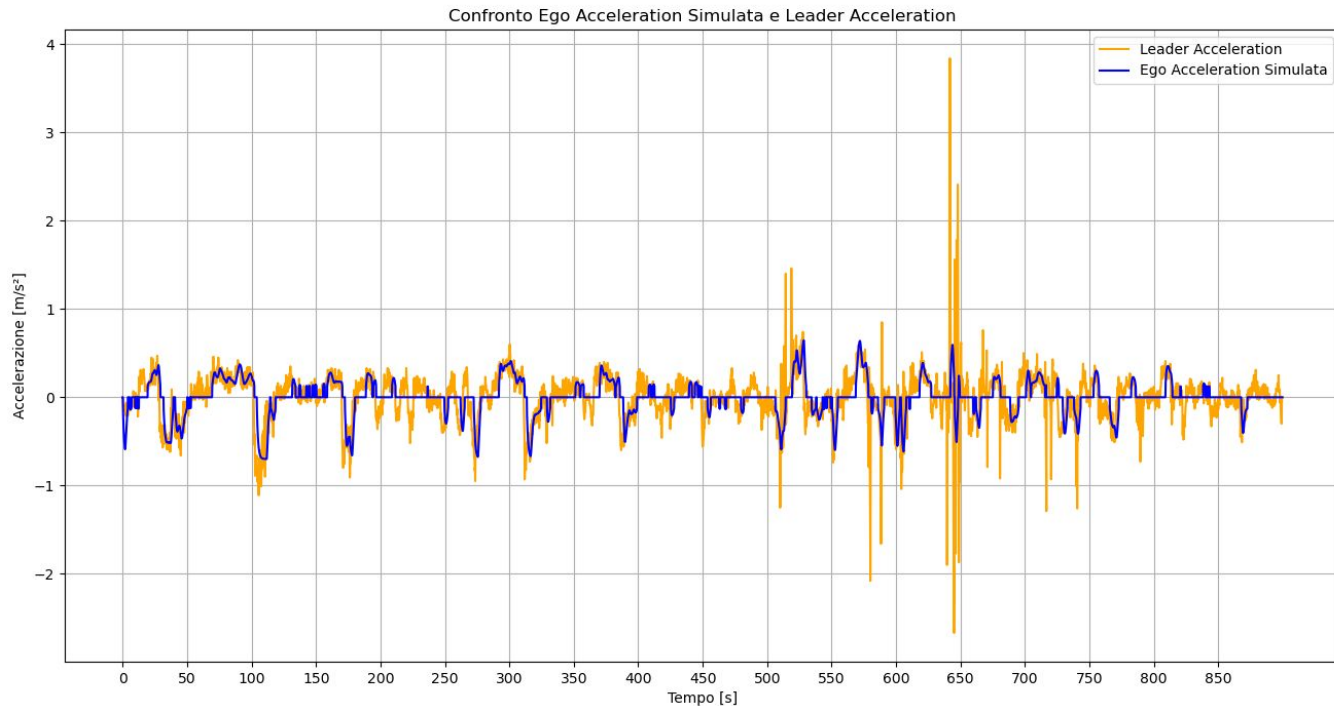
Pearson:
0.750

Ego Simulato VS Reale - Velocità



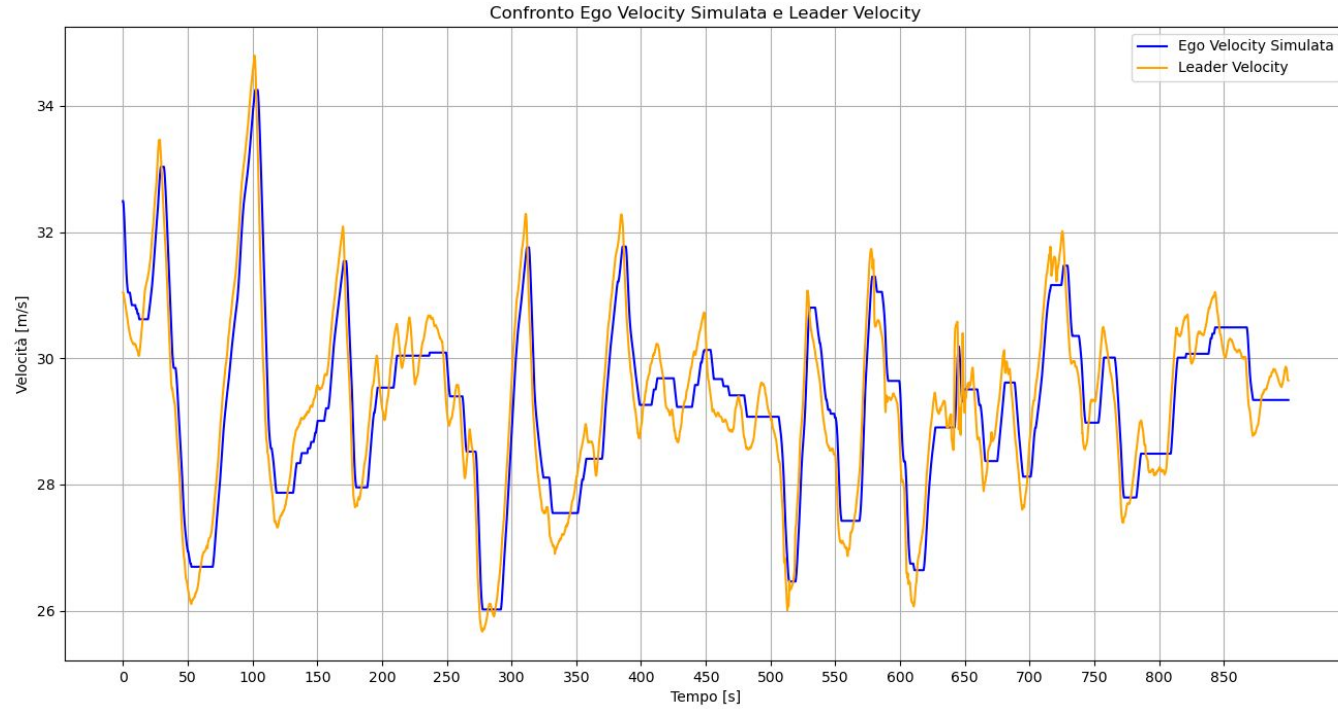
Pearson:
0.957

Ego Simulato VS Leader - Accelerazione



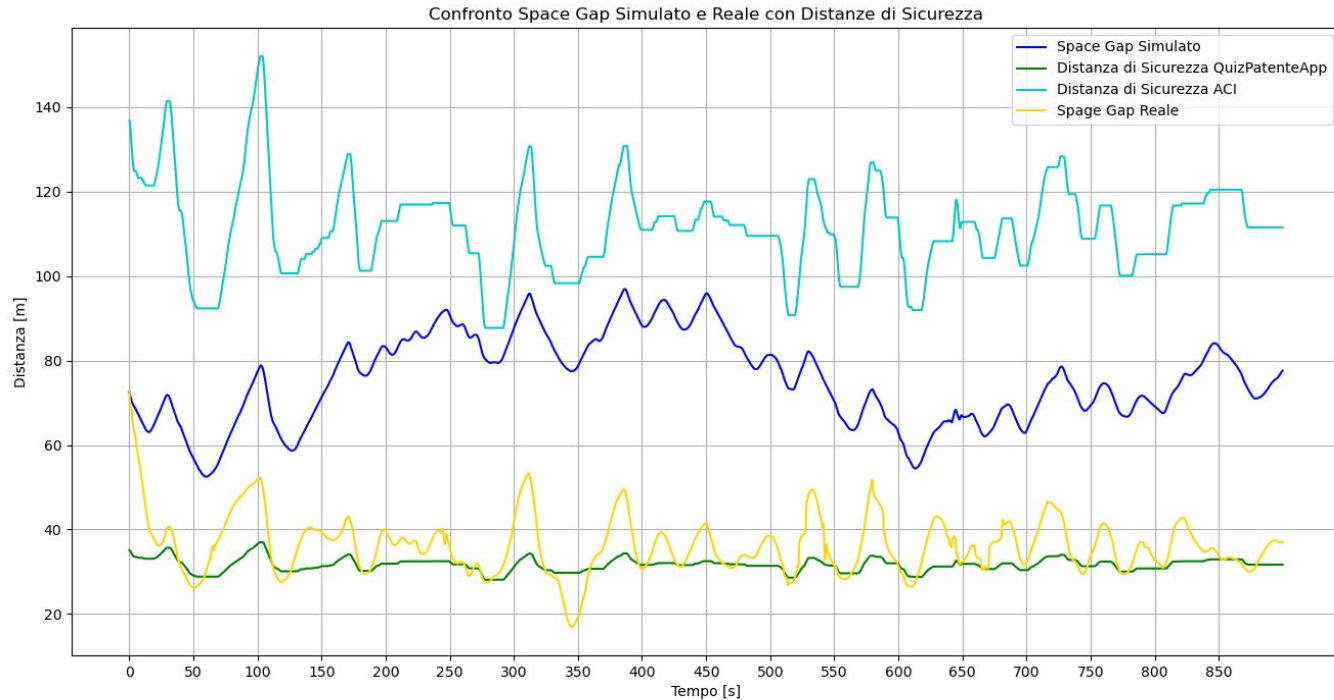
Pearson:
0.792

Ego Simulato VS Leader - Velocità



Pearson:
0.923

Space Gap Simulato VS Distanza di Sicurezza



Space Gap Simulato VS Distanza di Sicurezza

Space Gap **Reale**

$$\mu = 39.325\text{m}$$

$$\sigma = 11.519\text{m}$$

$$d_{ACI} [\text{m}] = \left(\frac{v_t(\text{ego}) [\text{km/h}]}{10} \right)^2$$

$$\mu = -35.849\text{m}$$

$$\sigma = 12.194\text{m}$$

[13]

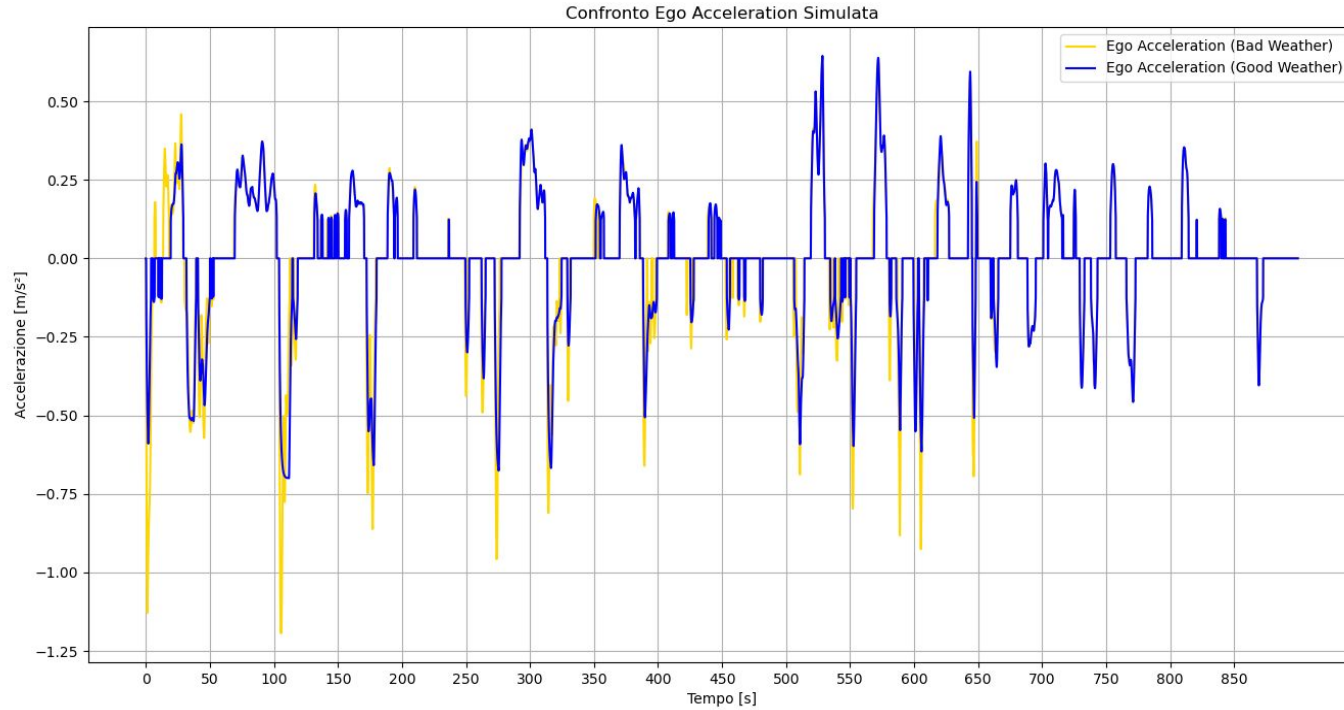
$$d_{QUIZPATENTEAPP} [\text{m}] = \frac{v_t(\text{ego}) [\text{km/h}]}{10} \cdot 3$$

$$\mu = 43.998\text{m}$$

$$\sigma = 9.960\text{m}$$

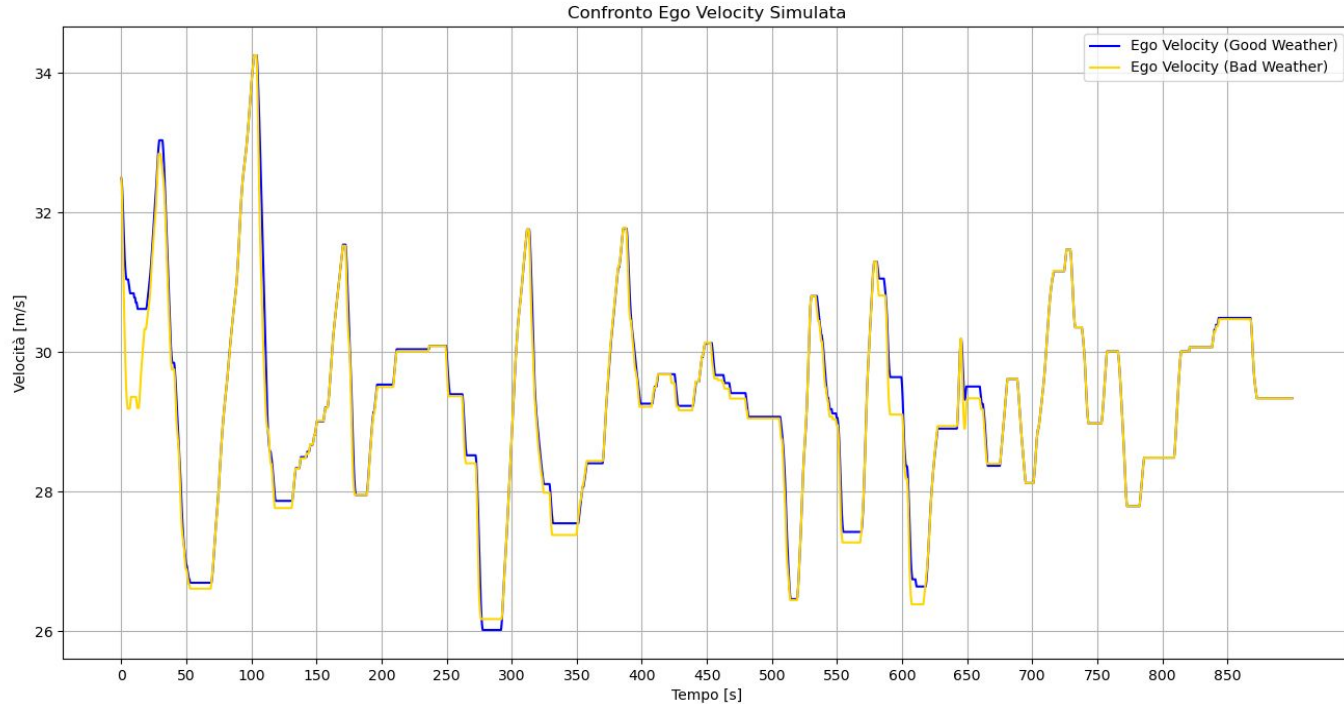
[14]

Bad VS Good Weather - Accelerazione



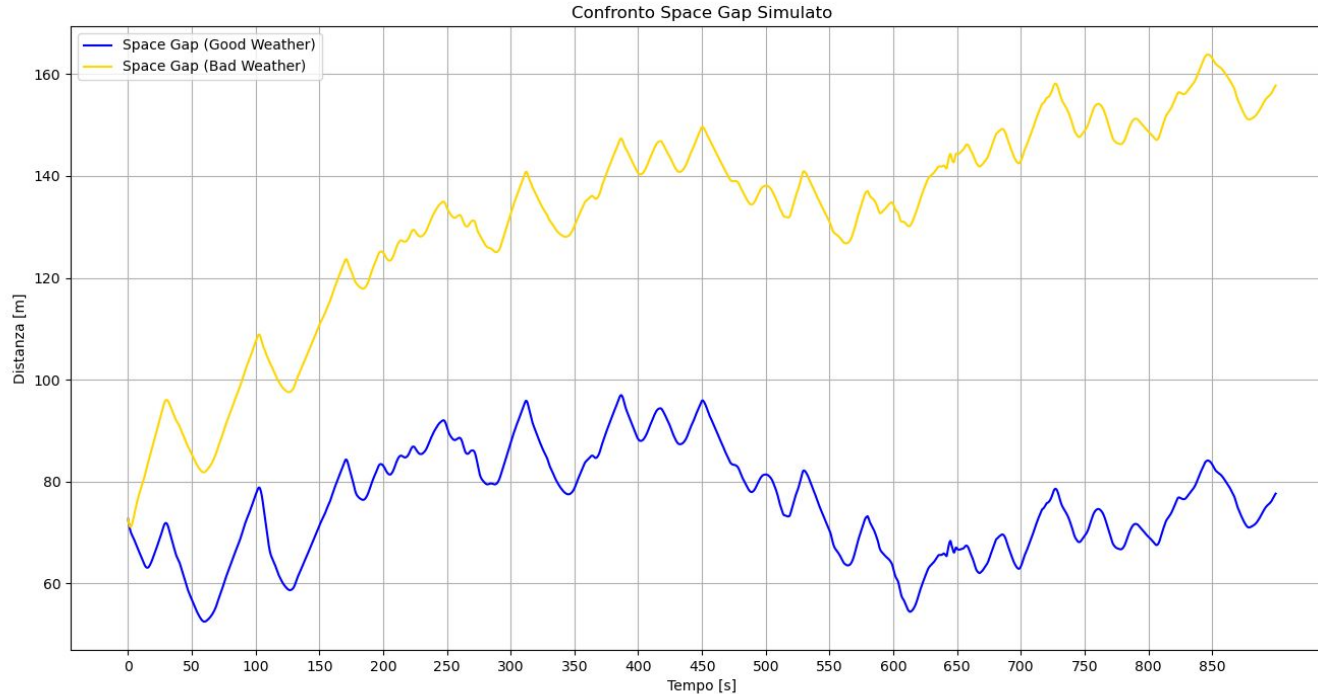
Pearson:
0.922

Bad VS Good Weather - Velocità



Pearson:
0.987

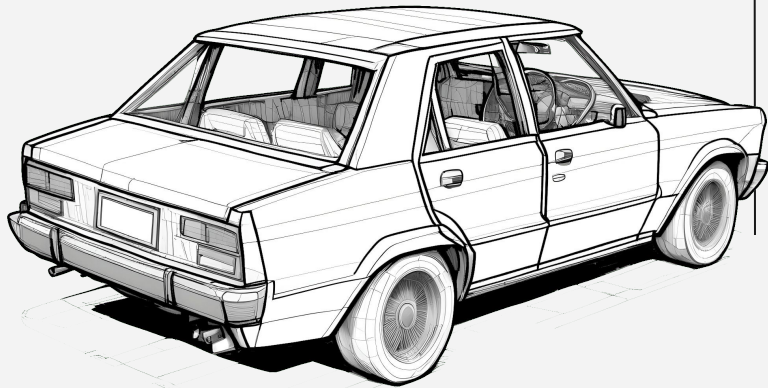
Bad VS Good Weather - Space Gap



$$\mu = 56.624\text{m}$$

$$\sigma = 18.374\text{m}$$

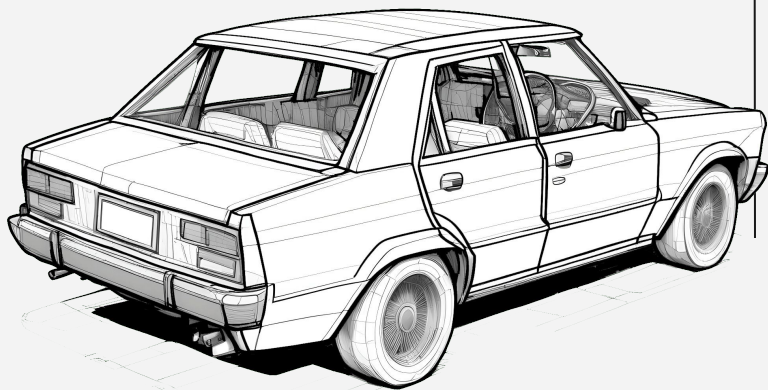
06 Conclusioni



Conclusioni

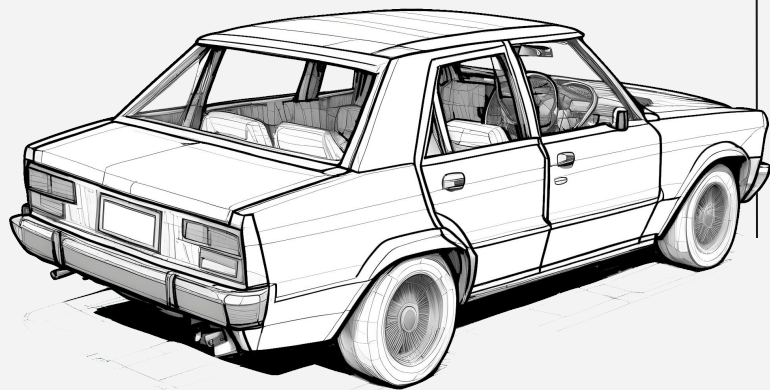
- Il modello riproduce con buona fedeltà le dinamiche di un ACC reale:
 - **Accelerazione:** forte correlazione con i dati reali, con risposta più smussata
 - **Velocità:** coerente con veicolo reale e leader, guida fluida senza brusche oscillazioni
 - **Space Gap:** più prudente dei dati reali ma meno conservativo delle regole più restrittive → buon compromesso sicurezza/realismo
 - **Meteo avverso:** comportamento più cauto, con distanze maggiori
- La logica fuzzy si è confermata efficace per gestire incertezza e variabilità, garantendo sicurezza, comfort e realismo
- Limitazioni:
 - Assenza di test su veicoli reali
 - Semplificazione sull'accelerazione Impartita ed Effettiva

07 Lavori Futuri



Lavori Futuri

- Miglior gestione delle condizioni meteo avverse
- Validazione pratica su veicoli reali o in scala con sensori dedicati
- Estensione a scenari più complessi
- Integrazione con modelli predittivi o machine learning
- Introduzione di un limite di velocità massimo dinamico
- Estensione degli intervalli delle variabili linguistiche e miglior gestione dei valori fuori range
- Calcolo del veicolo della variabile meteorologica
- Integrazione con sistemi V2V e V2I per scambio di informazioni in tempo reale
- Ottimizzazione del comfort di guida



Bibliografia

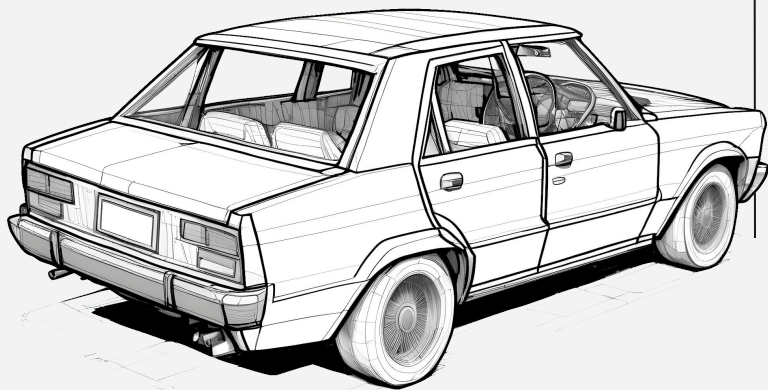
Bibliografia

1. P. Panse, A. Singh e C. Satsangi, «Adaptive Cruise Control using Fuzzy Logic»
2. M. Simic, «Cascaded Fuzzy Logic for Adaptive Cruise Control»
3. K. Alomari, R. Mendoza, S. Sundermann, D. Goehring e R. Rojas, «Fuzzy Logic-based Adaptive Cruise Control for Autonomous Model Car»
4. J. Guo, Y. Wang, L. Chu, C. Bai, Z. Hou e D. Zhao, «Adaptive Cruise System Based on Fuzzy MPC and Machine Learning State Observer»
5. «Limite autostrada: regole, neopatentati, pioggia, nebbia, 150 km/h.» AutoScout24.
6. International Organization for Standardization. «ISO 15622:2018 – Intelligent transport systems – Adaptive Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures.»
7. «Adaptive Cruise Control for Passenger Cars.» BOSCH.
8. G. Carichino. «Lo spazio di frenata: tabella, calcolo online e condizioni. »

Bibliografia

9. Gianni Lombardi. «Automobile: la regola dei 3 secondi per evitare incidenti e calcolare correttamente le distanze di sicurezza.»
10. A. Maurya e P. Bokare, «Study of Deceleration Behaviour of Different Vehicle Types»
11. William C. Evans. «Exponentially-Weighted Moving Average.»
12. Y. Wang, G. Gunter, M. Nice e D. Work, Estimating Adaptive Cruise Control Model Parameters from On-Board Radar Units
13. «La distanza di sicurezza: cosa è e come si calcola.» Fassina.
14. «Come calcolare la distanza minima di sicurezza?» QuizPatenteApp.

Appendice



Regole - 1

N°	Weather Condition	Time Headway	Relative Velocity	Acceleration
1	bad	dangerous	approaching_fast	strong_deceleration
2	bad	dangerous	approaching	medium_deceleration
3	bad	dangerous	steady	medium_deceleration
4	bad	dangerous	moving_away	light_deceleration
5	bad	dangerous	moving_away_fast	light_deceleration
6	bad	short	approaching_fast	strong_deceleration
7	bad	short	approaching	medium_deceleration
8	bad	short	steady	light_deceleration
9	bad	short	moving_away	zero_acceleration
10	bad	short	moving_away_fast	light_acceleration
11	bad	adequate	approaching_fast	strong_deceleration
12	bad	adequate	approaching	medium_deceleration
13	bad	adequate	steady	zero_acceleration
14	bad	adequate	moving_away	light_acceleration

Regole - 2

N°	Weather Condition	Time Headway	Relative Velocity	Acceleration
15	bad	adequate	moving_away_fast	medium_acceleration
16	bad	long	approaching_fast	medium_deceleration
17	bad	long	approaching	light_deceleration
18	bad	long	steady	zero_acceleration
19	bad	long	moving_away	light_acceleration
20	bad	long	moving_away_fast	medium_acceleration
21	bad	very_long	approaching_fast	medium_deceleration
22	bad	very_long	approaching	light_deceleration
23	bad	very_long	steady	light_acceleration
24	bad	very_long	moving_away	medium_acceleration
25	bad	very_long	moving_away_fast	strong_acceleration
26	good	dangerous	approaching_fast	medium_deceleration
27	good	dangerous	approaching	light_deceleration
28	good	dangerous	steady	light_deceleration

Regole - 3

N°	Weather Condition	Time Headway	Relative Velocity	Acceleration
29	good	dangerous	moving_away	zero_acceleration
30	good	dangerous	moving_away_fast	light_acceleration
31	good	short	approaching_fast	medium_deceleration
32	good	short	approaching	light_deceleration
33	good	short	steady	zero_acceleration
34	good	short	moving_away	light_acceleration
35	good	short	moving_away_fast	medium_acceleration
36	good	adequate	approaching_fast	medium_deceleration
37	good	adequate	approaching	light_deceleration
38	good	adequate	steady	zero_acceleration
39	good	adequate	moving_away	light_acceleration
40	good	adequate	moving_away_fast	medium_acceleration
41	good	long	approaching_fast	light_deceleration
42	good	long	approaching	light_deceleration

Regole - 4

N°	Weather Condition	Time Headway	Relative Velocity	Acceleration
43	good	long	steady	light_acceleration
44	good	long	moving_away	medium_acceleration
45	good	long	moving_away_fast	strong_acceleration
46	good	very_long	approaching_fast	light_deceleration
47	good	very_long	approaching	zero_acceleration
48	good	very_long	steady	light_acceleration
49	good	very_long	moving_away	medium_acceleration
50	good	very_long	moving_away_fast	strong_acceleration

Grazie per l'attenzione

CREDITS: This presentation template was created by **Slidesgo**, and includes icons by **Flaticon**, and infographics & images by **Freepik**

