



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
4 Risultati e Analisi	12
5 Conclusioni	13
A Regole Fuzzy	15

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 da mantenere secondo la regola dei 3 secondi e distanza mantenuta.	7
A.1	Regole del Sistema Fuzzy	16

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*.

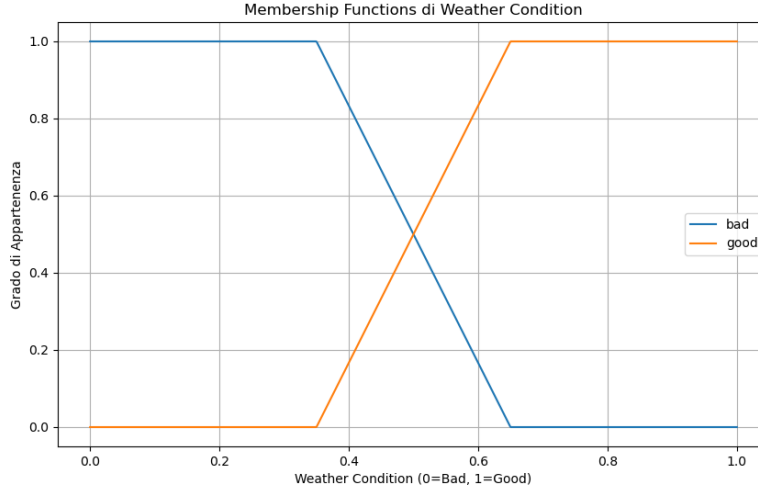


Figura 2.1: Membership Functions di Weather Condition.

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:

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

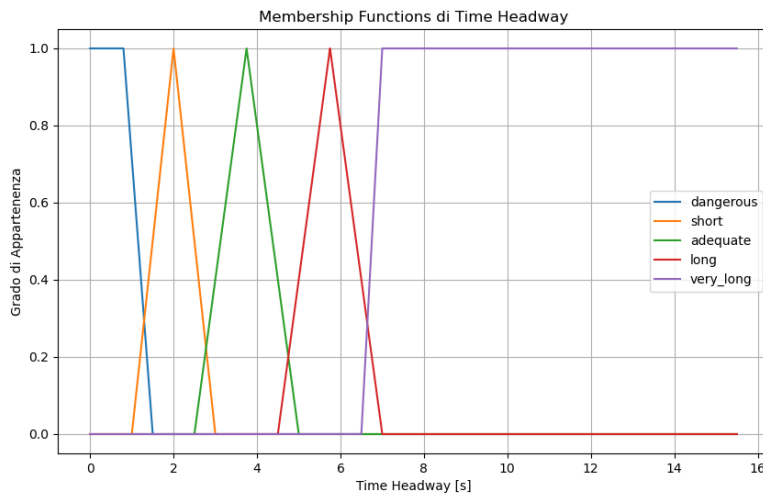


Figura 2.2: Membership Functions di Time Headway

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:

$$v = \frac{30}{3.6} \approx 8.\overline{33} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right].$$

Pertanto:

$$d_{\text{sicurezza}} = 8.\overline{33} \times 1 + \frac{(8.\overline{33})^2}{2 \times 9.81 \times 0.8} \approx 8.\overline{33} + \frac{69.4}{15.7} \approx 8.\overline{33} + 4.42 \approx 12.75 \text{ [m]}.$$

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], una raccomandazione ampiamente utilizzata nella sicurezza stradale per garantire una distanza adeguata dal veicolo che precede. Questa regola stabilisce che, indipendentemente dalla velocità, il conducente dovrebbe mantenere almeno tre secondi di distanza temporale dal veicolo antistante, in modo da avere il tempo necessario per reagire in caso di frenata improvvisa.

Seguendo tale principio, si è costruito l'intervallo per **adequate**, impostandolo leggermente più alto per aumentare la sicurezza. Successivamente, sono stati definiti gli intervalli per le categorie **dangerous** e **short**, e infine quelli per **long** e **very_long**.

Per visualizzare la correttezza degli intervalli scelti, la Tabella 2.1 confronta la distanza da mantenere secondo la regola dei 3 secondi con la distanza effettivamente mantenuta considerando un determinato **time_headway**. È inoltre riportata la differenza percentuale tra le due misure. Si segnala che per il calcolo di entrambe le distanze è stata utilizzata l'equazione 2.1 riportata in precedenza, impostando sempre $a = 9.81 \text{ m/s}^2$ e $\mu = 0.8$.

Velocità [km/h]	Time Headway [s]	Distanza da mantenere [m]	Distanza mantenuta [m]	Differenza %
70	0.5	82.421	33.810	-143.776
	1.0		43.533	-89.333
	2.0		62.977	-30.875
	3.0		82.421	0.000
	4.0		101.866	+19.088
	7.0		160.199	+48.551
	10.0		218.533	+62.284
	15.0		315.755	+73.897
110	0.5	151.149	74.761	-102.178
	1.0		90.038	-67.872
	2.0		120.594	-25.338
	3.0		151.149	0.000
	4.0		181.705	+16.816
	7.0		273.372	+44.709
	10.0		365.038	+58.594
	15.0		517.816	+70.810
150	0.5	235.609	131.442	-79.249
	1.0		152.275	-54.725
	2.0		193.942	-21.484
	3.0		235.609	0.000
	4.0		277.275	+15.027
	7.0		402.275	+41.431
	10.0		527.275	+55.316
	15.0		735.609	+67.971

Tabella 2.1: Confronto tra distanza da mantenere secondo la regola dei 3 secondi 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**.

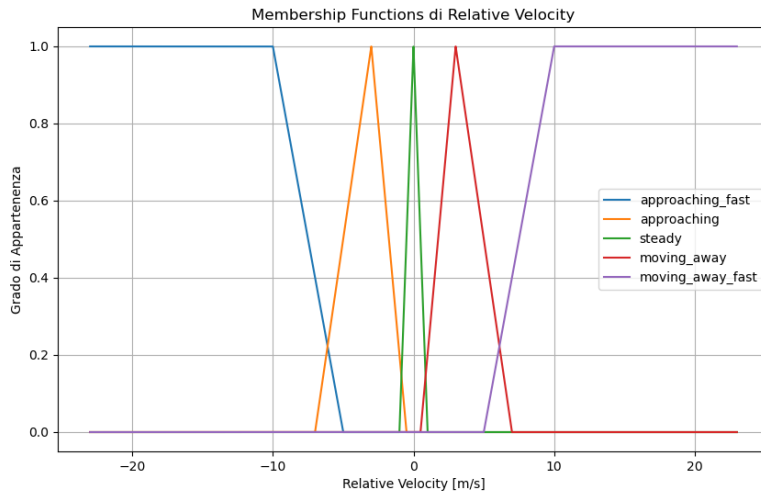


Figura 2.3: Membership Functions di Relative Velocity

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

2.1.4 Acceleration

La variabile **acceleration** rappresenta l'accelerazione (positiva, negativa o nulla) che viene 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 $[2.0, 2.5, 3.0, 3.0]$.

- **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**.

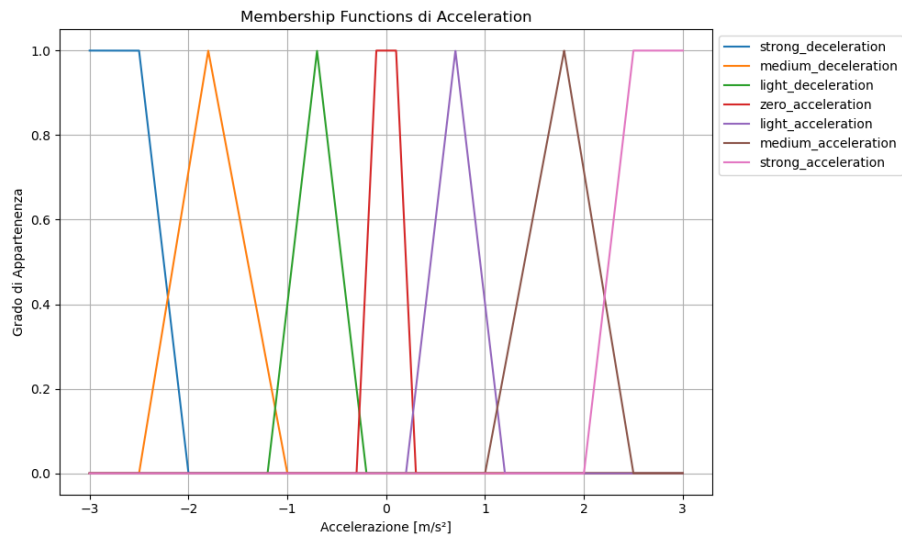


Figura 2.4: Membership Functions di Acceleration

2.2 Creazione delle Regole

3 Implementazione

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/>.

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