

Assignment 3: Motion Planning and Control

Frenet-Based Planner e Tracking Longitudinale con Pure Pursuit

Francesco Caligiuri

207688

Corso: Platforms and Algorithms for Autonomous Driving

AA 2024/2025 – Consegnata: 13/01/2025

Indice

1	Introduzione	3
2	Esercizio 1: 10 m/s e 15 m/s	3
2.1	Parametri principali	3
2.1.1	Frenet Planner	3
2.1.2	Controllo Longitudinale e Laterale	3
2.1.3	Path globale e ostacoli	3
2.2	Risultati a 10 m/s	4
2.2.1	Traiettoria 2D e Yaw Rate	4
2.2.2	Errori laterali (Frenet e Globale), Heading Angle	5
2.2.3	Velocità, Accelerazione e Sterzata	6
2.2.4	Velocità laterale e angoli di slittamento	7
2.2.5	Osservazioni per 10 m/s	7
2.3	Risultati a 15 m/s	7
2.3.1	Traiettoria 2D, Heading e Errori laterali	8
2.3.2	Velocità, Accelerazione e Sterzata	9
2.3.3	Velocità laterale e slittamenti a 15 m/s	10
2.4	Conclusioni per Esercizio 1	10
3	Esercizio 2: 20 m/s, 25 m/s e oltre	11
3.1	Parametri e Setup	11
3.2	Risultati a 20 m/s	11
3.2.1	Errore Laterale Frenet	11
3.2.2	Velocità e Sterzata	11
3.2.3	Velocità Laterale (20 m/s)	12
3.3	Risultati a 25 m/s	12
3.3.1	Errore Laterale Frenet	12
3.3.2	Velocità Longitudinale	13
3.3.3	Sterzata (Steering Angle) a 25 m/s	13
3.3.4	Velocità Laterale (25 m/s)	13
3.3.5	Slip Angles (25 m/s)	14
3.4	Conclusioni Esercizio 2	14

1 Introduzione

Il presente documento riporta i risultati degli esperimenti relativi all'Assignment 3, incentrato sull'implementazione di un *Frenet-based planner* per la generazione di traiettorie in presenza di ostacoli statici e sull'impiego di un controllore **Pure Pursuit** in combinazione con un **PID** longitudinale per il mantenimento della velocità desiderata. La dinamica del veicolo è modellata come **Single Track** non lineare, integrata con lo schema **RK4** con un passo di 0.05 s.

La **Sezione 2** espone i risultati per l'**Esercizio 1** (velocità di 10 m/s e 15 m/s), mentre la **Sezione 3** analizza l'**Esercizio 2**, che prevede velocità di 20 m/s, 25 m/s e oltre, utilizzando controllori laterali diversi (Stanley, Pure Pursuit, MPC).

2 Esercizio 1: 10 m/s e 15 m/s

2.1 Parametri principali

2.1.1 Frenet Planner

- $\text{MAX_SPEED} = \{10, 15\}$ m/s (in base al test).
- $\text{TARGET_SPEED} = \text{MAX_SPEED}$.
- $\text{ROBOT_RADIUS} = 3.0$ m.
- $\text{MAX_T} = 5.0$ s, $\text{MAX_ROAD_WIDTH} = 5.0$ m, $\text{DW} = 0.5$ m.
- Pesi dei costi ($K_J, K_T, K_D, K_{LAT}, K_{LON}$) selezionati empiricamente.

2.1.2 Controllo Longitudinale e Laterale

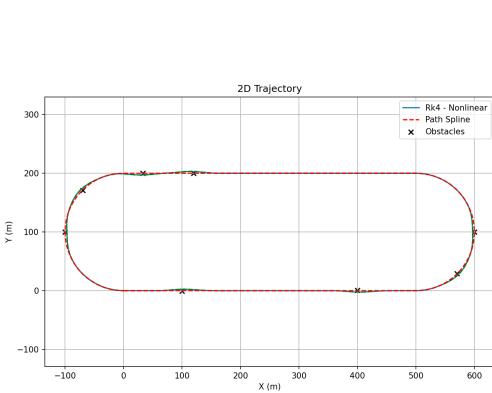
- **PID Longitudinale:**
 - $k_p = 1.5, k_i = 0.6, k_d = 0.06$.
 - $\text{output_limits} = \pm 2$ m/s².
- **Pure Pursuit** (controllo laterale):
 - $k_{pp} = 0.2, \text{look_ahead}=4.0$.

2.1.3 Path globale e ostacoli

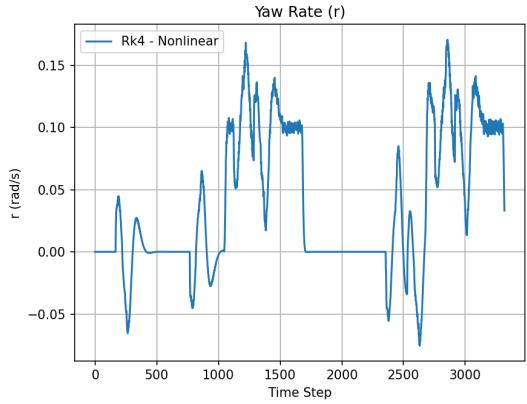
La traiettoria base (`oval_trj.txt`) è interpolata con `Spline2D`. Il *Frenet-based planner* genera un insieme di traiettorie candidate a ogni ciclo, scartando quelle che si sovrappongono agli ostacoli statici (definiti come punti (x, y)) in base a un raggio di 3 m. Il veicolo integra i setpoint di posizione e velocità forniti dal planner, aggiornando la traiettoria ottimale a ogni iterazione.

2.2 Risultati a 10 m/s

2.2.1 Traiettoria 2D e Yaw Rate



(a) Traiettoria 2D (Frenet vs. Effettiva).



(b) Yaw Rate.

Figura 1: Percorso e yaw rate a 10 m/s.

In Figura 1a si osserva la sovrapposizione tra la traiettoria Frenet ed effettiva, con scostamenti contenuti. L'andamento dello yaw rate in Figura 1b risulta coerente con le manovre sterzanti.

2.2.2 Errori laterali (Frenet e Globale), Heading Angle

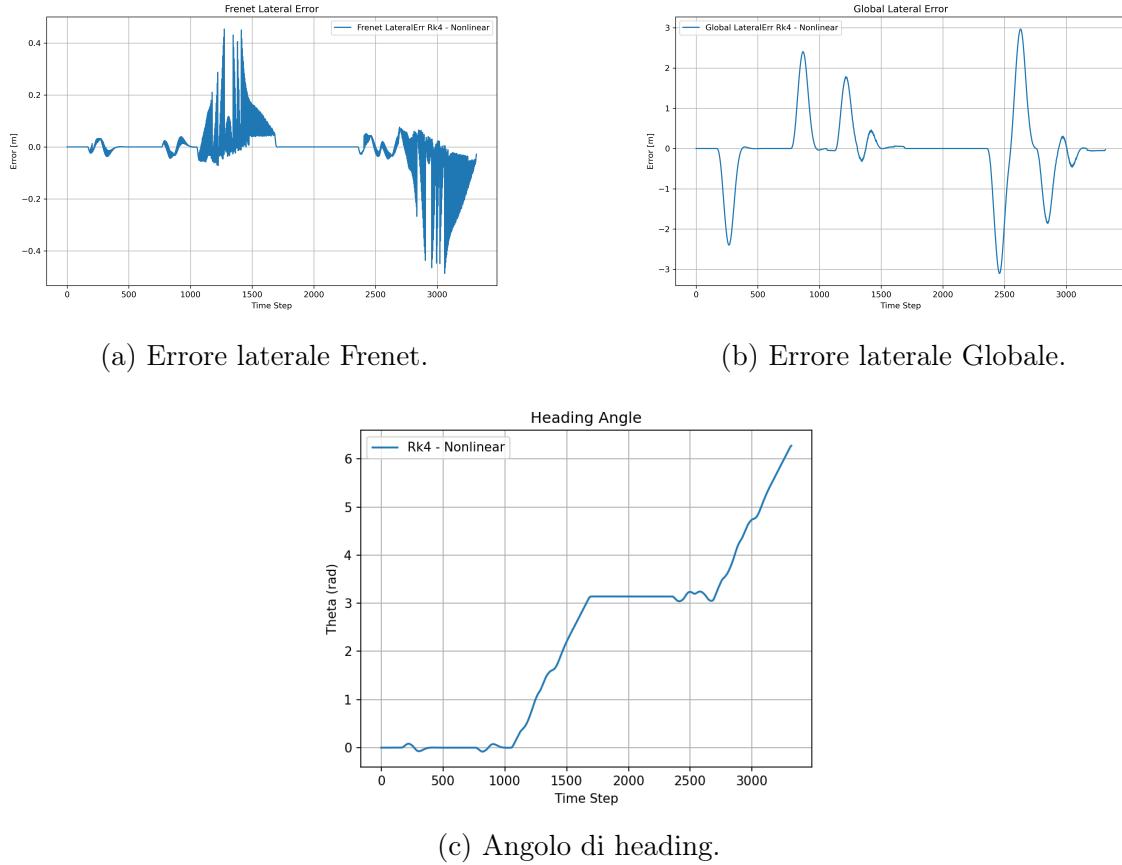


Figura 2: Errori laterali Frenet/Globale e heading a 10 m/s.

La Figura 2 mostra un errore laterale Frenet limitato (entro 0.5–0.7 m), mentre quello globale presenta picchi più ampi a causa di deviazioni per evitare ostacoli. L’angolo di heading varia come atteso in curva e risulta pressoché costante in rettilineo.

2.2.3 Velocità, Accelerazione e Sterzata

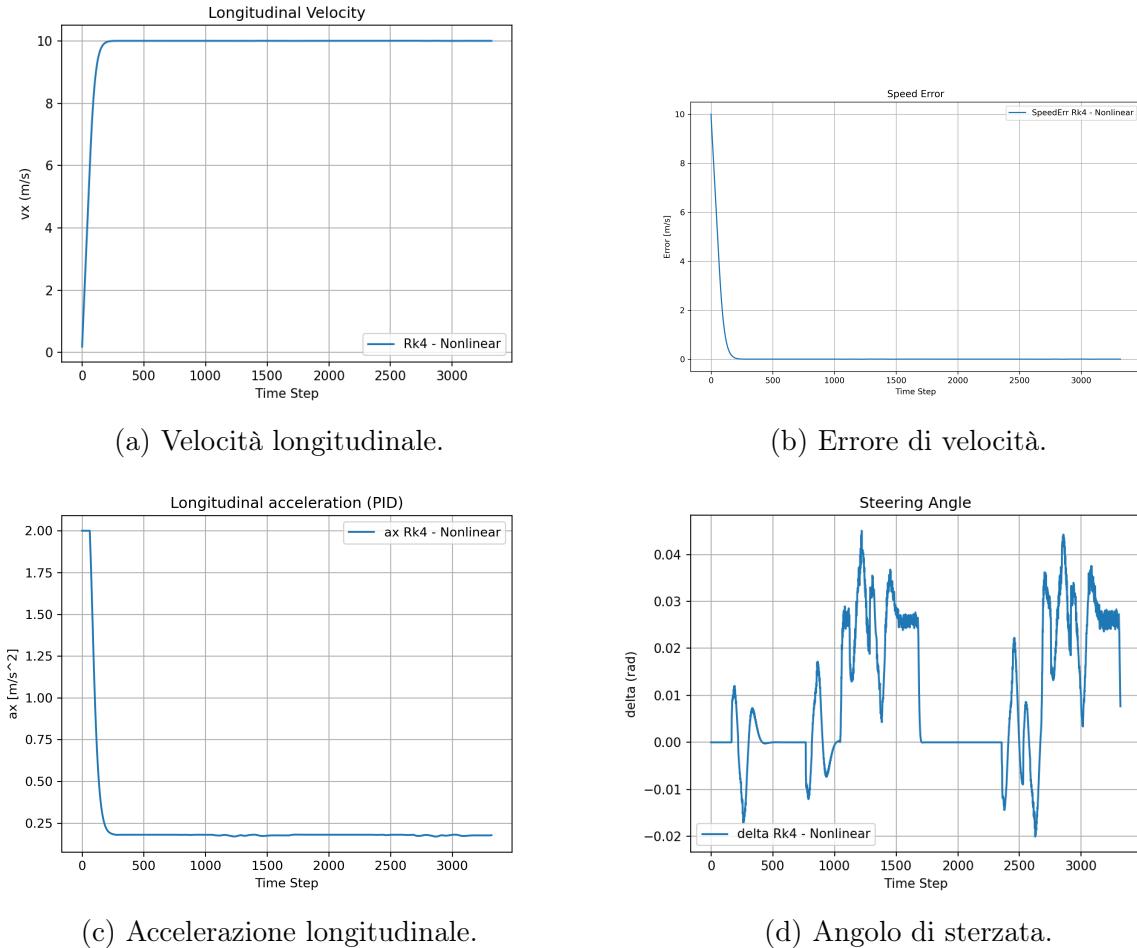


Figura 3: Parametri longitudinali e sterzata a 10 m/s.

In Figura 3, il PID longitudinale raggiunge 10 m/s in circa 250 step, con errore prossimo allo zero una volta stabilizzato. L'angolo di sterzata oscilla tra valori positivi e negativi, coerentemente con le manovre di evitamento.

2.2.4 Velocità laterale e angoli di slittamento

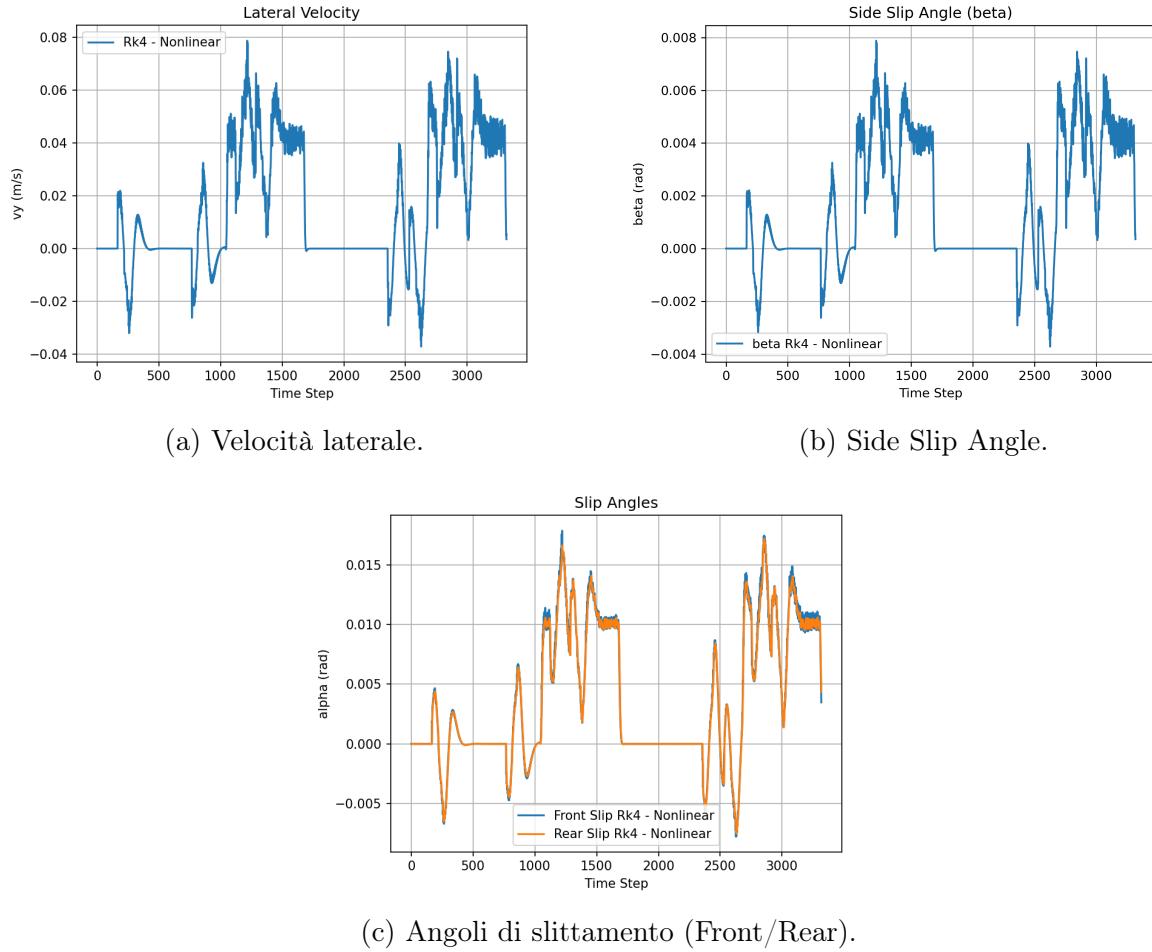


Figura 4: Dinamiche laterali e slittamento a 10 m/s.

La Figura 4 riporta valori di velocità laterale e slip angles generalmente bassi, con picchi modesti durante sterzate più marcate. Il sistema risulta stabile a 10 m/s.

2.2.5 Osservazioni per 10 m/s

In sintesi, l'errore laterale Frenet si attesta sotto 0.5 m, mentre la velocità desiderata viene raggiunta rapidamente (entro 250 step) e mantenuta con scostamenti minimi. Gli angoli di slittamento e la velocità laterale risultano contenuti, indicando un buon controllo nel dominio 10 m/s.

2.3 Risultati a 15 m/s

La medesima configurazione di planner e controllori viene testata a 15 m/s.

2.3.1 Traiettoria 2D, Heading e Errori laterali

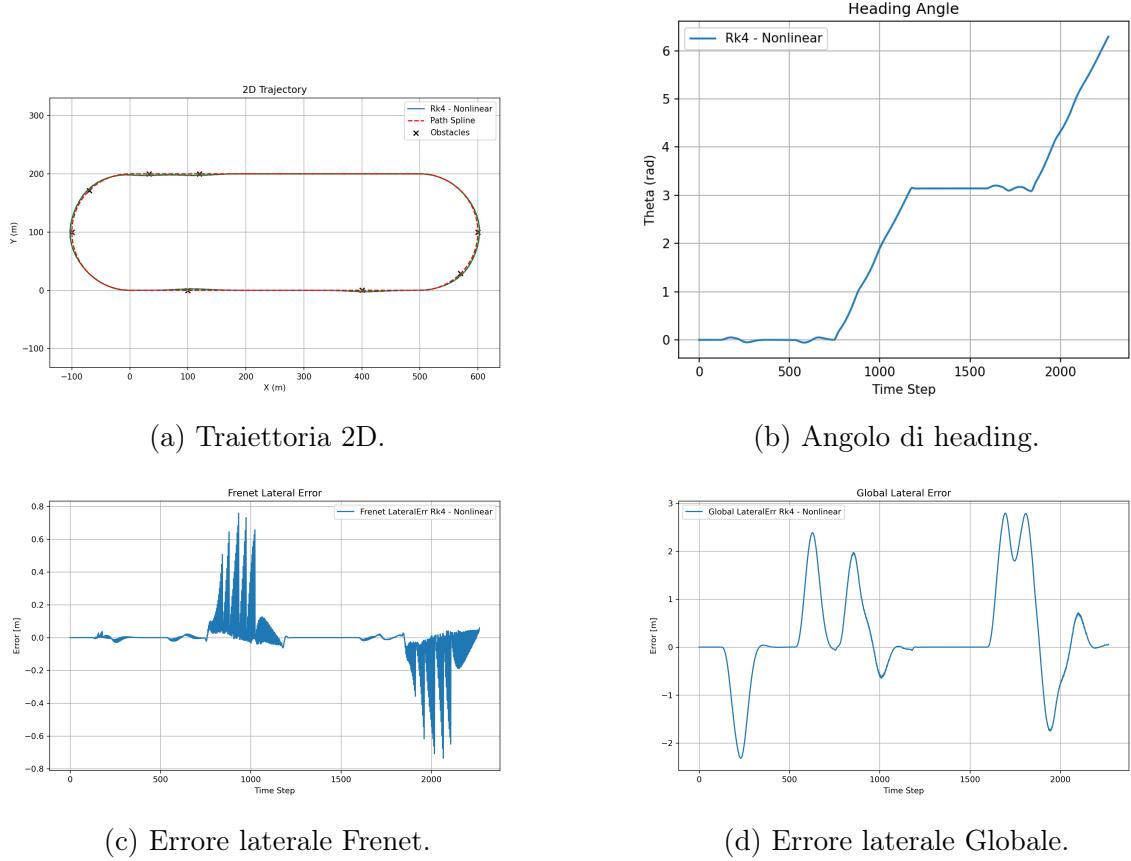


Figura 5: Traiettoria 2D, heading ed errori laterali a 15 m/s.

Dalla Figura 5, l'errore Frenet raggiunge picchi di 0.8 m in curve strette o manovre di schivata. Il Global Lateral Error presenta oscillazioni maggiori, riflettendo le scelte del planner Frenet.

2.3.2 Velocità, Accelerazione e Sterzata

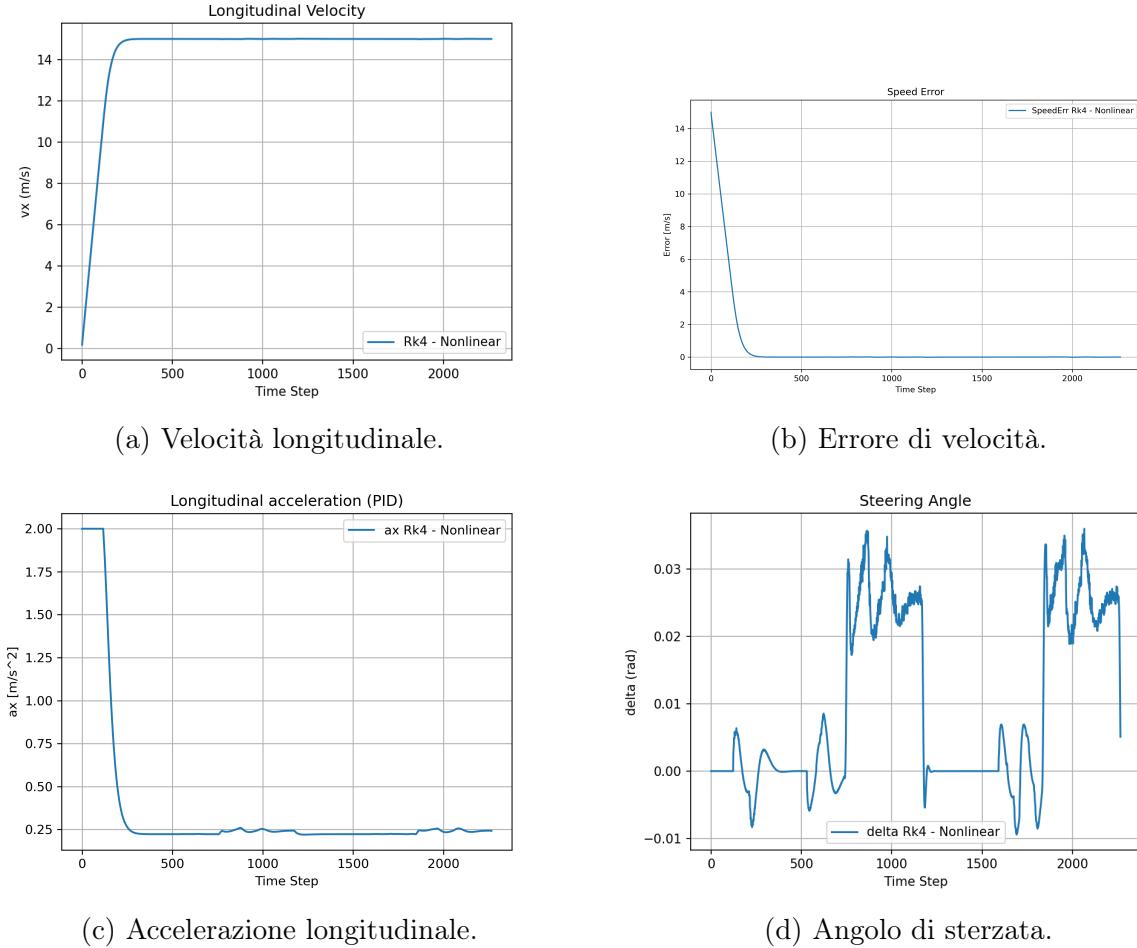


Figura 6: Comportamento longitudinale e sterzata a 15 m/s.

La Figura 6 evidenzia che il PID longitudinale porta il veicolo a 15 m/s in tempi simili rispetto a 10 m/s, ma con accelerazioni leggermente più pronunciate. L'angolo di sterzata (d) raggiunge valori più alti in curva, dovuti all'aumento della forza centrifuga.

2.3.3 Velocità laterale e slittamenti a 15 m/s

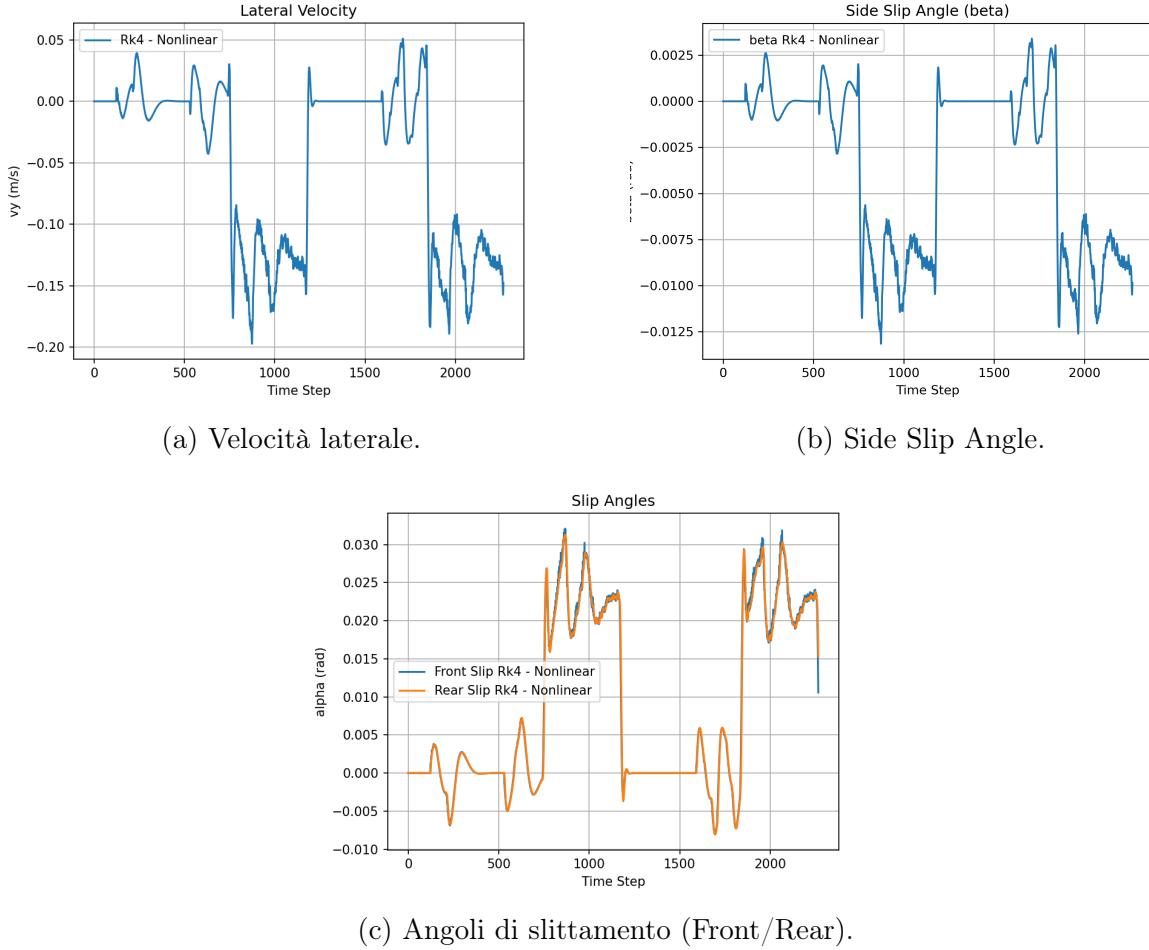


Figura 7: Dinamiche laterali e slittamento a 15 m/s.

La Figura 7 mostra valori di velocità laterale più elevati, inclusi passaggi negativi durante sterzate brusche. Gli angoli di slittamento toccano $\pm 0.01\text{--}0.03$ rad, mantenendosi comunque entro limiti moderati.

2.4 Conclusioni per Esercizio 1

- **10 m/s:** errore laterale Frenet < 0.7 m, slittamento contenuto, velocità target raggiunta in circa 250 step.
- **15 m/s:** errori laterali e slip angles maggiori, soprattutto in curva; si raggiungono picchi fino a 1 m di errore Frenet, restando comunque in un regime di guida stabile.

Il *Frenet-based planner*, abbinato a *Pure Pursuit* e PID longitudinale, funziona adeguatamente fino a 15 m/s, pur necessitando di tuning più fine alle velocità crescenti.

3 Esercizio 2: 20 m/s, 25 m/s e oltre

3.1 Parametri e Setup

Si impiega lo stesso modello Single Track e lo stesso Frenet Planner dell’Esercizio 1, ma con velocità target di 20 m/s e 25 m/s, confrontando **Stanley**, **Pure Pursuit** e **MPC** come controllori laterali (PID invariato in longitudinale).

3.2 Risultati a 20 m/s

3.2.1 Errore Laterale Frenet

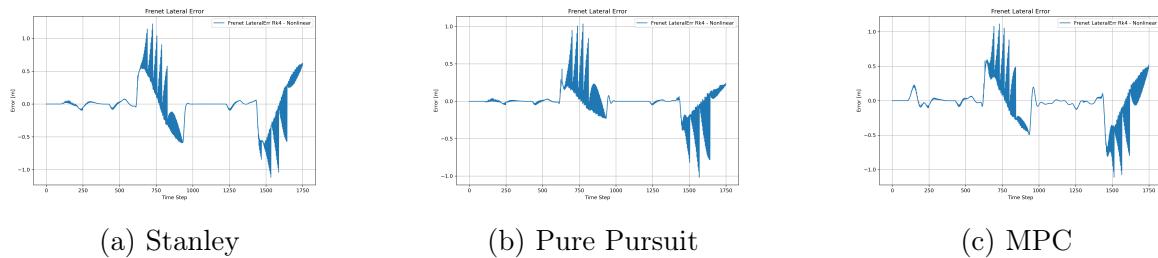


Figura 8: Errore laterale Frenet a 20 m/s: (a) Stanley, (b) Pure Pursuit, (c) MPC.

In Figura 8, **Stanley** (a) mostra oscillazioni frequenti, **PP** (b) inizialmente più “smooth” ma con picchi elevati in curva, **MPC** (c) compie correzioni “spot” (spike). L’aumento di velocità intensifica la forza centrifuga, rendendo più sfidante mantenere l’errore laterale basso.

3.2.2 Velocità e Sterzata

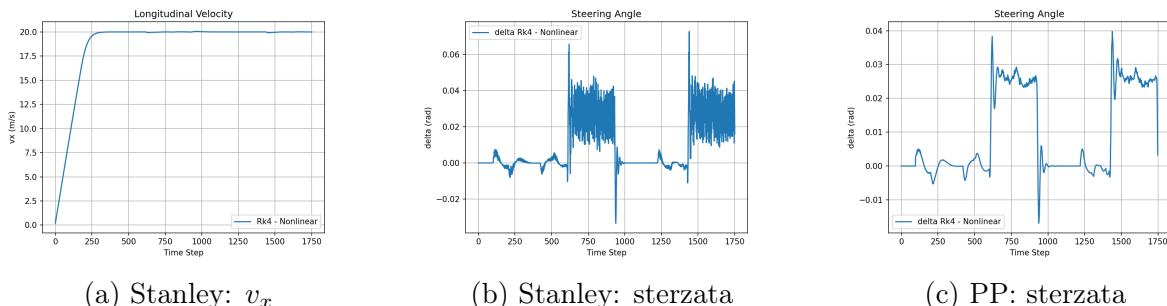


Figura 9: Esempio di velocità e sterzata a 20 m/s: Stanley e PP.

La Figura 9 evidenzia come **Stanley** raggiunga 20 m/s con leggere oscillazioni dovute alle sterzate aggressive (b), mentre **Pure Pursuit** (c) mostra un profilo di sterzata più graduale ma meno reattivo ai cambi di curvatura.

3.2.3 Velocità Laterale (20 m/s)

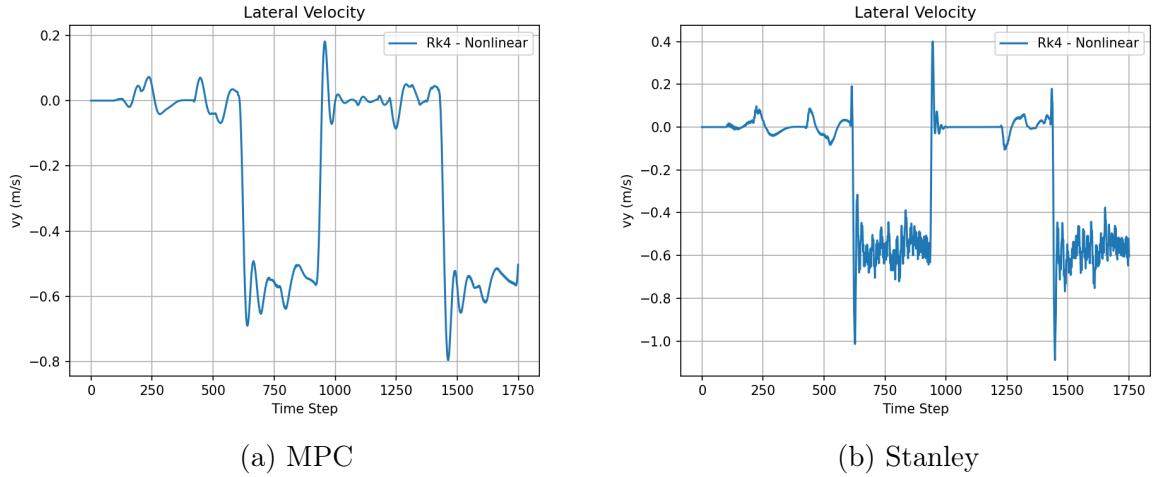


Figura 10: Velocità laterale a 20 m/s

In Figura 10a, **MPC** raggiunge ± 0.8 m/s nelle fasi di curva o manovra di evitamento, mentre **Stanley** supera ± 1.0 m/s (Figura 10b), legato alla sua natura molto reattiva.

3.3 Risultati a 25 m/s

3.3.1 Errore Laterale Frenet

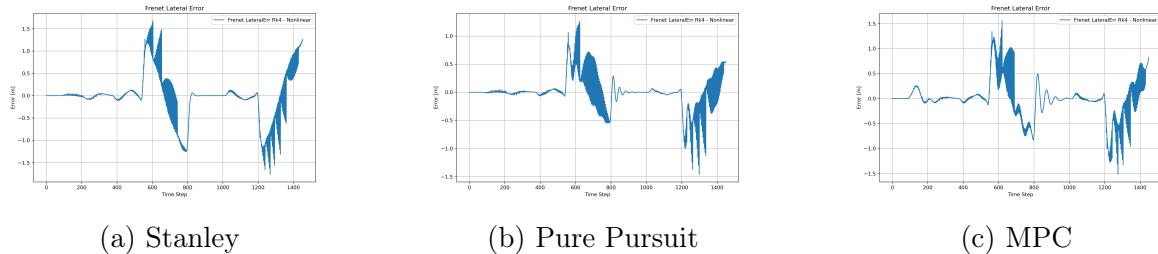


Figura 11: Errore laterale Frenet a 25 m/s: (a) Stanley, (b) Pure Pursuit, (c) MPC.

La Figura 11 mostra picchi di errore superiori a 1.5 m per **Stanley** (a), mentre **PP** (b) è più “morbido” ma soffre comunque in curva, e **MPC** (c) introduce correzioni rapide.

3.3.2 Velocità Longitudinale

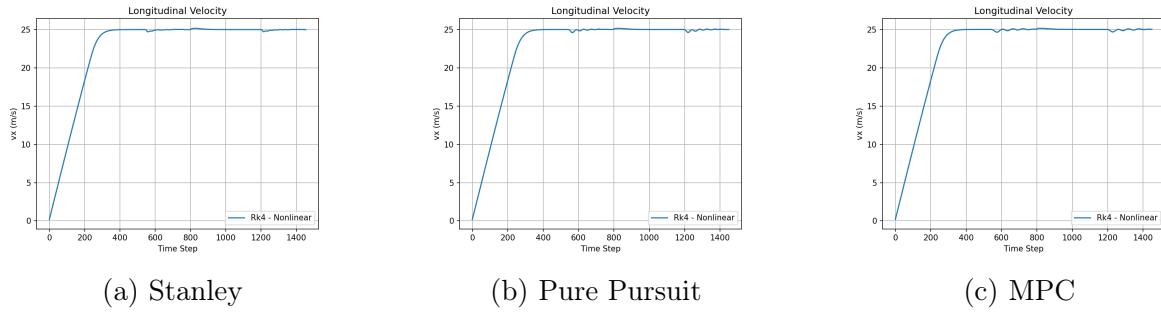


Figura 12: Velocità longitudinale a 25 m/s: Stanley, PP, MPC.

Tutti raggiungono i 25 m/s con andamenti simili, introducendo leggere perturbazioni durante sterzate brusche.

3.3.3 Sterzata (Steering Angle) a 25 m/s

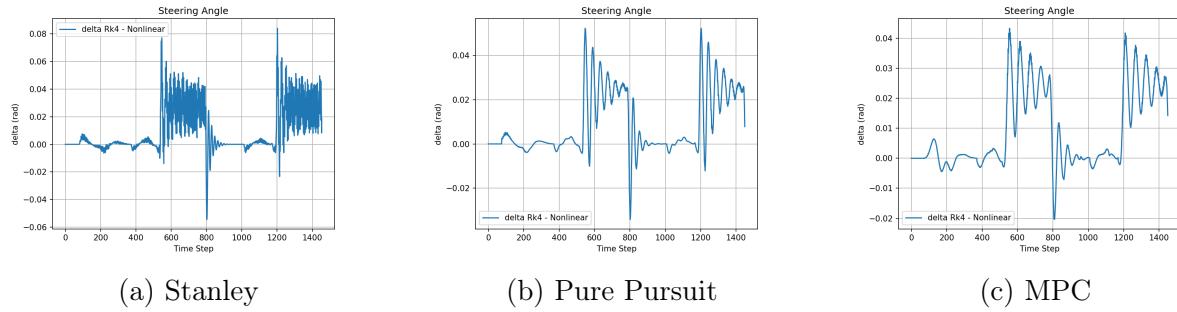


Figura 13: Angolo di sterzata a 25 m/s: Stanley, PP, MPC.

Stanley raggiunge picchi di 0.06–0.08 rad con frequenti oscillazioni, PP si mantiene su 0.03–0.04 rad, MPC oscilla tra 0.01 e 0.04 rad, con correzioni localizzate.

3.3.4 Velocità Laterale (25 m/s)

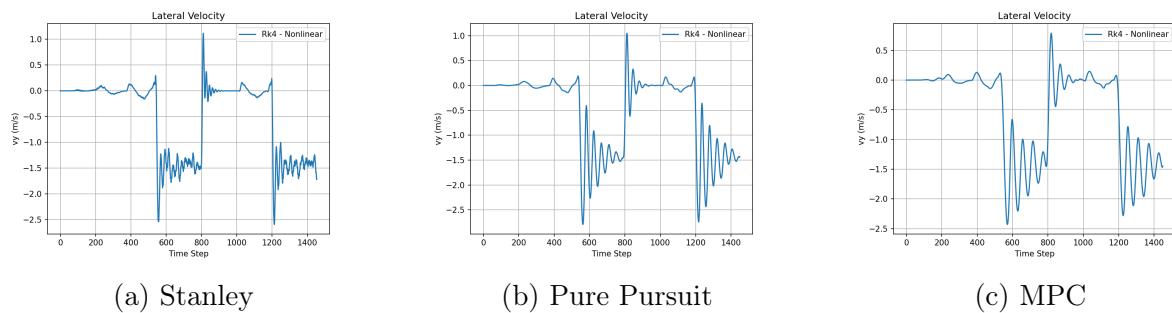


Figura 14: Velocità laterale a 25 m/s: Stanley, PP, MPC.

Stanley mostra picchi fino a ± 1.2 m/s e occasionali a -2.5 m/s, PP oscillazioni meno estreme ma recupero più lento, MPC valori intermedi con correzioni concentrate.

3.3.5 Slip Angles (25 m/s)

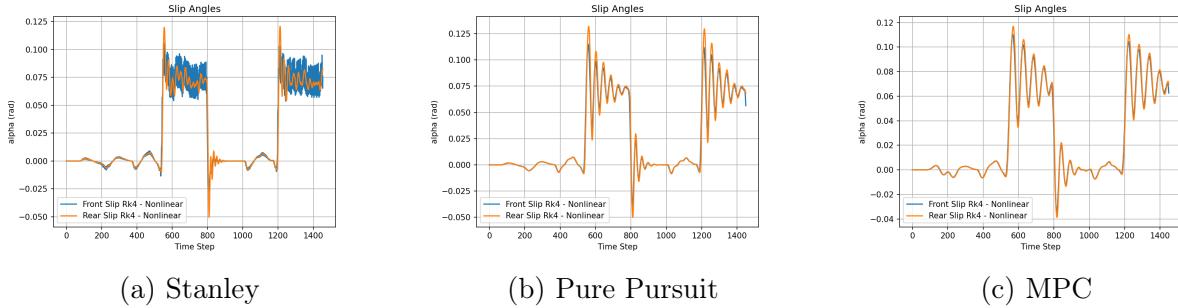


Figura 15: Slip Angles (Front/Rear) a 25 m/s: Stanley, PP, MPC.

Tutti e tre i controllori raggiungono un angolo di slittamento frontale intorno a 0.12 rad. Tuttavia, si osserva una maggiore reattività nel controllore Stanley, il quale manifesta, come precedentemente evidenziato, correzioni notevolmente più frequenti e brusche, risultando in un incremento dello slittamento dell'avantreno.

3.4 Conclusioni Esercizio 2

L'aumento della velocità da 20 m/s a 25 m/s accresce l'errore laterale, le oscillazioni di sterzata e gli angoli di slittamento per tutti i controllori, seppure con stili diversi:

- **Stanley**: riduce l'errore rapidamente, ma introduce sterzate aggressive e slip angles elevati.
- **Pure Pursuit**: profilo più graduale, a scapito di errori maggiori in curva e slittamenti moderati.
- **MPC**: correzioni “spot” predittive che evitano oscillazioni prolungate, ma generano spike locali.

Tutti e tre completano il percorso pianificato, seppur con differenze in comfort, precisione e slittamento.

4 Conclusioni Generali

Nel complesso, il *Frenet-based planner* si dimostra efficace anche in presenza di ostacoli statici, permettendo la generazione di traiettorie praticabili a diverse gamme di velocità (10–25 m/s). Il controllo **Pure Pursuit** (Esercizio 1) assicura prestazioni ottimali fino a 15 m/s, mentre, a velocità più elevate (20–25 m/s), sono stati valutati anche **Stanley** e **MPC** (Esercizio 2). La diversa strategia di controllo determina che Stanley risulti più aggressivo, Pure Pursuit più graduale, e che MPC intervenga con correzioni localizzate. Tutti i controllori completano il percorso, bilanciando compromessi tra rapidità di correzione, oscillazioni e slittamenti.