



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO - BICOCCA
Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comunicazione
Corso di Laurea Magistrale in Informatica

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

Progetto Sistemi Complessi e Incerti

Autore:
Simone Lesinigo 899540

Indice

Introduzione	1
1 Stato dell'Arte	2
2 Modello Proposto	3
2.1 Definizione delle Variabili Linguistiche e Membership Functions .	3
2.1.1 Weather Condition	3
2.1.2 Time Headway	4
2.1.3 Relative Velocity	7
2.1.4 Acceleration	9
2.2 Creazione delle Regole	10
3 Implementazione	11
3.1 Dataset di riferimento e calcoli preliminari	11
4 Risultati e Analisi	13
5 Conclusioni	14
A Regole Fuzzy	16

Elenco delle figure

2.1	Membership Functions di Weather Condition.	4
2.2	Membership Functions di Time Headway	5
2.3	Membership Functions di Relative Velocity	8
2.4	Membership Functions di Acceleration	10

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto tra distanza di sicurezza da mantenere e distanza mantenuta.	7
A.1	Regole del Sistema Fuzzy	17

Introduzione

Negli ultimi anni, i sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS, acronimo di Advanced Driver Assistance Systems) hanno assunto un ruolo centrale nella progettazione dei veicoli moderni, contribuendo a migliorare la sicurezza e il comfort del conducente. Tra questi sistemi, l'Adaptive Cruise Control (ACC) permette di mantenere automaticamente una distanza di sicurezza dal veicolo che precede, adattando la velocità del veicolo controllato in funzione delle condizioni del traffico.

Il presente lavoro si concentra sulla progettazione di un sistema fuzzy per l'ACC, che sfrutta logiche di tipo linguistico per gestire in maniera graduale e naturale le accelerazioni e le decelerazioni del veicolo. L'approccio fuzzy si rivela particolarmente efficace per modellare comportamenti complessi come quelli della guida in autostrada, dove le velocità e le distanze tra veicoli variano continuamente.

Nel paper viene illustrato come è stato progettato e implementato il sistema fuzzy, descrivendo la scelta delle variabili linguistiche, la costruzione degli insiemi fuzzy e la definizione delle regole di controllo. Inoltre, viene presentata una simulazione basata su dati reali per analizzare i risultati e valutare l'efficacia del sistema nel regolare la velocità e mantenere la sicurezza e il comfort durante la guida.

1 Stato dell'Arte

2 Modello Proposto

Il presente capitolo descrive la progettazione del sistema fuzzy impiegato per l'Adaptive Cruise Control.

Si considera un veicolo di categoria M1 (auto destinata al trasporto di persone, con al massimo otto posti a sedere oltre al conducente) dalle prestazioni medie in termini di accelerazione e decelerazione.

L'ambiente di riferimento è quello autostradale, in cui i veicoli si muovono in traiettorie rettilinee.

D'ora in avanti, il veicolo che segue verrà indicato come *ego* (ossia il veicolo dell'utilizzatore del sistema ACC), mentre il veicolo che precede verrà indicato come *leader*.

Per le velocità di esercizio si è scelto un intervallo compreso tra $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ e $150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$: il valore minimo riflette le condizioni tipiche di marcia autostradale, mentre il valore massimo coincide con il limite consentito sulle autostrade italiane (generalmente $130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, elevabile a $150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ in circostanze particolari [1]).

2.1 Definizione delle Variabili Linguistiche e Membership Functions

Nel modello sono state introdotte quattro variabili linguistiche: tre in *input* e una in *output*.

Di seguito sono presentate le 3 variabili di *input*.

2.1.1 Weather Condition

La variabile `weather_condition` rappresenta lo stato meteorologico e assume valori normalizzati nell'intervallo $[0, 1]$, dove 0 corrisponde a condizioni pessime (`bad`) e 1 a condizioni ottimali (`good`).

- **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:** $[0, 1]$

La Figura 2.1 mostra le Membership Functions associate ai termini *bad* e *good*.

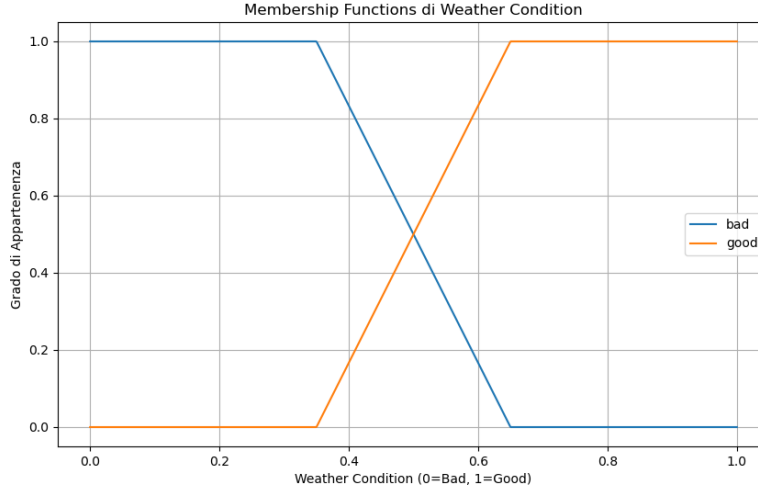


Figura 2.1: Membership Functions di Weather Condition.

2.1.2 Time Headway

La variabile `time_headway` rappresenta il tempo necessario affinché il veicolo *ego* percorra la distanza che lo separa dal veicolo *leader*. È definita come:

$$\text{time_headway [s]} = \frac{\text{space_gap [m]}}{\text{ego_velocity [m/s]}}$$

dove `space_gap` è la distanza tra i due veicoli ed `ego_velocity` è la velocità dell'*ego*.

Annotazione Si osservi che la formula impiega l'assunzione semplificativa secondo cui il veicolo *leader* sia in grado di arrestarsi istantaneamente. Tale ipotesi, evidentemente irrealistica, trascura lo spazio di frenata necessario al *leader*, che contribuirebbe ad aumentare il valore effettivo del `time_headway`. Questa approssimazione è tuttavia considerata accettabile nell'ottica di una modellazione semplificata e risulta coerente con quanto previsto dalla normativa ACC ISO 15622:2018 [2].

- **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. Il valore minimo corrisponde al limite fisico teorico, sebbene sia considerato praticamente irraggiungibile. Il valore massimo è stato determinato sulla base della portata tipica di un front radar sensor prodotto da BOSCH [3], pari a 300 m, e di una velocità minima del veicolo *ego* pari a 70 km/h. Pertanto, il massimo `time_headway` è calcolato come:

$$\max(\text{time_headway}) [s] = \frac{300 [m]}{\frac{70 [km/h]}{3.6}} = \frac{300 [m]}{19.4 [m/s]} \approx 15.4 [s]$$

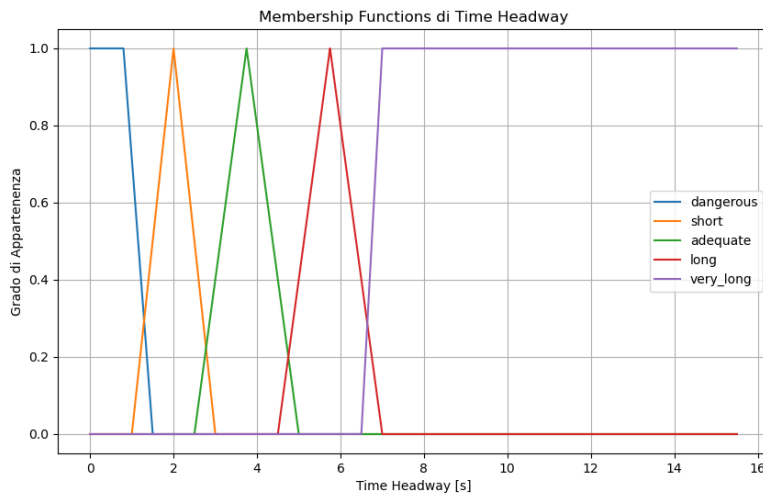


Figura 2.2: Membership Functions di Time Headway

Motivazioni della Scelta della Variabile

Si è preferito utilizzare la variabile `time_headway` piuttosto che introdurre un insieme separato di variabili come `distanza`, `ego_velocity` e `leader_velocity`, sia per contenere la complessità del sistema riducendo il numero di regole da definire, sia perché le Membership Functions nei sistemi fuzzy non sono progettate per adattarsi dinamicamente in base a uno o più parametri.

Ad esempio, risulterebbe problematico definire in modo univoco cosa significhi una distanza **dangerous**: quale intervallo tra 0 m e 300 m dovrebbe essere considerato tale? La pericolosità della distanza è infatti fortemente dipendente dalla velocità del veicolo.

Consideriamo la relazione:

$$d_{\text{sicurezza}} [m] = d_{\text{reazione}} [m] + d_{\text{frenata}} [m] \quad (2.1)$$

dove $d_{\text{sicurezza}}$ rappresenta la distanza di sicurezza, d_{reazione} è lo spazio percorso durante il tempo di reazione (ovvero il tempo necessario affinché il conducente

inizi la frenata), e d_{frenata} è lo spazio di arresto effettivo.

Si ha:

$$d_{\text{reazione}} = v \cdot t$$

dove v è la velocità del veicolo in m/s e t è il tempo di reazione in secondi.

Lo spazio di frenata è invece espresso da:

$$d_{\text{frenata}} = \frac{v^2}{2 a \mu}$$

dove a è la decelerazione massima e μ è il coefficiente di attrito con il manto stradale (in condizioni ottimali pari a 0.8) [4].

Se due veicoli sono separati da 20 m, tale distanza risulta adeguata se la velocità dell'*ego* è pari a 30 km/h. In tal caso, assumendo un tempo di reazione di 1 s, un coefficiente di attrito $\mu = 0.8$ e una brusca decelerazione pari a 1 g (ossia $a = -9.81 \text{ m/s}^2$), si ottiene:

$$d_{\text{sicurezza}} = v \cdot t + \frac{v^2}{2 a \mu}$$

dove la velocità deve essere convertita in metri al secondo:

$$v = \frac{30}{3.6} \approx 8.33 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right].$$

Pertanto:

$$d_{\text{sicurezza}} = 8.33 \times 1 + \frac{(8.33)^2}{2 \times 9.81 \times 0.8} \approx 8.33 + \frac{69.4}{15.7} \approx 8.33 + 4.42 \approx 12.75 \text{ [m]}.$$

Viceversa, alla velocità di 130 km/h, la medesima distanza di 20 m risulterebbe del tutto insufficiente. Ricalcolando infatti la distanza di sicurezza nelle stesse condizioni si ottiene:

$$d_{\text{sicurezza}} \approx 119.1 \text{ [m]}$$

La variabile **time_headway** consente di modellare direttamente il tempo che separa i due veicoli indipendentemente dalla loro velocità assoluta o dalla distanza in metri. Di fatto, agisce come una forma di *normalizzazione* del concetto di distanza, rendendolo più interpretabile e stabile all'interno del sistema fuzzy.

Scelta degli intervalli

Per definire gli intervalli della variabile linguistica **time_headway**, ci si è basati sulla cosiddetta *regola dei 3 secondi* [5], un criterio ampiamente adottato nella sicurezza stradale per garantire una distanza adeguata dal veicolo che precede. Tale regola stabilisce che, indipendentemente dalla velocità, il conducente dovrebbe mantenere almeno tre secondi di distanza temporale dal veicolo antistante, assicurando così il tempo necessario per reagire in caso di frenata improvvisa.

Partendo da questo principio, è stato definito l'intervallo per la categoria **adequate**.

Successivamente, sono stati impostati gli intervalli per le categorie **dangerous** e **short**, seguiti da quelli per **long** e **very_long**.

Per verificare la correttezza degli intervalli scelti, la Tabella 2.1 confronta la distanza da mantenere calcolata tramite l'equazione 2.1 con la distanza effettivamente mantenuta per i diversi valori di **ego_velocity** e **time_headway**. Nella tabella è inoltre riportata la differenza percentuale tra le due misure.

Si sottolinea che, per il calcolo di entrambe le distanze, sono stati utilizzati i valori $a = 9.81 \text{ m/s}^2$ e $\mu = 0.8$ come in precedenza, modificando però il tempo di reazione da 1 s a 2 s, in quanto si presuppone che, in autostrada con ACC attivo, il conducente presti un livello di attenzione ridotto.

Velocità [km/h]	Time Headway [s]	Distanza da mantenere [m]	Distanza mantenuta [m]	Differenza %
70	0.5	62.977	33.810	-86.266
	1.0		43.533	-44.666
	2.0		62.977	0.000
	3.0		82.421	+23.591
	4.0		101.866	+38.177
	7.0		160.199	+60.688
	10.0		218.533	+71.182
	15.0		315.755	+80.055
110	0.5	120.594	74.761	-61.307
	1.0		90.038	-33.936
	2.0		120.594	0.000
	3.0		151.149	+20.215
	4.0		181.705	+33.632
	7.0		273.372	+55.886
	10.0		365.038	+66.964
	15.0		517.816	+76.711
150	0.5	193.942	131.442	-47.550
	1.0		152.275	-27.363
	2.0		193.942	0.000
	3.0		235.609	+17.685
	4.0		277.275	+30.054
	7.0		402.275	+51.789
	10.0		527.275	+63.218
	15.0		735.609	+73.635

Tabella 2.1: Confronto tra distanza di sicurezza da mantenere e distanza mantenuta.

2.1.3 Relative Velocity

La variabile **relative_velocity** rappresenta la velocità relativa del veicolo *leader* rispetto al veicolo *ego*. Essa è definita come:

$$\text{relative_velocity} = \text{leader_velocity} - \text{ego_velocity}.$$

Annotazione Si noti che, sebbene la variabile rappresenti la velocità relativa del *leader* rispetto all'*ego*, i termini linguistici sono definiti dal punto di vista

dell'*ego*. Ad esempio, se il *leader* viaggia a $30 \frac{m}{s}$ e l'*ego* a $20 \frac{m}{s}$, si ha:

$$\text{relative_velocity} = 10 \left[\frac{m}{s} \right],$$

ossia il *leader* è $36 \frac{km}{h}$ più veloce dell'*ego*. In questo caso, il fenomeno rientra nella categoria **moving_away_fast**, poiché l'*ego* si sta allontanando rapidamente dal leader.

• **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:** $[-23.0, +23.0] \frac{m}{s}$

Gli estremi dell'universo sono stati determinati calcolando, in valore assoluto, la massima differenza di velocità tra il veicolo *leader* e il veicolo *ego*, come mostrato di seguito:

$$\max(\text{relative_velocity}) [m/s] = \frac{150 [km/h] - 70 [km/h]}{3.6} = 22.2 [m/s]$$

In Figura 2.3 sono riportate le Membership Functions associate alla variabile **relative_velocity**.

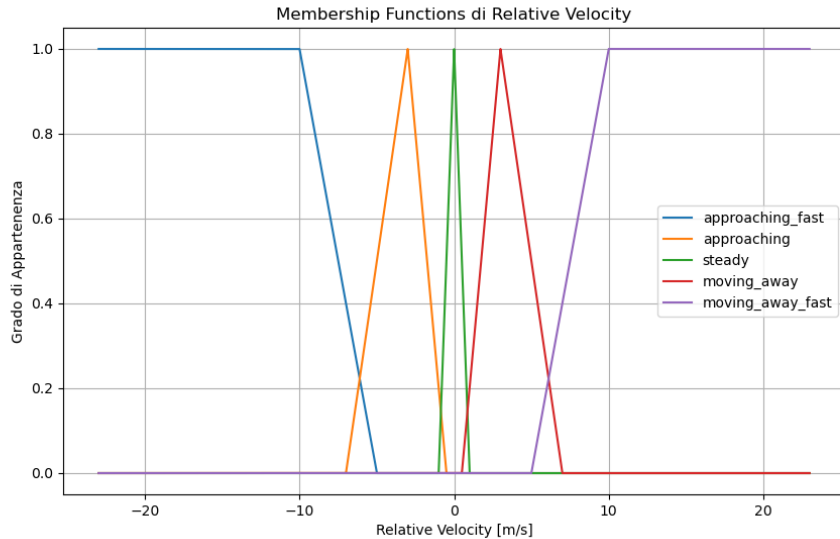


Figura 2.3: Membership Functions di Relative Velocity

Di seguito viene presentata l'unica variabile in *output*.

2.1.4 Acceleration

La variabile **acceleration** rappresenta l'accelerazione (positiva, negativa o nulla) impartita al veicolo:

- **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 $[2.0, 2.5, 3.0, 3.0]$.

Si noti che per il termine **zero_acceleration** è stata scelta una funzione **trapezoidale**, anziché triangolare. Questa decisione consente di rappresentare un intervallo più ampio di valori prossimi allo zero come “assenza di accelerazione”, evitando che piccolissime variazioni (inevitabili nei sensori o nel modello) vengano interpretate come continue micro-accelerazioni o micro-decelerazioni. In questo modo il sistema risulta più stabile e garantisce una guida percepita come più confortevole dal conducente.

- **Universo:** $[-3.0, +3.0] \frac{m}{s^2}$

Un'accelerazione al di fuori di tale intervallo è considerata non confortevole e quindi incompatibile con l'obiettivo di comfort che il sistema ACC deve garantire. In particolare:

- Una **decelerazione inferiore a $-3 \frac{m}{s^2}$** è considerata troppo brusca **CERCARE MAX DEC CONFORTEVOLE**; in questi casi l'intervento viene demandato all'AEB (Autonomous Emergency Braking), un sistema ADAS distinto incaricato della gestione delle frenate di emergenza.
- Un'accelerazione **superiore a $+3 \frac{m}{s^2}$** è considerata eccessiva e non confortevole per il conducente e i passeggeri.

In Figura 2.4 sono riportate le Membership Functions associate alla variabile **acceleration**.

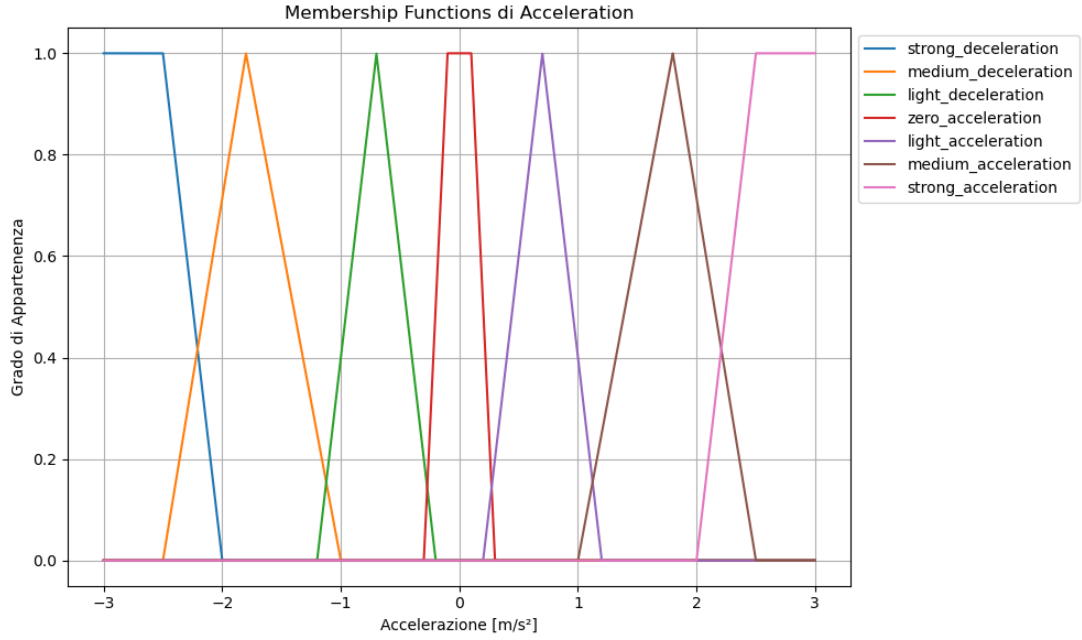


Figura 2.4: Membership Functions di Acceleration

2.2 Creazione delle Regole

Per la definizione delle regole di controllo sono state considerate tutte le possibili combinazioni dei termini linguistici delle variabili in input, in modo da garantire la copertura di tutti i possibili scenari. Il numero totale delle regole si ottiene moltiplicando il numero di termini di ciascuna variabile di input:

$$n^{\circ} \text{ regole} = 2 \times 5 \times 5 = 50$$

Tale numero è relativamente contenuto per un controller fuzzy, anche grazie agli accorgimenti già illustrati nella Sezione 2.1.2; per questo motivo si è deciso di non adottare un approccio a cascata, privilegiando invece una singola base di regole che mantiene la struttura del sistema più semplice.

Una volta generate tutte le combinazioni, è stato quindi assegnato il termine linguistico di output ritenuto più appropriato (relativo alla variabile **acceleration**). L'elenco completo delle regole è riportato in Appendice A.1.

Si evidenzia che, a parità di valore delle altre variabili, in condizioni meteorologiche peggiori sono stati scelti output di accelerazione più prudenti, al fine di riflettere una maggiore attenzione alla sicurezza.

3 Implementazione

Il modello è stato implementato in `Python` utilizzando la libreria `scikit-fuzzy`. L'intero codice sorgente è disponibile su GitHub.

L'output del sistema fuzzy non è stato utilizzato direttamente, ma sottoposto a un *filtro passa-basso* al fine di ridurre la variabilità rapida del segnale ed aumentare il comfort percepito dal conducente. Il filtro è descritto dalla seguente equazione:

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

dove:

- $a_f(t)$ rappresenta l'accelerazione filtrata
- $\alpha = 0.1$ rappresenta il coefficiente di smoothing scelto
- $a(t)$ rappresenta l'accelerazione fuzzy grezza in output
- $a(t - 1)$ rappresenta l'accelerazione filtrata al tempo precedente

Una visualizzazione interattiva del funzionamento di tale filtro è disponibile su GeoGebra [6].

Inoltre, per eliminare oscillazioni di bassa entità, tutte le accelerazioni con valore assoluto inferiore a 0.12 m/s^2 sono state poste pari a zero. Questa soglia consente di evitare micro-variazioni potenzialmente fastidiose, si noti che un valore troppo elevato potrebbe introdurre accelerazioni più brusche nel momento in cui il sistema reagisce a variazioni significative.

Sia la soglia di 0.12 m/s^2 sia il coefficiente $\alpha = 0.1$ sono stati scelti empiricamente tramite test, al fine di bilanciare la reattività del sistema con la stabilità e il comfort del conducente.

3.1 Dataset di riferimento e calcoli preliminari

Per verificare la bontà del modello, è stato utilizzato un dataset pubblico del 2019 [7] dove sono stati raccolti dati da un veicolo dotato di ACC su un tratto di Interstate-65 (un'autostrada statunitense) per 15 minuti, direttamente tramite l'unità radar di serie del veicolo, acquisendo informazioni tramite il CAN bus.

In particolare, il dataset include le seguenti 5 colonne:

- **timestamps** [s]: istanti di campionamento (frequenza di 10 Hz)
- **ego_velocity** [m/s]: velocità del veicolo *ego*
- **leader_velocity** [m/s]: velocità del veicolo *ego*
- **space_gap** [m]: distanza tra i veicoli
- **ACC command acceleration** [m/s²]: accelerazione richiesta dall'ACC

4 Risultati e Analisi

5 Conclusioni

Bibliografia

- [1] “Limite autostrada: regole, neopatentati, pioggia, nebbia, 150 km/h.” Ultimo accesso: 12 luglio 2025, AutoScout24. indirizzo: <https://www.autoscout24.it/informare/consigli/norme-della-strada/limite-in-autostrada/>.
- [2] International Organization for Standardization. “ISO 15622:2018 - Intelligent transport systems — Adaptive Cruise Control systems — Performance requirements and test procedures.” Ultimo accesso: 28 agosto 2025. indirizzo: <https://www.iso.org/standard/71515.html>.
- [3] “Adaptive Cruise Control for Passenger Cars.” Ultimo accesso: 6 luglio 2025, BOSCH. indirizzo: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/assistance-systems/adaptive-cruise-control/>.
- [4] G. Carichino. “Lo spazio di frenata: tabella, calcolo online e condizioni.” indirizzo: <https://www.youmath.it/domande-a-risposte/view/6684-spazio-di-frenatura.html>.
- [5] Gianni Lombardi. “Automobile: la regola dei 3 secondi per evitare incidenti e calcolare correttamente le distanze di sicurezza.” Ultimo accesso: 1 settembre 2025. indirizzo: <https://benzinazero.wordpress.com/2016/03/23/automobile-la-regola-dei-3-secondi-per-evitare-incidenti-thinksafe/>.
- [6] William C. Evans. “Exponentially-Weighted Moving Average.” Ultimo accesso: 1 settembre 2025, Geogebra. indirizzo: <https://www.geogebra.org/m/tb88mqrm>.
- [7] Y. Wang, G. Gunter, M. Nice e D. Work, *Estimating Adaptive Cruise Control Model Parameters from On-Board Radar Units*, <https://acc-dataset.github.io/datasets/>, Ultimo accesso: 1 settembre 2025, 2019.

A Regole Fuzzy

Weather_Condition	Time_Headway	Relative_Velocity	Acceleration
bad	dangerous	approaching_fast	strong_deceleration
bad	dangerous	approaching	medium_deceleration
bad	dangerous	steady	medium_deceleration
bad	dangerous	moving_away	light_deceleration
bad	dangerous	moving_away_fast	light_deceleration
bad	short	approaching_fast	strong_deceleration
bad	short	approaching	medium_deceleration
bad	short	steady	light_deceleration
bad	short	moving_away	zero_acceleration
bad	short	moving_away_fast	light_acceleration
bad	adequate	approaching_fast	strong_deceleration
bad	adequate	approaching	medium_deceleration
bad	adequate	steady	zero_acceleration
bad	adequate	moving_away	light_acceleration
bad	adequate	moving_away_fast	medium_acceleration
bad	long	approaching_fast	medium_deceleration
bad	long	approaching	light_deceleration
bad	long	steady	zero_acceleration
bad	long	moving_away	light_acceleration
bad	long	moving_away_fast	medium_acceleration
bad	very_long	approaching_fast	medium_deceleration
bad	very_long	approaching	light_deceleration
bad	very_long	steady	light_acceleration
bad	very_long	moving_away	medium_acceleration
bad	very_long	moving_away_fast	strong_acceleration
good	dangerous	approaching_fast	medium_deceleration
good	dangerous	approaching	light_deceleration
good	dangerous	steady	light_deceleration
good	dangerous	moving_away	zero_acceleration
good	dangerous	moving_away_fast	light_acceleration
good	short	approaching_fast	medium_deceleration
good	short	approaching	light_deceleration
good	short	steady	zero_acceleration
good	short	moving_away	light_acceleration
good	short	moving_away_fast	medium_acceleration
good	adequate	approaching_fast	medium_deceleration
good	adequate	approaching	light_deceleration
good	adequate	steady	zero_acceleration
good	adequate	moving_away	light_acceleration
good	adequate	moving_away_fast	medium_acceleration
good	long	approaching_fast	light_deceleration
good	long	approaching	light_deceleration
good	long	steady	light_acceleration
good	long	moving_away	medium_acceleration
good	long	moving_away_fast	strong_acceleration
good	very_long	approaching_fast	light_deceleration
good	very_long	approaching	zero_acceleration
good	very_long	steady	light_acceleration
good	very_long	moving_away	medium_acceleration
good	very_long	moving_away_fast	strong_acceleration

Tabella A.1: Regole del Sistema Fuzzy