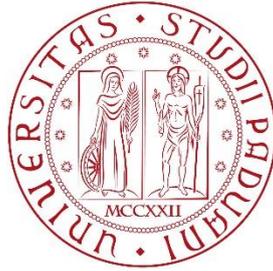


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica

Tesi di Laurea

Coordinamento di velocità di imbardata e
accelerazione laterale per un algoritmo di
Motion Cueing basato su MPC

Relatore: Prof. Ing. Alessandro Beghi

Correlatore: Ing. Mattia Bruschetta

Laureanda: Daniela Laurea Mendola

Anno Accademico 2016/2017

Indice

Introduzione	1
1 Il problema del Motion Cueing	5
1.1 Algoritmi di Motion Cueing	7
1.2 Model Predictive Control	10
1.2.1 Modello del processo	11
1.2.2 Modello disaccoppiato	16
1.2.3 Funzione di costo	17
1.3 Driver in Motion	18
1.4 Introduzione al problema di coordinamento	20
2 Cinematica della sterzata	23
2.1 Cinematica della sterzata	23
2.1.1 Modello matematico	23
2.1.2 Equazioni di congruenza	24
2.1.3 Accelerazione Laterale	26
2.2 Centro di istantanea rotazione	30
3 Asse di Imbardata dinamico	33
3.1 Rassegna Bibliografica	33
3.2 Percezioni di guida	34
3.3 Punto a velocità laterale nulla	36
3.3.1 Dinamica del PVN	37
4 Yaw Dynamics	41
4.1 Utilizzo del PVN in piattaforma	41
4.2 Dinamica del Side Slip in piattaforma	42
4.3 Confronto tra MCA	47
4.4 Confronto tra MCA in piattaforma	50

5	Taratura dei parametri in ambiente sperimentale	55
5.1	Configurazione parametri	55
5.2	Taratura su slalom	56
5.3	Taratura su pista	58
5.4	Analisi miglioramenti apportati	60
6	Conclusioni e sviluppi futuri	65
	Bibliografia	67

Introduzione

Oggi, nel settore automobilistico si è ampiamente diffuso l'utilizzo dei simulatori di guida che grazie alla loro versatilità vengono utilizzati in diversi ambiti, specialmente come supporto per la ricerca, e che consentono di ridurre notevolmente i costi in fase di sviluppo. Tra i settori maggiormente coinvolti vi sono quello dell'allenamento dei piloti, lo sviluppo di vetture o delle loro componenti, ma anche quello degli studi sul comportamento umano come ad esempio l'interazione tra il guidatore e i sistemi di sicurezza.

L'efficacia di tali dispositivi è legata alla capacità di riprodurre in modo fedele le sensazioni provate dal conducente in una condizione di guida reale, obiettivo non facile da perseguire a causa dei vincoli fisici della piattaforma utilizzata; infatti, lo spazio di lavoro disponibile è molto più piccolo rispetto a quello necessario per riprodurre totalmente il comportamento di una vettura su strada e tale limitazione diventa ancora più evidente nel caso della simulazione di veicoli da corsa.

Il problema è, quindi, quello di trasformare i dati relativi al veicolo simulato in una strategia di controllo del moto, detta Motion Cueing Algorithm (MCA), che sia in grado di generare dei riferimenti in posizione che siano appropriati per la piattaforma, che tengano conto dei limiti dell'area di lavoro e che allo stesso tempo forniscano al pilota informazioni relative al comportamento del veicolo che gli permettano di controllarlo anche durante le fasi di guida più critiche come, ad esempio, il sovrasterzo e il sottosterzo.

I segnali da riprodurre in piattaforma devono essere necessariamente adattati ai limiti fisici della stessa in fase di pre-scaling attraverso l'utilizzo di fattori di scala e filtri passa-alto che consentono di estrapolarne la componente a dinamica transitoria; va sottolineato che questa necessita di uno spazio ridotto per essere riprodotta e quindi è compatibile con i limiti dello spazio di lavoro. Gli spostamenti in curva riprodotti dalla piattaforma coinvolgono solo la fase iniziale della manovra a causa delle limitazioni di questi dispositivi e quindi il pilota può contare solo sul sistema grafico per ricevere le informazioni che riguardano le fasi successive, durante le quali la piattaforma viene riportata

al centro dell'area di lavoro in attesa della manovra seguente.

Per far sì che l'esperienza di guida sia il più verosimile possibile bisogna progettare un MCA in grado di fornire al pilota delle informazioni sull'*attitudine* del veicolo, cioè sul suo comportamento locale, che possano colmare l'impossibilità di riprodurre il moto totale nell'ambiente di simulazione.

Applicare un filtro passa-alto alla componente del segnale da riprodurre che descrive il comportamento globale del veicolo e a quella che ne descrive il comportamento locale porta a filtrare indiscriminatamente le informazioni relative allo stato di stabilità del veicolo stesso e la sua reazione agli input di sterzo, freno e acceleratore del pilota. Per ovviare a questo inconveniente in [16] viene presentato da Garrett et al. un MCA in cui l'angolo di *side slip*, ossia l'angolo che descrive l'attitudine alla rotazione del veicolo rispetto al sua traiettoria, viene utilizzato come riferimento per la rotazione attorno all'asse verticale. Dato che quest'ultimo, ad eccezione dei casi più estremi di perdita di controllo, non eccede i limiti della piattaforma, non c'è la necessità di applicare un filtro che causi la perdita di informazioni sull'attitudine del veicolo che sono necessarie al pilota durante l'esperienza di guida.

A sostegno di un MCA basato sull'angolo di *side slip* vi è la richiesta da parte di piloti professionisti di voler percepire il comportamento locale della vettura, in particolare di ottenere informazioni sulle variazioni dell'angolo di *side slip* (*sideslip rate*) preferendole a quelle fornite dalla velocità di imbardata.

Limebeer et al., in [17], utilizzano un approccio differente per ovviare il medesimo problema. Essi, infatti, effettuano un'analisi preliminare sul comportamento di una vettura da corsa in diverse condizioni di lavoro in modo da individuare quali delle sue variazioni di comportamento sono utili al pilota durante l'esperienza di guida. Ciò consente di progettare dei filtri, utilizzati per un MCA basato sul controllo ottimo che consentano di riprodurre le medesime variazioni durante la simulazione.

L'obiettivo che ci si pone con il seguente lavoro di tesi è quello di sviluppare un MCA basato su Model Predictive Control (MPC) per un simulatore di guida automobilistico che sia in grado di fornire al pilota le informazioni sullo stato di aderenza degli pneumatici, cioè sul comportamento locale del veicolo, durante la manovra di curva per dargli la possibilità di provare un'esperienza di guida che si avvicini a quella reale. Con l'utilizzo dell'attuale MCA, infatti, i piloti lamentano il fatto che la percezione di perdita del controllo della vettura non sempre venga restituita in modo chiaro. Partendo dalla descrizione delle sensazioni provate dai piloti durante l'esperienza di guida reale, ci si è posti l'obiettivo di ricrearle in piattaforma attraverso una rotazione attorno ad un asse di imbardata mobile in grado di riprodurre il

comportamento transitorio del veicolo durante la manovra.

Al fine di ottenere ciò è stato individuato come asse di rotazione un punto a velocità laterale nulla che si muove lungo l'asse longitudinale del veicolo e che consente di riprodurre l'accelerazione laterale diretta, cioè la componente dell'accelerazione laterale che contiene informazioni sulla variazione del comportamento degli pneumatici in fase di manovra.

Una rotazione in piattaforma attorno a questo asse con una velocità di imbardata filtrata in fase di pre-scaling però non permette di riprodurre l'accelerazione desiderata; per ovviare al problema si è deciso di replicare l'effetto di questa rotazione attraverso la combinazione di una traslazione laterale e una rotazione. In particolare, lo spostamento laterale sarà tale da riprodurre l'accelerazione laterale diretta e sarà combinato ad una rotazione con velocità angolare pari al *side slip rate*. Ciò consente di replicare il comportamento locale del veicolo senza perdita di informazioni, poiché gli spostamenti richiesti per la riproduzione di tali segnali non eccedono i limiti dello spazio di lavoro.

Con l'obiettivo di dare al pilota un'informazione transitoria completa si è deciso di riprodurre in combinazione a quanto sopra la componente in alta frequenza che descrive il comportamento globale del veicolo.

Dopo una prima fase di studio della problematica si è ottenuta una configurazione che potesse essere testata in ambiente virtuale e grazie al contributo di piloti esperti che hanno effettuato dei test sperimentali sul simulatore è stato possibile valutare l'efficacia della strategia proposta, specialmente per quanto riguarda l'informazione in bassa frequenza che è stata aggiunta. I piloti hanno affermato di sentire uno spostamento della piattaforma più naturale e concorde al comportamento reale del veicolo che consente di percepirne la perdita di stabilità più velocemente e di avere dei tempi di reazione più rapidi che permettono di gestire i casi di perdita di aderenza degli pneumatici. Tale strategia, inoltre, può essere adattata velocemente al tipo di vettura senza la necessità di uno studio approfondito sulla sua dinamica, contrariamente a quanto presentato da Limebeer et al., ciò consente di effettuare variazioni sui parametri della vettura senza doversi preoccupare di una ricalibrazione della strategia.

Capitolo 1

Il problema del Motion Cueing

Come già anticipato, i simulatori di guida sono strumenti ampiamente utilizzati nell'industria automobilistica poiché consentono di effettuare test in un ambiente controllato e allo stesso tempo realistico evitando di esporre il pilota a situazioni pericolose. Grazie all'alta fedeltà del modello matematico della vettura è possibile anticiparne il comportamento su strada e quindi ridurre i costi di prototipazione; un altro importante vantaggio è dato dalla possibilità di testare al simulatore diverse configurazioni della vettura, valutarne l'efficacia e restringere il set da provare su pista.

La validità di questi dispositivi è data dalla loro capacità di riprodurre in un ambiente virtuale le sensazioni provate dal pilota durante l'esperienza di guida reale in modo molto preciso. Chiaramente, l'obiettivo prefissato non è di facile raggiungimento a causa della complessa natura del sistema percettivo umano che coinvolge differenti organi e dal fatto che non sia ancora chiaro, da un punto di vista fisiologico, quale siano il ruolo e la priorità degli stimoli di diversa natura nella percezione totale di accelerazioni e forze. La percezione del moto si ottiene grazie alla combinazione di stimoli sensitivi quali: uditivi, visivi e tattili. Al fine di consentire al pilota di vivere un'esperienza di guida il più fedele possibile è necessario fornirgli informazioni ottiche, acustiche, tattili e di movimento. Un simulatore dinamico in grado di fornire tali dati viene classificato come "*high-level driving simulator*" ed è generalmente composto da:

- sistemi avanzati di audio e video, in cui lo schermo copre una visuale di almeno 180°,
- un abitacolo realistico che comprende un sistema di sterzo e frenata in grado di restituire feedback al pilota e un sedile attivo che supporti la percezione del moto,

- una piattaforma mobile in grado di effettuare movimenti lungo tutti i 6 gradi di libertà.

Sono stati effettuati diversi studi che hanno l'obiettivo di capire come i vari stimoli degli organi percettivi consentano di ottenere una percezione del moto realistica. Tra questi, ad esempio, quello effettuato per valutare l'importanza della presenza di un sistema audio che mostra come il suono del motore aiuti a mantenere una velocità costante e evidenzia che in un simulatore di guida dinamico sia necessaria la presenza di vari sistemi di supporto per la percezione del moto. Un altro studio, di particolare interesse per l'argomento trattato, è quello di Newton et al.[1] fatto utilizzando il simulatore di Loughborough; gli autori hanno mostrato come, durante la simulazione, il movimento della piattaforma sia il fattore che influenzi maggiormente la percezione umana dello stato della vettura. In un altro studio svolto da Siegler et al.[2] è stato valutato il contributo sul senso cinestetico del pilota dato dalla piattaforma durante la frenata e la manovra di curva. I risultati mostrano che, grazie al movimento, i soggetti partecipanti al test sono stati in grado di effettuare la frenata in modo meno intenso e più realistico rispetto a quanto mostrato sul simulatore statico e sono stati in grado di controllare meglio la traiettoria durante la manovra di curva.

Per assicurare una simulazione realistica è fondamentale che le strategie di controllo del moto, dette *Motion Cueing Algorithms* (MCA), siano in grado di generare dei riferimenti del segnale di accelerazione in grado di riprodurre le sensazioni di guida provate durante un'esperienza reale in un ambiente virtuale e che allo stesso tempo tengano conto dei limiti fisici della piattaforma e degli attuatori in modo da evitare discontinuità nel movimento che possono danneggiare la piattaforma stessa.

È importante ricordare che lo spazio di lavoro di un simulatore dinamico è molto più piccolo rispetto a quello necessario per riprodurre completamente il moto di un veicolo durante la maggior parte delle manovre, soprattutto nel caso di veicoli da corsa. I segnali di accelerazione lineare e velocità angolare del veicolo devono necessariamente essere filtrati e/o scalati per ottenere un riferimento in posizione che rientri nei limiti dello spazio di lavoro e di banda, di conseguenza solo una parte dei movimenti della vettura può essere riprodotta attraverso il moto. Grazie alla necessità di spostamenti più ridotti viene tipicamente riprodotto solo il segnale in alta frequenza, di conseguenza la piattaforma si muove solo durante la fase iniziale della manovra ed in seguito il sistema visivo diventa la fonte di informazioni dominante.

In questo capitolo verrà fatta una panoramica delle strategie di Motion Cueing maggiormente utilizzate nel campo dei simulatori di guida, para-

fo 1.1, focalizzandosi successivamente sul MCA basato sul Model Predictive Control, paragrafo 1.2, sul quale verrà basata la strategia di coordinamento della velocità di imbardata e accelerazione laterale obiettivo del lavoro di tesi. Mentre nei paragrafi 1.3 e 1.4 verranno introdotti la piattaforma utilizzata e le problematiche del MCA che si vogliono migliorare con il seguente lavoro.

1.1 Algoritmi di Motion Cueing

L'obiettivo degli algoritmi di Motion Cueing è quello di:

- generare appropriati riferimenti di posizione per la piattaforma per riprodurre le accelerazioni lineari e le velocità angolari volute;
- gestire l'area di lavoro in modo da mantenere il moto entro i limiti operativi (*washout action*).

Vi sono diversi approcci per la progettazione degli MCA, molti di questi sono basati su una sequenza di filtri passivi combinati tra di loro, in accordo con quanto segue:

- le accelerazioni lineari e le velocità angolari, ottenute dal modello dinamico del veicolo, vengono filtrate attraverso l'uso di un filtro passa-alto per mantenere solo le dinamiche veloci;
- il segnale in bassa frequenza relativo alle accelerazioni lineari, ottenuto utilizzando un filtro passa-basso, viene utilizzato per inclinare l'abitacolo; questo metodo è chiamato *tilt coordination* e consente di ingannare il sistema percettivo umano, grazie al supporto del sistema grafico, facendo affidamento sull'interpretazione sbagliata da parte del sistema vestibolare della componente longitudinale e di quella laterale dell'accelerazione di gravità che vengono percepite come accelerazioni dovute ad una traslazione;
- ai segnali di posizione, ottenuti integrando quelli filtrati, viene applicato un filtro passa-alto in modo da mantenere la piattaforma attorno ad una posizione neutra (*washout action*).

In figura 1.1 è stato riportato uno schema del MCA di cui sopra, chiamato *approccio classico*, proposto da Conrad e Schmidt [3] nei primi anni '70. Utilizzando un filtro lineare per rimuovere la componente in bassa frequenza dei segnali di accelerazione e velocità si possono ottenere quelli che sono

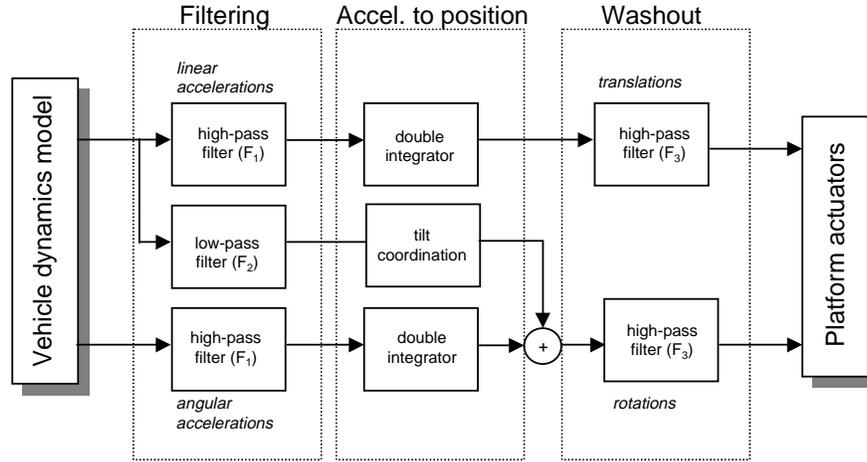


Figura 1.1: Schema del Motion Cueing Classico

definiti *false cues*, effetti tipici del filtraggio in alta frequenza in cui viene generato un segnale a media nulla. In particolare, si tratta di un'accelerazione in direzione opposta rispetto a quanto aspettato dal pilota che essendo un movimento non naturale risulta particolarmente fastidioso e può provocare nausea (cinetosi o *motion sickness*). La soluzione a questo problema viene proposta da Reymond et al. [4] che applicano un filtro *anti-backlash* al segnale di riferimento.

Nell'*approccio classico* vengono utilizzati dei filtri lineari, in cui la scelta dei parametri (cioè guadagno, ordine e costanti di tempo) è data da un trade-off tra le caratteristiche del moto della piattaforma e la dinamica del veicolo, in base all'applicazione o al task considerato. Pur essendo vantaggioso dal punto di vista dell'implementazione, l'approccio mostra dei limiti relativi alla taratura dei parametri che risulta generalmente difficile poiché non sempre è possibile dare un'interpretazione fisica a parte di essi e anche i più piccoli cambiamenti possono avere un impatto inaspettato su quanto percepito del pilota. Inoltre, la taratura viene solitamente effettuata considerando il caso peggiore in modo da non generare spostamenti irrealizzabili a causa della saturazione degli attuatori, ciò vuol dire che in buona parte delle manovre si avranno spostamenti contenuti e quindi non verrà sfruttata al meglio l'area di lavoro.

Quando la piattaforma si trova al limite dello spazio di lavoro, l'algoritmo può generare due soluzioni possibili:

- 1) riprodurre solo le velocità angolari, aspettando un'accelerazione lineare che consenta di riportare la piattaforma alla posizione neutra;
- 2) spostare lentamente la piattaforma effettuando un movimento non concorde con quello naturale che, essendo in disaccordo con il moto visualizzato sullo schermo, può provocare cinetosi.

Questo è dovuto all'impossibilità dell'algoritmo di gestire esplicitamente tutti i vincoli sui movimenti della piattaforma.

Al fine di ovviare ai limiti dell'*algoritmo classico* è stato sviluppato da Parrish e Dieudonne [5] un MCA in cui vengono utilizzati dei filtri passa-alto di tipo adattativo i cui parametri vengono modificati ad ogni passo in modo da minimizzare la funzione di costo quadratica

$$V_k = (r_k - a_k)^2 + w_1 v_k^2 + w_2 p_k^2, \quad (1.1)$$

con

- $(r_k - a_k)^2$: errore quadratico tra l'accelerazione di riferimento r_k e quella della piattaforma a_k ;
- v_k : velocità della piattaforma;
- p_k : posizione della piattaforma;
- w_1 e w_2 : pesi dei termini di velocità e spostamento.

Questi ultimi vengono scelti in base alla sensibilità del pilota e al tracciato utilizzato cercando di mantenere un buon compromesso tra la gestione dello spazio di lavoro e un'esperienza di guida il più realistica possibile. Il vantaggio di questo approccio è dato dalla possibilità di sfruttare maggiormente lo spazio di lavoro, tuttavia il problema della taratura si complica ulteriormente in quanto è necessario tarare anche i pesi della funzione di costo.

Con l'obiettivo di migliorare quanto percepito dal pilota durante la simulazione lo sviluppo dei MCA si è allontanato dal filtraggio semplice andando verso approcci basati sul controllo ottimo, come quello proposto da Sivan e Ish Shalom in [6] in cui viene utilizzato un regolatore lineare quadratico (LQR). Lo scopo di questo tipo di approccio è quello di minimizzare la differenza tra le accelerazioni percepite, calcolate attraverso l'utilizzo del modello del sistema vestibolare, sul veicolo reale e sul simulatore. Come per gli algoritmi precedenti, anche in questo caso il segnale in bassa frequenza viene riprodotto attraverso la *tilt coordination*, il cui effetto è incluso nel modello

del sistema vestibolare utilizzato. Il controllore lineare quadratico è progettato in modo da calcolare l'ingresso che consenta di rendere minimo l'indice di costo

$$V[u(t)] = \int_0^{\infty} [(\hat{r}(t) - \hat{a}(t))^2 + w_1 v^2(t) + w_2 p^2(t)] dt, \quad (1.2)$$

relativo al seguente modello di stato

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad \text{con} \quad x = [p \ v \ a \ \hat{a}]^T, \quad (1.3)$$

dove il sistema (A,B) rappresenta il modello del sistema vestibolare del pilota, \hat{r} e \hat{a} sono rispettivamente l'accelerazione percepita sul veicolo e quella percepita sul simulatore e $u(t)$ è l'ingresso di controllo del sistema.

In questo caso la più facile interpretazione dei parametri consente di ridurre il problema di taratura, tuttavia per poter determinare l'ingresso ottimo è necessario conoscere il riferimento $\hat{r}(t)$ relativo all'intera sessione di guida.

1.2 Model Predictive Control

È stato sviluppato un MCA basato sulla tecnica di controllo conosciuta come *model predictive control* (MPC), tecnica già consolidata nell'ambito del controllo industriale, che ha l'obiettivo di massimizzare l'utilizzo dell'area di lavoro e di gestire attraverso il sistema di controllo i limiti degli attuatori usati per la movimentazione del simulatore.

L'utilizzo di un modello dinamico del processo da controllare combinato alla tecnica del controllo ottimo permette di tenere esplicitamente conto dei vincoli del sistema, cioè i limiti fisici sia degli attuatori della piattaforma sia degli organi percettivi del pilota. Infatti, la possibilità di integrare al modello dinamico quello degli organi percettivi del moto, in particolare del sistema vestibolare, consente di tener conto, durante la fase di generazione degli spostamenti, degli effetti che essi hanno sul sistema percettivo del pilota.

Tra le caratteristiche che rendono vantaggioso l'utilizzo del MPC si reputa importante sottolineare che:

- è semplice e intuitivo comprendere l'idea alla base di questa tecnica di controllo;
- è l'unica tecnica di controllo che consente di gestire in modo efficace i vincoli del sistema;

- si adatta a problemi SISO come a quelli MIMO senza un incremento di complessità del problema;
- è in grado di gestire non linearità sia di modello che relative ai vincoli.

Uno degli svantaggi maggiori associati al suo utilizzo per la progettazione del MCA è dato dall'elevato costo computazionale, in particolare quando vi è la necessità di ridurre la latenza totale tra le azioni del pilota e il movimento del simulatore.

È possibile schematizzare questo tipo di MCA come di seguito (fig. 1.2):

- 1) le accelerazioni lineari e le velocità angolari del veicolo (a, v) vengono calcolate dal kernel di simulazione;
- 2) viene eseguito un pre-processing dei segnali (a, v) , in base alle performance richieste, in modo da ottenere (a_r, v_r) ;
- 3) vengono calcolate le accelerazioni e velocità percepite (\hat{a}_r, \hat{v}_r) corrispondenti a (a_r, v_r) utilizzando il modello del sistema vestibolare;
- 4) vengono calcolati gli spostamenti della piattaforma d in modo da inseguire i riferimenti (\hat{a}_r, \hat{v}_r) e vengono inviati come input al sistema di controllo della piattaforma.

Per la progettazione di questo algoritmo di controllo è necessario specificare tre elementi fondamentali: il modello del processo, la funzione di costo e vincoli e l'algoritmo di ottimizzazione.

1.2.1 Modello del processo

La disponibilità del modello del sistema percettivo gioca un ruolo chiave nella progettazione del MCA, il cui obiettivo è, come già detto, quello di riprodurre al meglio le sensazioni di guida del pilota. Negli esseri umani, accelerazioni lineari e rotazioni vengono percepite attraverso il sistema vestibolare, collocato all'interno dell'orecchio, che agisce in modo coordinato con la vista. Questo è composto dai canali semicircolari, organi responsabili della percezione delle velocità angolari a cui il corpo è soggetto lungo le tre direzioni canoniche (ψ imbardata attorno all'asse verticale z , θ beccheggio attorno all'asse laterale y , ϕ rollio attorno all'asse longitudinale x), e le macule, organi responsabili della percezione del moto lineare.

Sebbene il problema relativo alla modellazione del sistema vestibolare sia stato affrontato a partire dagli anni '70 [7], solo di recente è stato possibile

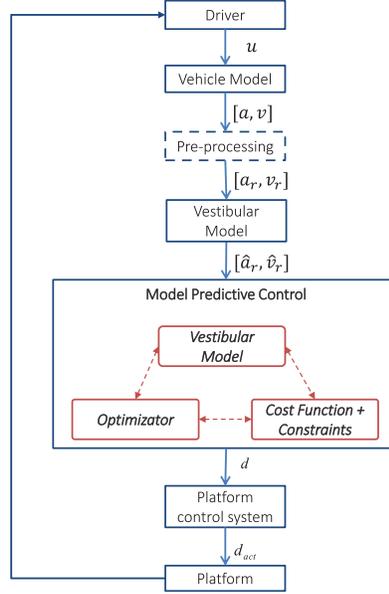


Figura 1.2: Schema generale di un algoritmo di motion cueing basato sul MPC [12]

sviluppare un modello lineare affidabile [8, 9], che verrà utilizzato nel problema in esame. Per quanto riguarda le macule, la funzione di trasferimento che mette in relazione le accelerazioni percepite e le relative accelerazioni subite è

$$W_{O_i}(s) = \frac{\hat{a}_i(s)}{a_i(s)} = K_O \frac{1 + s\tau_L}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)} \quad (1.4)$$

dove $i=x,y,z$ indica le tre direzioni canoniche.

Dovendo inserire il modello all'interno dell'algoritmo del MPC, è necessario passare ad una rappresentazione in modello di stato

$$\Sigma_{O_i} = \{A_{O_i}, B_{O_i}, C_{O_i}, D_{O_i}\} \quad i = x, y, z, \quad (1.5)$$

ciò consente di ottenere un modello percettivo delle accelerazioni lineari completo composto dalle matrici:

$$A_O = \text{blkdiag}\{A_{O_x}, A_{O_y}, A_{O_z}\} \quad (1.6a)$$

$$B_O = \text{blkdiag}\{B_{O_x}, B_{O_y}, B_{O_z}\} \quad (1.6b)$$

$$C_O = \text{blkdiag}\{C_{O_x}, C_{O_y}, C_{O_z}\} \quad (1.6c)$$

$$D_O = \text{blkdiag}\{D_{O_x}, D_{O_y}, D_{O_z}\} \quad (1.6d)$$

dove gli input sono le accelerazioni del veicolo

$$u_O = [a_x \ a_y \ a_z]^T \quad (1.7)$$

e gli output sono le accelerazioni percepite

$$y_O = [\hat{a}_x \ \hat{a}_y \ \hat{a}_z]^T. \quad (1.8)$$

Le accelerazioni percepite sono espresse utilizzando un sistema di riferimento cartesiano con origine sulla testa del pilota (*eye-point*), cioè posizionato sul sistema percettivo. Tale sistema di riferimento è traslato rispetto a quello solidale al moto del veicolo, che ha origine nel baricentro di quest'ultimo, e si muove con esso. Per evitare ulteriori calcoli per il cambiamento di sistema di riferimento, le accelerazioni del veicolo (eq. 1.7) sono espresse sul riferimento cartesiano posizionato sulla testa del pilota grazie alla possibilità di definire sul kernel di simulazione un "sensore virtuale" nella posizione desiderata sul veicolo simulato.

Analogamente, i canali semicircolari sono descritti dalla seguente funzione di trasferimento:

$$W_{S_i}(s) = \frac{\hat{w}_i(s)}{w_i(s)} = K_S \frac{\tau_a s^2}{(1 + s\tau_a)(1 + s\tau_b)}, \quad (1.9)$$

e dal relativo modello in forma di stato

$$\Sigma_{S_i} = \{A_{S_i}, B_{S_i}, C_{S_i}, D_{S_i}\}, \quad i = x, y, z \quad (1.10)$$

Il modello completo è

$$A_S = \text{blkdiag}\{A_{S_x}, A_{S_y}, A_{S_z}\} \quad (1.11a)$$

$$B_S = \text{blkdiag}\{B_{S_x}, B_{S_y}, B_{S_z}\} \quad (1.11b)$$

$$C_S = \text{blkdiag}\{C_{S_x}, C_{S_y}, C_{S_z}\} \quad (1.11c)$$

$$D_S = \text{blkdiag}\{D_{S_x}, D_{S_y}, D_{S_z}\} \quad (1.11d)$$

dove gli input sono le velocità angolari del veicolo

$$u_S = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T \quad (1.12)$$

e gli output sono le corrispondenti velocità percepite

$$y_S = [\hat{\phi} \ \hat{\theta} \ \hat{\psi}]^T. \quad (1.13)$$

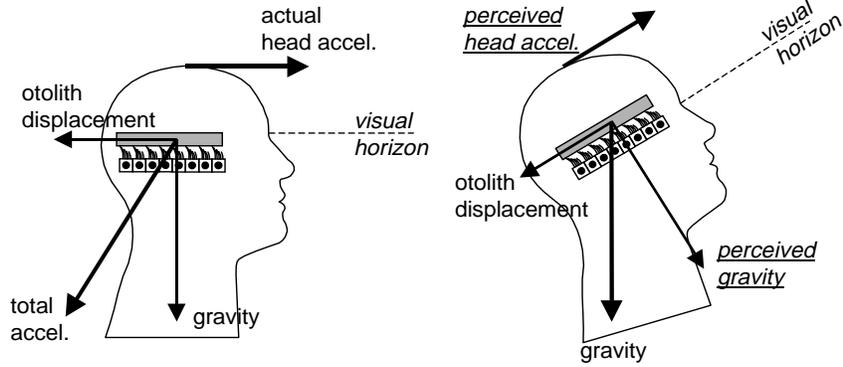


Figura 1.3: Tilt Coordination sull'asse longitudinale [4].

Un'importante componente percettiva in un simulatore dinamico è data dalla *tilt coordination*, introdotta nel paragrafo precedente.

Le macule, infatti, non sono capaci di distinguere la forza gravitazionale da quelle longitudinali e laterali senza l'aiuto di ulteriori informazioni, come quelle date dal sistema visivo. Attraverso l'inclinazione dell'abitacolo, fig. 1.3, è possibile fornire al pilota una "falsa" sensazione di accelerazione longitudinale e/o laterale, ciò permette di riprodurre il comportamento in bassa frequenza pur avendo uno spazio di lavoro ridotto. Inoltre, consente di effettuare strategie del moto meno conservative e che consentano di sfruttare al meglio l'intera area di lavoro della piattaforma nel caso in cui siano disponibili informazioni sulla traiettoria futura del veicolo.

La *tilt coordination*, a causa della linearizzazione, non è altro che un contributo aggiuntivo sul modello delle macule $W_O(s)$ dovuto all'angolo di beccheggio θ sull'asse longitudinale e a quello di rollio ϕ sull'asse laterale. Il vettore relativo all'accelerazione di gravità g_{TILT} che agisce sul sistema di riferimento cartesiano non inerziale del pilota è ottenuto dalle seguenti rotazioni dello stesso vettore espresso sul riferimento inerziale

$$g_{TILT} = R_y(\phi) \cdot R_x(\theta) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta \\ g \cos \theta \sin \phi \\ g \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -g \theta \\ g \phi \\ g \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

dove è stata utilizzata l'approssimazione ai piccoli angoli poiché beccheggio e di rollio sono generalmente piccoli.

È possibile notare come l'angolo di imbardata non contribuisca alla *tilt coor-*

dination e come le accelerazioni costanti sull'asse verticale non vengono percepite dall'uomo a causa del comportamento da filtro passa-alto delle macule, di conseguenza verranno considerate solo le prime due componenti di g_{TILT} . Le accelerazioni lineari che dovranno essere riprodotte saranno quindi

$$\tilde{u}_O = \begin{bmatrix} a_x + g\theta \\ a_y - g\phi \\ a_z \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

Le velocità angolari costituiscono gli ingressi del modello delle macule, di conseguenza dovranno essere incluse nel vettore di stato, che diventa $x_{\bar{O}} = [x_O^T \beta^T]^T$, dove $\beta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$.

Il relativo sistema aumentato è $\Sigma_{\bar{O}} = \{A_{\bar{O}}, B_{\bar{O}}, C_{\bar{O}}, D_{\bar{O}}\}$, con

$$A_{\bar{O}} = \left[\begin{array}{c|c} A_O & \bar{B} \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right], \quad B_{\bar{O}} = \left[\begin{array}{c|c} B_O & 0 \\ \hline 0 & I_3 \end{array} \right], \quad (1.16a)$$

$$C_{\bar{O}} = [C_O \mid 0], \quad D_{\bar{O}} = [D_O \mid 0], \quad (1.16b)$$

con $u_{\bar{O}} = [u_O^T u_S^T]^T = [a^T \ \dot{\beta}^T]^T$ come ingresso, $y_{\bar{O}} = y_O$ come uscita e dall'equazione 1.15

$$\bar{B} \triangleq B_O \cdot \begin{bmatrix} 0 & g & 0 \\ -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

Per poter impostare correttamente i vincoli per l'algoritmo di MPC è conveniente includere nel modello gli spostamenti e le velocità della piattaforma, ottenute utilizzando un semplice sistema lineare $\dot{x}_I = A_I x_I + B_I u$, con input $u = u_O$ e vettore di stato

$$x_I = [p_x \ v_x \ p_y \ v_y \ p_z \ v_z]^T.$$

Il sistema completo è quindi $\Sigma_V = \{A_V, B_V, C_V, D_V\}$, dove

$$A_V = \begin{bmatrix} A_S & 0 & 0 \\ 0 & A_{\bar{O}} & 0 \\ 0 & 0 & A_I \end{bmatrix}, \quad B_V = \begin{bmatrix} 0 & B_S \\ B_{\bar{O}} \\ B_I \end{bmatrix}, \quad (1.18a)$$

$$C_V = \begin{bmatrix} C_S & 0 & 0 \\ 0 & C_{\bar{O}} & 0 \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_V = \begin{bmatrix} 0 & D_S \\ D_{\bar{O}} & 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (1.18b)$$

e dove lo stato, gli ingressi e le uscite sono rispettivamente:

$$x_V = [x_S^T \ x_O^T \ x_I^T]^T \quad (1.19)$$

$$u_V = [a_x \ a_y \ a_z \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T \quad (1.20)$$

$$y_V = [y_S^T \ y_O^T \ y_I^T \ \dot{\beta}]^T. \quad (1.21)$$

Infine, il sistema può essere discretizzato utilizzando uno zero-order hold e ottenendo

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1.22)$$

$$y(t) = Cc(t) + Du(t), \quad t \in \mathbb{Z} \quad (1.23)$$

1.2.2 Modello disaccoppiato

Il modello complessivo a sei gradi di libertà, ottenuto nel paragrafo precedente, è di dimensioni notevoli e può richiedere un tempo di calcolo per l'applicazione del controllo predittivo che non è concorde con i tempi richiesti per la gestione della piattaforma. Per ridurre il carico computazionale è possibile suddividere il sistema in quattro sottosistemi disaccoppiati tra loro associati ad un problema di programmazione quadratica di dimensioni minori; ciò permette di eseguire i calcoli in modo parallelo riducendo i tempi computazionali.

La definizione dei quattro sottosistemi dipende dalla *tilt coordination* e dal conseguente accoppiamento tra la traslazione longitudinale x e il beccheggio θ e tra la traslazione laterale y e il rollio ϕ , introdotto nell'equazione 1.15.

I quattro sottosistemi sono:

1. Σ_ψ , relativo all'imbardata ψ ;
2. Σ_z , relativo all'accelerazione verticale a_z ;
3. $\Sigma_{x\theta}$, relativo alla coppia a_x, θ ;
4. $\Sigma_{y\phi}$, relativo alla coppia a_y, ϕ .

Essendo interessati al comportamento direzionale del veicolo, il seguente lavoro di tesi coinvolgerà i due sottosistemi che riguardano la rotazione attorno all'asse verticale Σ_ψ e la traslazione laterale $\Sigma_{y\phi}$.

Come anticipato all'inizio paragrafo, durante la fase di pre-scaling è necessario l'utilizzo di fattori di scala e filtri passa-alto per poter adattare il segnale di riferimento generato dal kernel di simulazione ai limiti fisici della piattaforma (fig.1.4). In particolare, verranno utilizzati dei filtri Butterworth del

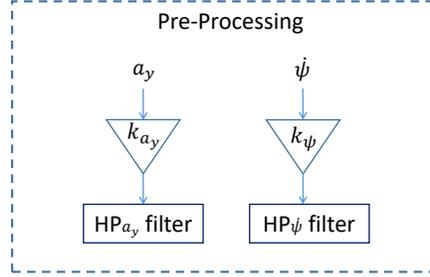


Figura 1.4: Pre-processing relativo ai sottosistemi Σ_ψ e $\Sigma_{y\phi}$.

primo ordine, che verranno di seguito indicati con l'operatore HP la cui frequenza di taglio sarà adattata alle richieste del pilota e al task considerato.

1.2.3 Funzione di costo

Per il calcolo dell'ingresso ottimo nel MPC lineare viene utilizzata una funzione di costo di tipo quadratico in cui vengono pesati sia l'errore di inseguimento del riferimento che l'azione di controllo sull'orizzonte di predizione.

$$\begin{aligned}
 J(t) = & \sum_{j=1}^{N_P} (y(t+j|t) - r(t+j))^T Q (y(t+j|t) - r(t+j)) \\
 & + \sum_{j=1}^{N_C-1} u(t+j)^T R u(t+j),
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

dove $y \in \mathbb{R}^p$, $u \in \mathbb{R}^m$, Q e R sono le matrici contenenti i pesi, r è il segnale di riferimento, N_P e N_C sono il numero di campioni relativi rispettivamente all'orizzonte di predizione e di controllo.

Utilizzando $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$ come variabile da minimizzare, è possibile esprimere il funzionale di costo nella forma classica per un problema di programmazione quadratica (QP)

$$\arg \min_{\Delta U} J = \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + \Delta U^T F \tag{1.25}$$

$$s.t. \quad G \Delta U \leq b \tag{1.26}$$

con $\Delta U = \text{vec}(\Delta u(t+j))$, $j = 0, \dots, N_C - 1$.

A causa della possibile non accuratezza del modello utilizzato o della presenza

di disturbi non misurabili, ad ogni iterazione verrà utilizzato solo il primo elemento $u(t|t)$ del segnale di controllo ottenuto, tale tecnica è detta *receding horizon*. Per dettagli si rimanda ai lavori di Bruschetta et al. [11, 12] e di Marran [14].

1.3 Driver in Motion

La strategia di motion cueing che sarà oggetto di tesi è stata applicata su simulatore ad alte prestazioni di recente concezione progettato da VI-Grade [22], esperti nel mondo della simulazione in ambito automobilistico. La piattaforma dinamica DiM (*Driver in Motion*) è ciò che contraddistingue maggiormente questo simulatore da altri a 6/3 assi o statici, infatti, grazie ai 9 gradi di libertà è possibile effettuare spostamenti di entità maggiore lungo quelle direzioni che sono particolarmente rilevanti per la simulazione di autoveicoli (cioè longitudinale, laterale e imbardata), mantenendo la struttura di dimensioni compatte.

Il sistema è composto da:

- una calotta sferica che funge da schermo che copre più di 180° in cui l'immagine proiettata si muove con la piattaforma in modo da garantire una totale immedesimazione del pilota nell'ambiente virtuale;
- un sistema di sterzo e di frenata in grado di dare dei feedback di forza in modo da migliorare la percezione della guida;
- un sedile attivo dotato di cinture attive in modo da dare informazioni aggiuntive al pilota nei casi in cui non è possibile riprodurre il moto;
- una piattaforma mobile che è costituita da una struttura esapodale montata su un tripode che si muove scorrendo su cuscini ad aria su una superficie piana ottagonale, fig. 1.5.

Il tripode viene utilizzato per riprodurre buona parte degli spostamenti longitudinali, laterali e di imbardata, mentre l'esapode viene utilizzato principalmente per la riproduzione dei movimenti di beccheggio, rollio e quelli verticali e in piccola parte per quelli longitudinali, laterali e di imbardata. I 3 gradi di libertà ridondanti consentono di effettuare un MCA più efficace mantenendo le dimensioni del simulatore ridotte. In tabella 1.5 sono stati riportati i dati relativi alle prestazioni della piattaforma.

Per quanto riguarda il sistema di riferimento utilizzato x , y e z corrispondono

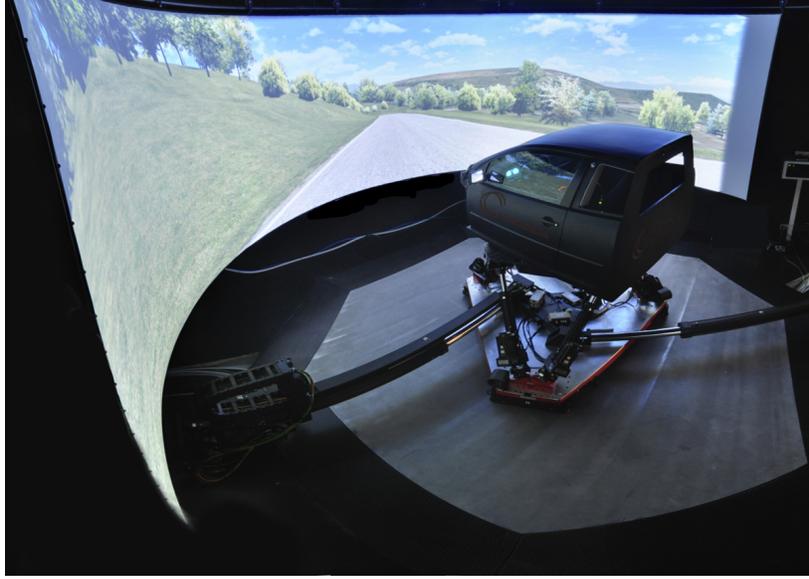


Figura 1.5: VI-Grade Driver in Motion

GDL	Posizione	Velocità	Accelerazione
x_T	$\pm 0.8 \text{ m}$	1.7 m/s	12 m/s^2
y_T	$\pm 0.75 \text{ m}$	1.5 m/s	10 m/s^2
Yaw ψ_T	$\pm 25 \text{ deg}$	165 deg/s	900 deg/s^2
x_H	$\pm 0.28 \text{ m}$	2 m/s	25 m/s^2
y_H	$\pm 0.25 \text{ m}$	1.7 m/s	25 m/s^2
z_H	$\pm 0.22 \text{ m}$	1.6 m/s	35 m/s^2
Roll ϕ_H	$\pm 20 \text{ deg}$	135 deg/s	2500 deg/s^2
Pitch θ_H	$\pm 20 \text{ deg}$	130 deg/s	2000 deg/s^2
Yaw ψ_H	$\pm 20 \text{ deg}$	135 deg/s	3000 deg/s^2

Tabella 1.1: Prestazioni del Tripode $[(\cdot)_T]$ e dell'Esapode $[(\cdot)_H]$

rispettivamente agli spostamenti longitudinale, laterale e verticale; il rollio (*roll*) ϕ è la rotazione attorno all'asse longitudinale x , il beccheggio (*pitch*) θ è quella attorno all'asse laterale y e l'imbardata (*yaw*) ψ è attorno all'asse verticale z , fig. 1.6.

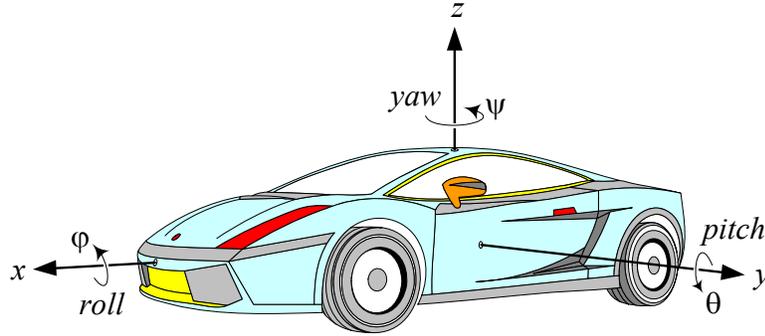


Figura 1.6: Sistema di riferimento [15]

1.4 Introduzione al problema di coordinamento

Come anticipato, obiettivo del seguente lavoro è quello di migliorare la strategia di MC attuale, basata sul Model Predictive Control, per poter dare al pilota le informazioni relative allo stato di aderenza degli pneumatici e quindi del comportamento della vettura in modo da consentirgli di controllarla anche nelle fasi in cui si manifesta uno stato di instabilità, cioè in caso di sottosterzo o sovrasterzo.

Nel MCA di partenza, durante il moto, l'asse di imbardata viene mantenuto fisso sul baricentro della vettura e ciò porta ad effetti diversi in base al tipo di veicolo simulato.

Nel caso di alcune vetture da corsa a trazione anteriore in cui il pilota è posizionato lontano dal baricentro, in particolare quando si trova davanti ad esso, si presenta un'incapacità di percepire quando la vettura manifesta un comportamento sovrasterzante durante la fase di ingresso curva. Ciò va in conflitto con il tipico comportamento di questo genere di vetture, il cui setup viene effettuato in modo che abbiano una tendenza al sovrasterzo per compensare la loro l'attitudine al sottosterzo.

Viceversa nel caso di perdita di aderenza all'anteriore, cioè nel caso di sottosterzo, si percepisce un movimento esagerato che porta il pilota a reagire in modo deciso ed ad entrare in un loop tra sottosterzo e sovrasterzo causato dalle sue reazioni eccessive.

Nelle vetture in cui la posizione del pilota è piuttosto vicina al baricentro non si è in grado di percepire la rotazione della stessa e quindi di percepirne il comportamento; di conseguenza, la reazione del pilota è legata soprattutto alla sua esperienza sul simulatore e la sua consapevolezza sulla mancanza di

feedback da parte della piattaforma, talvolta, lo porta ad agire anticipando la correzione di sterzo.

Per entrambi i tipi di vettura si è in grado di comprendere la perdita di controllo del veicolo solo se si ha uno slittamento elevato, cosa che avviene solo grazie al contributo del sistema grafico. È importante sottolineare che tale informazione arrivi al pilota in ritardo rispetto a quanto necessario per riuscire a reagire in tempo e riprendere il controllo della vettura poiché egli riesce a riconoscere dall'informazione visiva solo uno slittamento elevato. Per ovviare al problema si è quindi pensato ad un asse di rotazione dinamico che consenta di restituire delle sensazioni più in linea con quelle reali durante le diverse fasi della curva. Come verrà spiegato di seguito, a seconda della fase della manovra e dello stato di bilanciamento della vettura viene percepita una rotazione alle spalle del pilota o di fronte ad esso e ciò consente di valutare il comportamento del veicolo e di controllarne il moto. Al fine di riprodurre tale sensazione è stato individuato come asse attorno al quale effettuare la rotazione la proiezione ortogonale del centro di istantanea rotazione che si muove lungo l'asse longitudinale del veicolo e ne descrive il comportamento anche nei casi di perdita di aderenza degli pneumatici. Come verrà spiegato successivamente in modo approfondito, in ingresso curva la distanza di tale asse dal baricentro della vettura coincide con il semipasso posteriore, mentre in uscita di curva esso si allontana dal baricentro posizionandosi davanti ad esso. Questo comportamento è concorde con quanto percepito dal pilota.

Capitolo 2

Cinematica della sterzata

Dovendo riprodurre in modo realistico il comportamento direzionale della vettura, è necessario analizzare le grandezze cinematiche coinvolte nella manovra di curva per individuare quelle che saranno poi fondamentali per la risoluzione del problema affrontato nel lavoro di tesi.

L'obiettivo di questo capitolo è, quindi, quello introdurre le relazioni che legano tra di loro la velocità di imbardata, l'angolo di *side slip* e l'accelerazione laterale, paragrafo 2.1, e il centro di istantanea rotazione 2.2, cioè punto stazionario attorno al quale è possibile descrivere il campo delle velocità attraverso una rotazione e che rappresenta la base di partenza per la ricerca di un asse di imbardata dinamico.

2.1 Cinematica della sterzata

2.1.1 Modello matematico

Il sistema di riferimento che verrà utilizzato per l'analisi è $(x, y, z; G)$ solidale al veicolo con origine nel baricentro e versori $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$. Come mostrato in figura 2.1, il versore \mathbf{i} è diretto longitudinalmente verso la direzione di avanzamento, il versore \mathbf{j} è diretto trasversalmente verso sinistra mentre il versore \mathbf{k} è ortogonale alla strada e diretto verso l'alto.

La strada viene supposta perfettamente piana per lo studio del comportamento direzionale. I movimenti di scuotimento, beccheggio e rollio vengono di seguito supposti trascurabili poiché si è interessati al comportamento direzionale della vettura, di conseguenza ogni punto della cassa del veicolo si mantiene sempre alla stessa distanza dalla strada e si ha un moto piano. Inoltre, si suppone che il movimento di sterzata delle ruote anteriori non

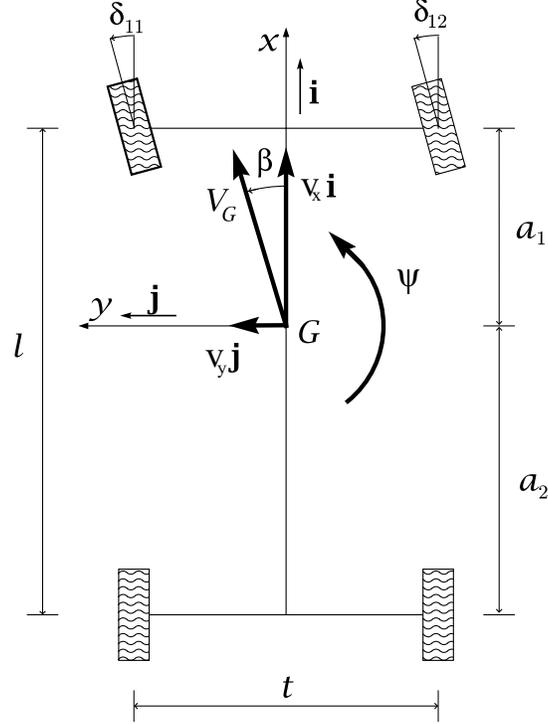


Figura 2.1: Modello di veicolo a tre gradi di libertà.

influenze apprezzabilmente la posizione del baricentro del veicolo poiché le ruote anteriori hanno massa molto inferiore rispetto al resto dello stesso.

2.1.2 Equazioni di congruenza

Il moto della vettura può essere completamente descritto tramite la sua velocità angolare Ω e la velocità del baricentro V_G ed essendo, come già detto, il veicolo supposto in moto piano, V_G è orizzontale mentre Ω è verticale.

Più precisamente

$$V_G = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \quad (2.1)$$

e

$$\Omega = \dot{\psi} \mathbf{k}. \quad (2.2)$$

La componente v_x è detta *velocità di avanzamento*, mentre v_y è detta *velocità laterale* del veicolo. La velocità angolare ha due componenti nulle, si ha cioè solo velocità di imbardata, che viene indicata positiva se la vettura ruota in senso antiorario.

Un altro importante parametro cinematico è l'angolo di *side slip* β , noto anche come *handling angle*, cioè l'angolo fra l'asse longitudinale del veicolo e la direzione della velocità del baricentro V_G , questo angolo rappresenta l'attitudine del corpo vettura alla rotazione rispetto al vettore velocità, cioè alla sua traiettoria.

Sfruttando le seguenti equazioni relative al modello monotraccia del veicolo

$$\alpha_f = \beta + a \frac{\dot{\psi}}{V} - \delta \quad (2.3)$$

$$\alpha_r = \beta - b \frac{\dot{\psi}}{V} \quad (2.4)$$

con

$$V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (2.5)$$

dove α_f e α_r sono la media degli angoli di *slip* degli pneumatici anteriori e posteriori e δ è la media dell'angolo di sterzata delle ruote, è possibile esprimere l'angolo di *side slip* in funzione di questi parametri, ottenendo

$$\beta = \frac{b}{L} \alpha_f + \frac{a}{L} \alpha_r + \frac{b}{L} \delta. \quad (2.6)$$

Da questa relazione è possibile notare come tale angolo contenga delle informazioni dirette relative al comportamento degli pneumatici e quindi fornisca informazioni sulla stabilità del veicolo. Attraverso la sua variazione è infatti possibile ottenere informazioni sulla prossimità alla saturazione dello pneumatico, cioè il superamento del picco di forza laterale generato dal contatto pneumatico-asfalto.

Nel capitolo successivo verrà sottolineata l'importanza di far percepire al pilota la reazione delle gomme alla forza centrifuga in modo da poter controllare il veicolo durante le fasi della curva, si reputa quindi necessario pensare ad un MCA che evidenzi durante la simulazione la variazione di questo parametro.

Attraverso β è possibile esprimere la componente longitudinale del vettore velocità v_x e quella laterale v_y come proiezioni della V_G sugli assi x e y .

$$\begin{cases} v_x = V \cos(\beta) \\ v_y = V \sin(\beta) \end{cases} \quad (2.7)$$

L'espressione dell'accelerazione del baricentro a_G si ottiene derivando la velocità V_G rispetto al tempo, ottenendo

$$\begin{aligned} a_G &= \dot{v}_x \mathbf{i} + v_x \dot{\psi} \mathbf{j} + \dot{v}_y \mathbf{j} - v_y \dot{\psi} \mathbf{i} \\ &= (\dot{v}_x - v_y \dot{\psi}) \mathbf{i} + (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) \mathbf{j} \\ &= a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} \end{aligned} \quad (2.8)$$

dove

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \dot{\psi} \mathbf{j} \quad e \quad \frac{d\mathbf{j}}{dt} = -\dot{\psi} \mathbf{i} \quad (2.9)$$

poiché il sistema di riferimento ruota con il corpo vettura.

L'equazione 2.8 permette di scomporre a_G in *accelerazione longitudinale*

$$a_x = \dot{v}_x - v_y \dot{\psi}, \quad (2.10)$$

e in *accelerazione laterale*

$$a_y = \dot{v}_y + v_x \dot{\psi}, \quad (2.11)$$

rispetto all'asse del veicolo.

2.1.3 Accelerazione Laterale

L'obiettivo del lavoro di tesi è quello di coordinare nel MCA l'accelerazione laterale alla velocità di imbardata, in modo da migliorare le sensazioni di guida al simulatore durante la fase transitoria della curva. Si reputa quindi utile soffermarsi su questo termine. Dall'equazione 2.11 si evince che anche tale accelerazione può essere scomposta in due termini: il primo è la variazione della velocità laterale v_y , detto accelerazione laterale diretta

$$\begin{aligned} \dot{v}_y &= \dot{V} \sin(\beta) + V \cos(\beta) \dot{\beta} \\ &= \dot{V} \sin(\beta) + v_x \dot{\beta}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

dove $\dot{\beta}$ è noto come *side slip rate*; il secondo termine è $v_x \dot{\psi}$, cioè il contributo dell'accelerazione centripeta sull'asse laterale.

In percorrenza di curva (*steady-state*) si ha una traiettoria a raggio R costante percorsa a velocità V anche essa costante e, dato che per sostenere l'accelerazione centripeta il veicolo lavora a β costante, ne consegue che $\dot{\beta} = 0$ e $a_y = v_x \dot{\psi}$.

Durante la fase transitoria di una manovra, invece, la velocità laterale v_y e quindi l'angolo di *side slip* β non sono costanti, pertanto si ha un'accelerazione laterale diretta \dot{v}_y diversa da zero e l'accelerazione laterale totale è

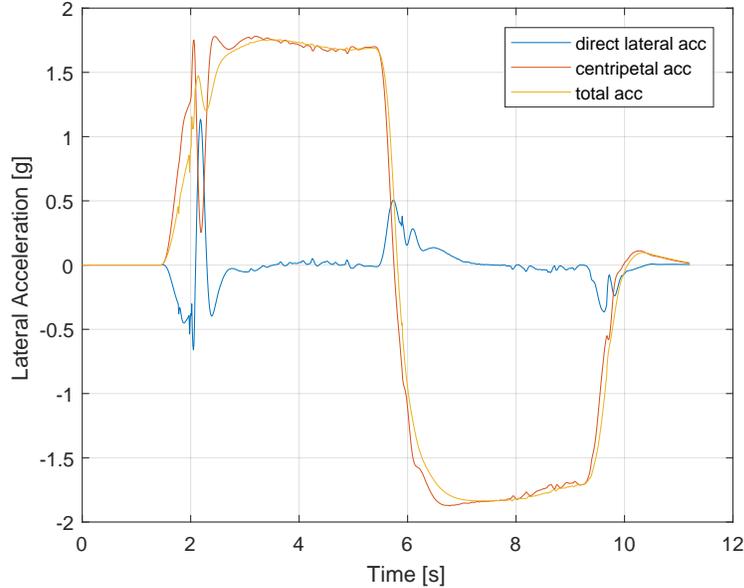


Figura 2.2: Accelerazione laterale di una vettura GT in una doppia curva a S.

pari alla somma delle due componenti precedentemente citate.

Va sottolineato, inoltre, che le due componenti non sono indipendenti tra di loro, difatti in presenza di \dot{v}_y il raggio di curvatura R della traiettoria varia e di conseguenza varia anche la velocità di imbardata $\dot{\psi}$. Per maggiori dettagli si rimanda al testo [20].

In figura 2.2 sono stati riportati i segnali dell'accelerazione laterale e delle sue componenti relativi ad una doppia curva a S di raggio pari a $100m$ effettuata al limite dell'aderenza con una vettura GT.

Grazie all'ampio raggio della curva le fasi transitorie sono ben distinguibili da quelle stazionarie ed è evidente quanto detto prima. Infatti, nelle fasi transitorie della manovra la \dot{v}_y è diversa da zero che in percorrenza di curva si annulla quasi del tutto.

Focalizzandosi sulla prima parte della manovra è possibile notare che i due termini presentano un comportamento in alta frequenza opposto che si compensa in larga parte, facendo sì che sul segnale dell'accelerazione laterale si presenti un avvallamento, tipico segno di un comportamento sovrasterzante del veicolo [21]. Tale effetto è dovuto alla reazione del pilota al sovrasterzo, infatti egli cercando di ridurre la tendenza ad allargare della traiettoria della

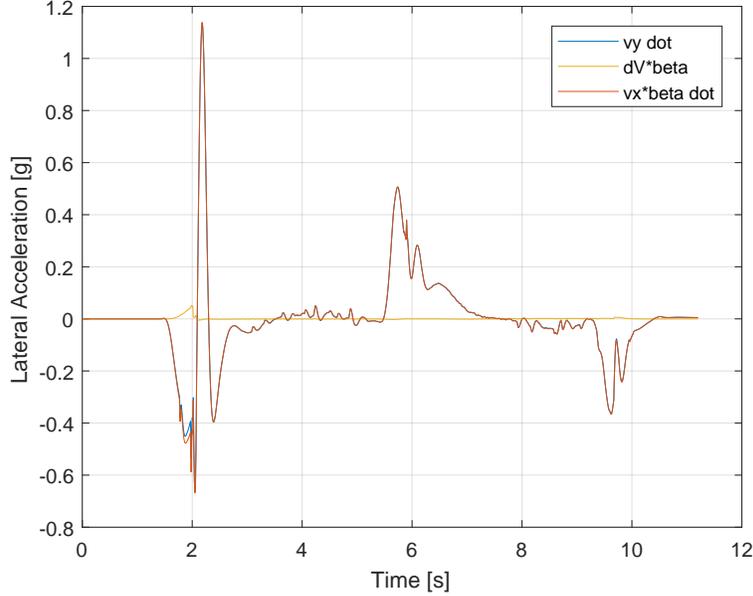


Figura 2.3: Accelerazione laterale diretta e le sue componenti di una vettura GT in una doppia curva a S.

parte posteriore del veicolo effettua una correzione di sterzo riducendone la richiesta. La correzione di sterzo e il conseguente "raddrizzamento" della vettura provocano una diminuzione della velocità laterale facendo variare la *side slip rate* e causando un picco positivo di \dot{v}_y poiché esso è funzione di quest'ultimo.

Contrariamente $v_x \dot{\psi}$ manifesta un picco negativo causato dalla diminuzione della richiesta di sterzo che provoca un incremento del raggio di curvatura R della traiettoria e, dunque, una diminuzione della velocità di imbardata $\dot{\psi}$, poiché quest'ultima è inversamente proporzionale a R .

In figura 2.3 è stato riportato il segnale relativo all'accelerazione laterale diretta esplicitando anche in questo caso le sue componenti. Ciò consente di notare come tale termine sia un segnale prevalentemente in alta frequenza e a media nulla che rientra quasi totalmente entro i limiti della piattaforma utilizzata (DiM). Inoltre, essendo funzione *side slip rate* anche esso contiene informazioni relative alla variazione dello stato del veicolo durante la fase transitoria della manovra, infatti questo può essere in prima approssimazione considerato proporzionale al $\dot{\beta}$ effettuando l'approssimazione ai piccoli angoli. Poiché β è tipicamente piccolo, generalmente minore di 10° , è possibile

riscrivere l'equazione 2.12 come segue:

$$\dot{v}_y \approx \dot{V}\beta + V\dot{\beta}. \quad (2.13)$$

Va notato che il termine proporzionale al $\dot{\beta}$ è quello predominante e determina pertanto il comportamento dell'accelerazione laterale diretta e, inoltre, è il termine legato allo stato di aderenza degli pneumatici per cui è di particolare interesse per il fine della tesi di migliorare la percezione del bilanciamento della vettura e del comportamento degli pneumatici in fase di guida in curva sul simulatore.

Come spiegato nel capitolo precedente, il segnale relativo all'accelerazione laterale in fase di pre-processing viene scalato e poi filtrato a causa dell'impossibilità in piattaforma di ricrearlo totalmente. Infatti, specialmente in percorrenza di curva si ha un segnale in bassa frequenza che necessita di uno spazio di lavoro elevato non compatibile con l'area di lavoro disponibile. Il filtraggio porta però alla perdita di informazioni relative all'attitudine del veicolo. Si reputa, quindi, interessante sviluppare un MCA in grado di gestire separatamente le due componenti in modo da poter tarare l'entità delle stesse in base alla sensibilità del pilota e al task considerato.

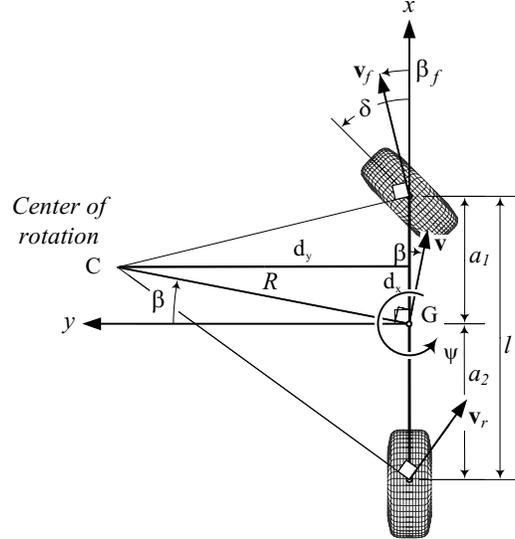


Figura 2.4: Modello monotraccia del veicolo. Centro di istantanea rotazione C e definizione delle distanze d_x e d_y [15].

2.2 Centro di istantanea rotazione

In caso di velocità di imbardata non nulla, $\dot{\psi} \neq 0$, qualunque corpo rigido in moto piano ha in ogni istante un centro di istantanea rotazione (CIR), che è un punto con velocità nulla che coincide con il centro di curvatura delle traiettorie dei singoli punti del veicolo nel caso particolare di moto circolare o "*steady state*". Un modo per determinare il centro di istantanea rotazione è tracciare le rette perpendicolari ai vettori di velocità relativi agli pneumatici anteriori e posteriori, in modo da trovare il loro punto di intersezione, figura 2.4. Il CIR infatti si sposta al variare degli angoli di *slip* degli pneumatici. Un altro modo per determinare le coordinate di questo punto è quello di utilizzare la formula fondamentale della cinematica dei corpi rigidi, sfruttando le informazioni relative alle velocità longitudinali, laterali e di imbardata del veicolo. Essendo

$$V_{CIR} = V_G + \dot{\psi} \mathbf{k} \times GC_{CIR}, \quad (2.14)$$

le sue coordinate nel sistema di riferimento cartesiano solidale al veicolo sono:

$$GC_{CIR} = d_x \mathbf{i} + d_y \mathbf{j} \quad (2.15)$$

dove

$$d_y = \frac{v_x}{\dot{\psi}} \quad (2.16)$$

è la distanza del CIR dall'asse del veicolo, e

$$d_x = \frac{-v_y}{\dot{\psi}} \quad (2.17)$$

è la posizione longitudinale del CIR, mentre

$$R = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (2.18)$$

è il raggio della traiettoria percorsa dal centro di massa del veicolo.

Il veicolo manifesta il sovrasterzo se R è minore del raggio della traiettoria ideale, ciò accade quando la forza laterale sviluppata al posteriore è minore di quella sviluppata all'anteriore provocando un momento imbardante. Viceversa il sottosterzo è associato ad una minore forza generata dagli pneumatici anteriori rispetto a quelli posteriori, in questo caso si avrà un momento anti-imbardante e un conseguente raggio R maggiore rispetto a quello della traiettoria ideale.

Le variazioni relative alla posizione percepita del centro di istantanea rotazione sono estremamente importanti in piattaforma ma a causa del ridotto

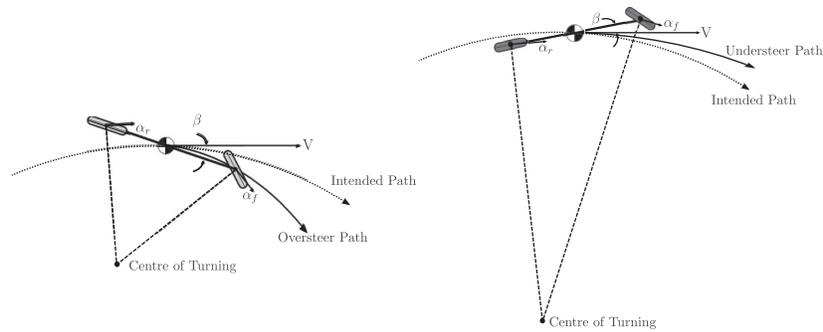


Figura 2.5: A sinistra è mostrata la cinematica di un veicolo in sovrasterzo, mentre a destra quella di un veicolo in sottosterzo [17].

spazio di lavoro non è possibile ricreare la sensazione di percorrenza di una curva per un periodo prolungato. Va tenuto in considerazione anche che la manipolazione del segnale potrebbe portare a dei movimenti che provocano una falsa percezione della posizione del CIR portando ad un'interpretazione errata del comportamento del veicolo.

Capitolo 3

Asse di Imbardata dinamico

Ricordando che l'obiettivo del seguente lavoro di tesi è quello di migliorare le percezioni di guida durante la manovra di curva attraverso una migliorata strategia di MC, si reputa necessaria una presentazione degli studi fatti sul medesimo argomento e le strategie di MC da loro proposte, paragrafo 3.1. Partendo da un'analisi delle sensazioni di guida provate dal pilota durante la manovra, spiegate nel paragrafo 3.2, è stata studiata la dinamica di un asse di imbardata mobile in grado di riprodurre in piattaforma l'accelerazione laterale diretta \dot{v}_y con l'obiettivo di far percepire al pilota lo stato di aderenza degli pneumatici. Tale analisi viene spiegata nel paragrafo 3.3

3.1 Rassegna Bibliografica

In letteratura è possibile trovare due strategie di MC con il medesimo obiettivo. In particolare Garrett, in [16], ne propone uno in cui viene utilizzato l'angolo di *side slip* come segnale di riferimento per la rotazione attorno all'asse verticale, cioè l'imbardata. Infatti, a causa del fatto che i MCA coinvolgono una serie di filtri utilizzati per ottenere un segnale di riferimento che non ecceda i limiti dello spazio di lavoro, le informazioni relative allo stato del veicolo, che sono contenute nei segnali di movimento, vengono filtrate indiscriminatamente. Solitamente nei MCA viene data poca importanza allo stato del veicolo relativo al proprio sistema inerziale e ciò appare poco sensato dato il fatto che i modelli del veicolo sono sempre descritti in funzione di questo stato e che le informazioni sulla stabilità laterale della vettura vengono fornite in funzione dell'angolo di *side slip*. Eccetto nei casi di perdita di controllo, questo angolo rientra nei limiti della piattaforma per la maggior parte delle manovre quindi non si rende necessaria l'applicazione di un filtro

che ne limiti l'ampiezza e che porterebbe ad una perdita di informazioni. Esso, infatti, è generalmente minore di 10° e, come visibile in tabella 1.1, è riproducibile senza la necessità di essere manipolato.

In tale strategia di MC, si privilegia l'informazione contenuta nell'angolo di *side slip* lasciando che buona parte della velocità di imbardata venga percepita attraverso il supporto del sistema video, poiché non è possibile replicare totalmente in piattaforma l'imbardata del veicolo.

In [17] viene presentato da Limebeer uno studio preliminare del comportamento dinamico del veicolo nel suo intervallo di esercizio; lo scopo è quello di progettare dei filtri per il cueing dell'accelerazione laterale e della velocità di imbardata tali da preservare le informazioni relative al suo stato di stabilità. Il focus del cueing presentato è, infatti, quello di fornire il corretto stimolo sensoriale in modo da minimizzare la differenza tra lo stile di guida del pilota nel simulatore e in un veicolo reale. In aggiunta viene sottolineata l'importanza di gestire simultaneamente il cueing di a_y e $\dot{\psi}$ poiché la loro azione combinata in curva dà la sensazione di rotazione attorno al CIR. La posizione di quest'ultimo varia continuamente ed è fortemente influenzata dalla caratteristica sovrasterzante e sottosterzante della vettura, per cui si rende indispensabile considerare tale aspetto in fase di progettazione del cueing facendo sì che venga mantenuta in piattaforma la posizione percepita di questo punto.

L'obiettivo del MC presentato di seguito è quello di migliorare la percezione dello stato del veicolo in fase di curva ma che allo stesso tempo sia di facile implementazione in piattaforma e che non richieda uno studio accurato del veicolo da utilizzare, contrariamente a quanto accade in [17], e che possa essere tarato facilmente. Infatti, l'analisi presentata da Limebeer e la progettazione dei filtri per il cueing dell'accelerazione laterale e la velocità di imbardata dipendono fortemente dal veicolo e dal setup utilizzato.

3.2 Percezioni di guida

La manovra di curva può essere generalmente suddivisa in tre fasi:

- *transient turn entry*: il pilota è tipicamente ancora in fase di frenata. La velocità di imbardata e quella laterale, che sono nulle in rettilineo, crescono fino al valore che verrà mantenuto nella fase successiva di *steady-state* della curva;
- *steady-state cornering*: il veicolo percorre una traiettoria a raggio costante, mantenendo la velocità di percorrenza e di imbardata costanti;

- *transient turn exit*: la velocità di imbardata e quella laterale decrescono fino ad annullarsi nel caso in cui la curva è seguita da un rettilineo.

Sul rettilineo, che precede la curva che si vuole effettuare, l'angolo di sterzo δ oscilla attorno allo zero e gli pneumatici hanno un angolo di *slip* molto piccolo, approssimativamente uguale al loro angolo di convergenza, quindi l'accelerazione laterale è nulla.

In ingresso curva, girando lo sterzo il pilota induce un angolo di *slip*, cioè l'angolo compreso tra l'asse longitudinale dello pneumatico e la sua velocità di avanzamento, sulle ruote anteriori. Perciò gli pneumatici anteriori sviluppano una forza laterale, che è funzione dell'angolo di *slip*, che provoca un momento imbardante con polo su baricentro del veicolo. Quest'ultimo a sua volta induce un angolo di *slip* sugli pneumatici posteriori e quindi la loro tenuta di strada.

In questa fase le forze laterali generate dagli pneumatici anteriori si mantengono maggiori rispetto a quelle generate da quelli posteriori, infatti per garantire l'entrata in curva è necessaria la presenza di un momento imbardante sul veicolo.

$$YawMoment = (F_{fl} + F_{fr})a_1 + (F_{rl} + F_{rr})a_2. \quad (3.1)$$

Durante l'esperienza di guida il pilota percepisce l'effetto della forza centrifuga e la conseguente reazione delle gomme che permette di mantenere la tenuta di strada. È in questa prima fase si concentra nel cercare di percepire lo sbilanciamento tra le forze che agiscono all'anteriore e al posteriore del veicolo per comprendere come questo stia ruotando e bilanciare la frenata e la sterzata al fine di rallentare efficacemente lo stesso senza perderne il controllo. Ad esempio, nel caso di sovrasterzo si percepisce una rotazione attorno all'asse anteriore della vettura e una mancanza di aderenza al posteriore. La reazione del pilota è quella di diminuire la pressione sui freni con l'obiettivo di recuperare aderenza e bilanciare adeguatamente le forze in gioco. Nel caso di sottosterzo invece si percepisce la mancanza di rotazione e la perdita di aderenza sull'asse anteriore del veicolo che porta ad avere una traiettoria rettilinea e non consente di percorrere la traiettoria della curva.

Infatti, il pilota e il veicolo rappresentano un sistema in catena chiusa, il che significa che il pilota osservando il comportamento del veicolo è in grado di correggere la sua azione di controllo per ottenere il movimento desiderato.

In curva, specialmente in quelle ad ampio raggio, in cui la fase di *steady state* è più lunga, il pilota cerca di percepire il bilanciamento della vettura, provando a gestire il comando dell'acceleratore e di sterzo per mantenerla in uno stato neutro. In percorrenza di curva il momento imbardante è nullo,

quindi si ha un totale bilanciamento alla rotazione delle forze laterali.

Una macchina viene definita in uno stato neutro quando gli angoli di *slip* degli pneumatici anteriori e posteriori sono uguali ($\alpha_f = \alpha_r$), cioè quando la parte anteriore del veicolo e quella posteriore scivolano allo stesso modo. Per quanto riguarda l'uscita di curva si cerca di massimizzare l'accelerazione longitudinale cercando di mantenere la macchina in una condizione stabile. In questa fase si percepisce un momento anti-imbardante, poiché per consentire l'uscita dalla curva la forza laterale posteriore deve essere maggiore rispetto a quella anteriore.

Con l'attuale MCA i piloti lamentano il fatto di non riuscire a sentire come il bilanciamento della vettura cambi durante la curva. Essi affermano che con alcuni tipi di veicolo non sono totalmente in grado di distinguere il comportamento sovrasterzante da un suo comportamento agile e reattivo. Si riesce a percepire la velocità di rotazione del veicolo durante la fase transitoria ma non il suo stato di stabilità. Buona parte dell'informazione relativa al sotto-sterzo e al sovrasterzo è data dal sistema visivo e dal feedback di sterzo, che talvolta non combaciano con lo spostamento della piattaforma, quindi si ha la sensazione di uno spostamento non naturale.

Per migliorare l'esperienza di guida in ambiente virtuale si è quindi pensato di utilizzare un asse dinamico di rotazione, che verrà definito e analizzato di seguito, per restituire al pilota informazioni più chiare sullo stato del veicolo.

3.3 Punto a velocità laterale nulla

Nel lavoro di Limebeer [17] viene sottolineata l'importanza di gestire in modo combinato il MCA relativo allo spostamento laterale e all'imbardata poiché provocano la sensazione di rotazione attorno al CIR, sensazione che non è possibile ricreare in modo duraturo a causa dei limiti della piattaforma, causando talvolta un'interpretazione errata del comportamento della vettura.

A partire dalle sensazioni di guida del pilota, che ad inizio curva percepisce una rotazione sull'asse posteriore della vettura ed in seguito una rotazione sull'asse anteriore, ci si è posti l'obiettivo di trovare un punto attorno al quale effettuare la rotazione in piattaforma che permettesse di riprodurre le sensazioni di guida descritte in precedenza.

In quest'ottica è stato individuato un Punto a Velocità laterale Nulla PVN (o ad angolo di *slip* nullo), definito nel testo [19], che si muove lungo l'asse longitudinale del veicolo e la cui distanza dal centro di massa è pari a d_x , eq. 2.17, tale punto è cioè la proiezione del CIR sull'asse longitudinale del sistema di riferimento cartesiano definito nel capitolo precedente.

Quest'ultima caratteristica fa sì che possa essere facilmente individuato e che l'effetto di una rotazione attorno ad esso possa essere considerato riproducibile in piattaforma, contrariamente al CIR che si trova raramente nelle immediate vicinanze della vettura, e una rotazione attorno ad esso richiederebbe degli spostamenti non concordi con i limiti della piattaforma.

3.3.1 Dinamica del PVN

In figura 3.1 è stata riportata la variazione della distanza tra questo punto e il centro di massa, cioè il braccio di rotazione, nel caso di un impulso di sterzo effettuato a tre differenti velocità con una Sedan. Essendo d_x proporzionale alla velocità laterale, si ha che la distanza tra il PVN e il centro di massa aumenti al crescere della velocità di percorrenza.

Nella manovra riportata sono distinguibili solo le fasi transitorie della curva poiché lo *steady-state* è evidente soprattutto in curve ad ampio raggio. Soffermendoci sulle due fasi transitorie è possibile studiare il comportamento del punto di interesse.

- *initial turn entry*: il PVN si trova ad una distanza dal baricentro pari al semipasso tra questo e l'assale posteriore a_2 , fig.2.1. Ciò dipende dal fatto che nei primi istanti della curva l'angolo di *slip* degli pneumatici posteriori è nullo, a differenza di quello degli pneumatici anteriori, questo provoca la sensazione iniziale del pilota di una ruotare attorno ad un punto alle sue spalle;
- *transient turn entry*: il PVN si avvicina al centro di massa. In base alla velocità di percorrenza si avrà un PVN posizionato davanti o dietro rispetto alla posizione del baricentro della vettura. Come spiegato nei testi [18, 19], a velocità ridotte (angoli di *slip* degli pneumatici nulli \equiv sterzata cinematica) l'angolo di *side slip* β è concorde con l'angolo di sterzo δ quindi, nel caso considerato, si avrà $v_y > 0$ e di conseguenza $d_x < 0$ ciò porta ad avere il PVN dietro al centro di massa, mentre al crescere della velocità di avanzamento e quindi al crescere degli angoli di *slip* degli pneumatici β decresce fino ad annullarsi al raggiungimento di quella che viene detta *tangent speed* V_β , per poi diventare di segno opposto rispetto a δ , fig 3.2;
- *transient turn exit*: nel caso considerato si può notare un picco negativo della distanza d_x dato dal rollio della vettura, comportamento visibile nelle vetture stradali. Nell'ultima fase della manovra, in accordo con la percezione del pilota di una rotazione attorno ad un punto davanti

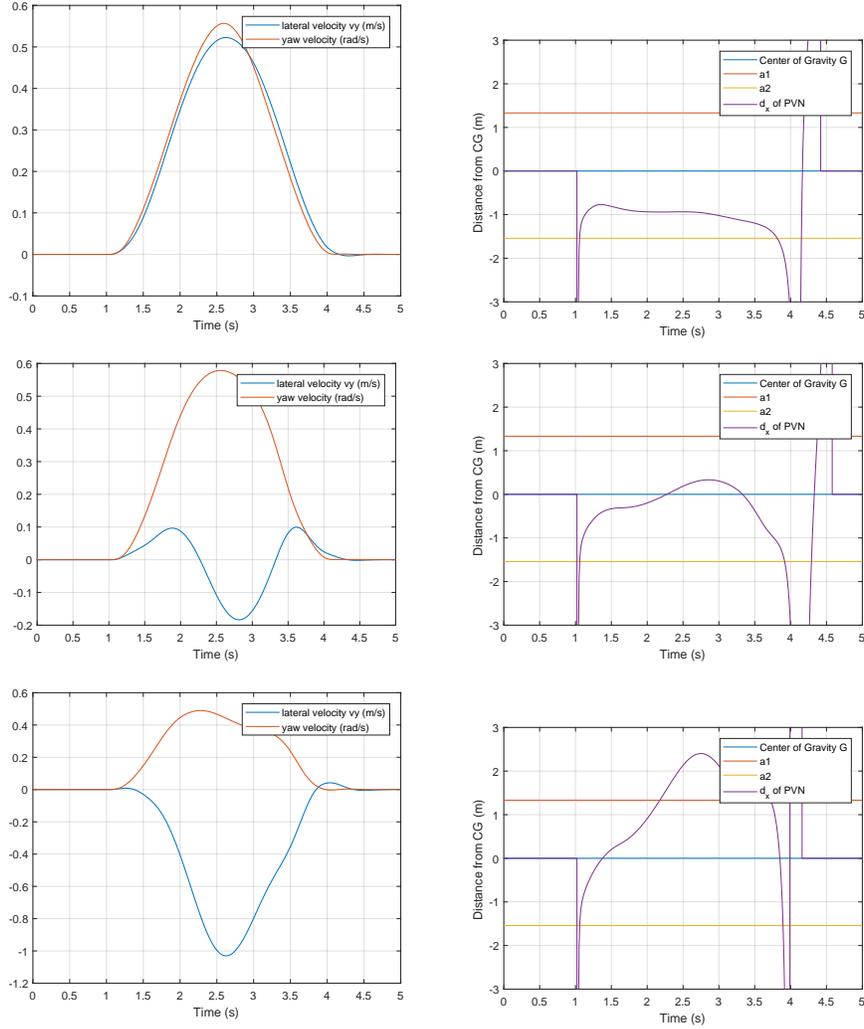


Figura 3.1: Dinamica del punto a velocità laterale nulla al variare della velocità di percorrenza. La manovra utilizzata è un impulso di sterzo effettuato con una Sedan.

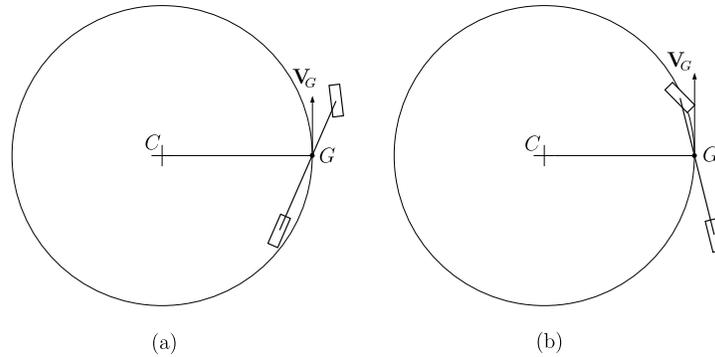


Figura 3.2: Assetto del veicolo rispetto alla traiettoria del baricentro: (a) a bassa velocità $V_G < V_\beta$ e (b) ad alta velocità $V_G > V_\beta$.

a lui, si ha che il PVN vari velocemente allontanandosi dal centro di massa.

Nelle figure 3.3 e 3.4 sono mostrati i casi di sovrasterzo e sottosterzo in una curva a S effettuata con la medesima vettura in modo da evidenziare come in entrambi i casi una rotazione attorno a questo punto, con velocità angolare $\dot{\psi}$ e braccio d_x , permetta di mantenere le informazioni transitorie relative allo stato del veicolo e al suo comportamento.

In particolare, in figura 3.3 è possibile notare come nel caso di sottosterzo il PVN ha una dinamica opposta alla direzione di avanzamento che si traduce in una sensazione di rotazione attorno all'asse posteriore, mentre in caso di sovrasterzo si percepisce una rotazione con centro verso l'asse anteriore concorde con il repentino allontanamento del PVN, figura 3.4.

Va sottolineata, inoltre, la presenza di un punto di discontinuità nel cambio di direzione causato dal passaggio per lo zero della velocità di imbardata. Essendo d_x inversamente proporzionale a quest'ultima, in prossimità del cambio di direzione tende ad infinito e si registra un repentino cambio di segno dovuto al cambio di direzione.

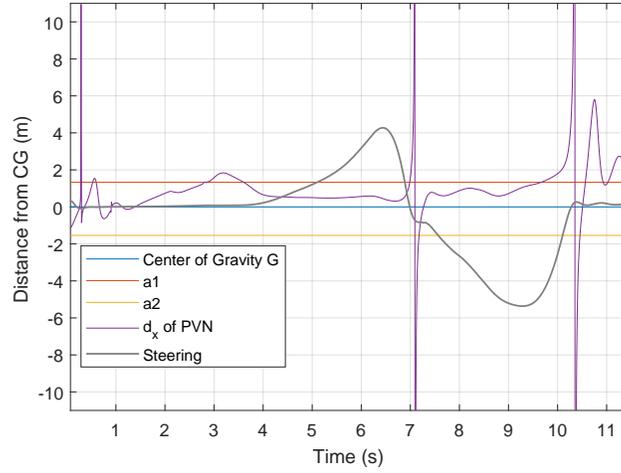


Figura 3.3: Dinamica del punto a velocità laterale nulla in caso di sottosterzo in una doppia curva ad S effettuata con una Sedan.

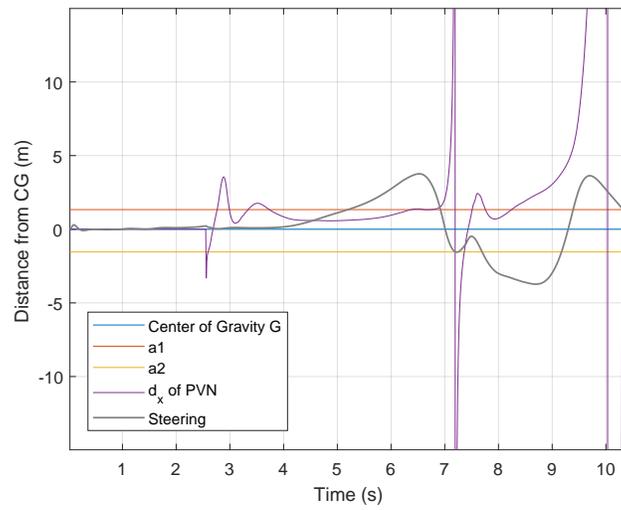


Figura 3.4: Dinamica del punto a velocità laterale nulla in caso di sovrasterzo in una doppia curva ad S effettuata con una Sedan.

Capitolo 4

Yaw Dynamics

Nel capitolo precedente è stata presentata una strategia di MCA in cui, attraverso un asse dinamico di imbardata attorno al quale effettuare la rotazione, è possibile ricreare in piattaforma il comportamento transitorio del veicolo e consentire al pilota di controllarne il movimento.

Di seguito verrà presentata un'analisi di fattibilità dell'utilizzo del PVN in piattaforma (paragrafo 4.1) in cui saranno spiegati i problemi di incompatibilità tra il segnale filtrato della velocità di imbardata e questo asse.

Per ciò si è reso necessario rielaborare la strategia al fine di riprodurre gli effetti di una rotazione attorno ad un asse dinamico (paragrafo 4.2). Lo scopo dell'algoritmo presentato è quello di riprodurre le informazioni sul bilanciamento della vettura in ingresso ed uscita di curva che dipendono dal *side slip rate* $\dot{\beta}$ e dall'accelerazione laterale diretta \dot{v}_y , diretta conseguenza di $\dot{\beta}$; si è giunti, quindi, alla conclusione che la migliore strategia da applicare è quella di riprodurle attraverso la combinazione di una traslazione laterale, con accelerazione pari a \dot{v}_y , e di una rotazione con velocità $\dot{\beta}$, sfruttando quanto appreso in fase di analisi della dinamica del PVN.

Nei paragrafi successivi, 4.3 e 4.4, verranno confrontate le due strategie in esame in modo da valutare i benefici portati da quella oggetto di tesi.

4.1 Utilizzo del PVN in piattaforma

Attraverso una rotazione di braccio d_x attorno al punto a velocità laterale nulla è possibile riprodurre esattamente la velocità laterale del centro di massa e quindi la sua variazione \dot{v}_y , riuscendo a riprodurre informazioni sullo stato di aderenza degli pneumatici.

Utilizzando la formula fondamentale della cinematica dei corpi rigidi è, in-

fatti, possibile ottenere:

$$V_G = V_{PVN} + \dot{\psi} \times d \quad (4.1)$$

con

$$d = \begin{bmatrix} -d_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

ed in particolare

$$vy = -d_x \dot{\psi} \quad (4.3)$$

$$\dot{v}_y = -\dot{d}_x \dot{\psi} - d_x \ddot{\psi}. \quad (4.4)$$

Quindi l'idea è quella di implementare nel MCA tale strategia con lo scopo di ottenere un'accelerazione sul centro di massa dell'abitacolo della piattaforma pari a \dot{v}_y , attraverso una rotazione con velocità angolare $\dot{\psi}_p$ attorno al PVN, e combinare ad essa il termine relativo all'accelerazione centripeta. Ciò consentirebbe di preservare le informazioni riguardanti alla fase transitoria della manovra e di gestire la fase di *steady-state* sfruttando il contributo dato dal sistema video e dal sedile attivo.

Come spiegato nel paragrafo 1.2, il segnale relativo alla velocità di imbardata viene manipolato attraverso l'utilizzo di un filtro passa-alto in modo da rimuovere gli spostamenti in bassa frequenza che non sarebbero realizzabili a causa del ridotto spazio di lavoro, di conseguenza viene trattenuta solo la componente transitoria di tale velocità angolare.

A causa di quanto detto, si presenta un problema di compatibilità di informazioni in caso di una rotazione attorno al PVN di braccio d_x , come definito in eq. 2.17. Il braccio di rotazione è inversamente proporzionale alla $\dot{\psi}$ e viene calcolato utilizzando il segnale originale, di conseguenza effettuare una rotazione di tale velocità angolare non consente di ottenere l'accelerazione laterale desiderata. La velocità di imbardata che viene riprodotta in piattaforma e quella di partenza non sempre sono di segno concorde e ciò potrebbe portare ad avere un'accelerazione laterale in verso opposto rispetto a quella voluta. Tale effetto, inoltre, provocherebbe cinetosi poiché i piloti sono particolarmente sensibili alle accelerazioni lineari di segno opposto rispetto a quanto ci si aspetti, sensibilità che non si manifesta per le velocità angolari.

4.2 Dinamica del Side Slip in piattaforma

A causa dei problemi di fattibilità dell'utilizzo del PVN in piattaforma, si è reputato necessario rielaborare l'idea di partenza focalizzandosi sulle infor-

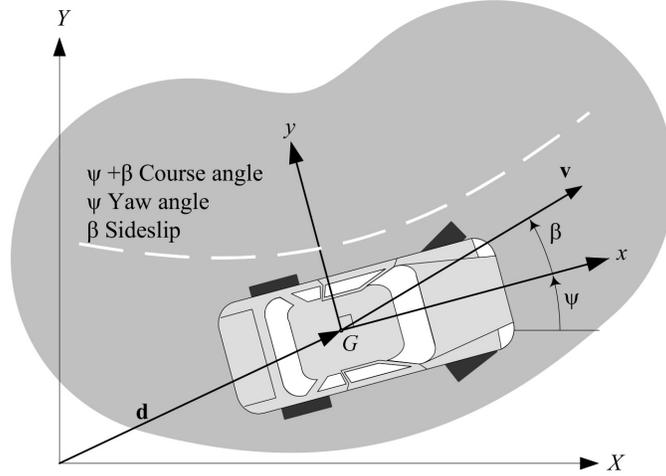


Figura 4.1: Vista dall'alto per mostrare l'angolo di imbardata ψ tra gli assi x e X , l'angolo di *side slip* β tra il vettore velocità V_G e l'asse longitudinale x , e il *course angle* $\nu = \beta + \psi$ tra il vettore velocità V_G e l'asse X del sistema di riferimento globale [15].

mazioni legate all'angolo di *side slip* e sullo stato di aderenza degli pneumatici, informazioni che vengono trasmesse al pilota attraverso la variazione del centro di rotazione.

A causa dello spazio ridotto della piattaforma, durante la simulazione bisogna dare priorità alla riproduzione dell'attitudine del veicolo rispetto a quella del suo comportamento globale. Ciò consente al pilota di poter valutare, anche in fase di simulazione, i cambiamenti di comportamento della vettura e quindi di poterla controllare in modo realistico.

La chiave per ottenere quanto desiderato è la riproduzione della variazione dell'angolo di *side slip* e del suo effetto sull'accelerazione laterale.

Come spiegato nel paragrafo 2.1.3, l'accelerazione laterale diretta dipende dal *side slip rate* e, specialmente per quanto riguarda l'informazione a dinamica veloce, è proporzionale ad esso e contiene, quindi, le informazioni legate al comportamento degli pneumatici durante le fasi transitorie della manovra.

Poiché tale accelerazione non può essere riprodotta attraverso una rotazione attorno al PVN, si è deciso di restituirne l'effetto tramite una traslazione laterale accoppiata ad una rotazione con velocità pari al *side slip rate*, evitando il problema numerico introdotto nel paragrafo 4.1.

L'angolo di *side slip*, come fatto notare da Garrett in [16], rientra tipica-

mente entro i limiti della piattaforma poiché è generalmente minore di 10° e, di conseguenza, può essere riprodotto senza la necessità di applicare un filtro passa-alto al segnale del *side slip rate* che si vuole riprodurre. Ciò vale anche per quello relativo all'accelerazione laterale diretta \dot{v}_y che, nella maggior parte dei casi, per essere riprodotta necessita di uno spostamento che non eccede i limiti dello spazio di lavoro, per cui non necessita di un filtraggio elevato che porterebbe ad una perdita di informazione. Ovviamente tale caratteristica dipende dal veicolo simulato e, conseguentemente, nell'algoritmo verrà previsto un filtro passa-alto nella fase di pre-scaling che consenta di eliminare le dinamiche che non possono essere riprodotte; esso potrà essere tarato in base alle caratteristiche della vettura, al tipo di pista simulata e in base alla sensibilità del pilota.

Contrariamente a quanto effettuato da Garrett in [16] che attribuisce al sistema grafico l'onere di fornire al pilota le informazioni relative alla velocità di imbardata, si ritiene che sia necessario combinare al β una rotazione in grado di restituire le informazioni in alta frequenza che riguardano il comportamento globale della vettura, cioè alla $\dot{\psi}$.

Per tale scopo è possibile utilizzare la relazione tra l'angolo di imbardata, l'angolo di *side slip* e quello tra la traiettoria percorsa dal veicolo e il sistema di riferimento globale, detto *course angle* e indicato con ν (fig. 4.1) ed esprimere ψ come differenza tra gli altri due angoli:

$$\psi = \nu - \beta. \quad (4.5)$$

Effettuando una analisi simile a quella utilizzata per l'accelerazione laterale diretta, attraverso il supporto della figura 4.2, è possibile notare come la variazione del *course angle* (*course rate*) contenga soprattutto la componente in bassa frequenza della velocità di imbardata, mentre il *side slip rate* contenga buona parte di quella in alta frequenza.

Sfruttando l'equazione 4.5 si è quindi deciso di effettuare una rotazione pari alla combinazione dell'angolo di *side slip* e del *course angle*, della quale viene riprodotta solo la componente in alta frequenza. Nell'algoritmo di MC presentato i due termini, infatti, sono gestiti diversamente in modo da mantenere controllato l'utilizzo dell'area di lavoro e allo stesso tempo di preservare le informazioni legate all'attitudine della vettura.

Un ragionamento analogo è stato effettuato per il MC dell'accelerazione laterale, infatti, anche in questo caso si ritiene necessario combinare l'informazione contenuta nell'accelerazione laterale diretta con la componente in alta frequenza dell'accelerazione centripeta in modo da restituire al pilota un'informazione completa nelle fasi della manovra a dinamica veloce.

Nel paragrafo 2.1.3 è stato mostrato come tale termine a media nulla possa

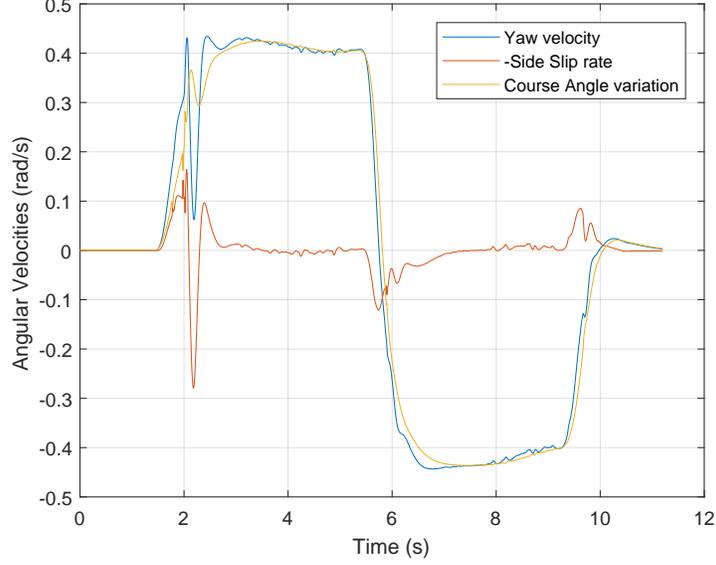


Figura 4.2: Velocità angolari relative ad una doppia curva ad S effettuata con una vettura GT

avere un andamento opposto rispetto all'accelerazione totale, cioè quella che il pilota si aspetta di percepire, per cui è necessario combinarlo alla componente in alta frequenza dell'accelerazione centrifuga $v_x \dot{\psi}$ per prevenire la cinetosi causata dalla sensibilità umana in caso di spostamenti opposti a quelli aspettati.

Riassumendo, la strategia individuata consente di riprodurre totalmente il comportamento locale del veicolo, cioè la sua attitudine, e la componente transitoria del comportamento globale dello stesso, quindi i segnali di riferimento in piattaforma saranno:

$$\begin{cases} a_y^p = k_1 \dot{v}_y + k_2 HP(v_x \dot{\psi}) \\ \dot{\psi}^p = -k_\beta \dot{\beta} + k_\nu HP(\dot{v}) \end{cases} \quad (4.6)$$

dove k_1 , k_2 , k_β e k_ν sono dei fattori di scala che consentono di adattare l'ampiezza del segnale alle esigenze del pilota e al tipo di vettura e pista utilizzate in fase di simulazione. Come spiegato precedentemente, infatti, non è possibile ricreare totalmente il moto e di conseguenza il fattore di scala va adattato al tipo di simulazione che si vuole effettuare. Ad esempio un veicolo da corsa necessiterà di un fattore di scala più restrittivo rispetto a quello

utilizzato per un veicolo stradale poiché raggiunge delle accelerazioni lineari e velocità angolari maggiori, che non rientrano nei limiti della piattaforma.

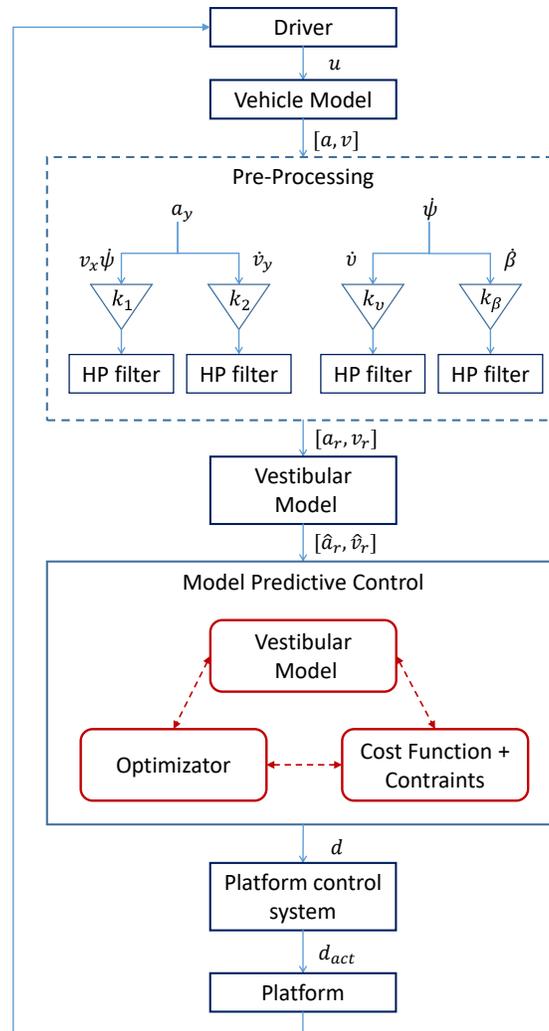


Figura 4.3: Schema dell’algoritmo di Motion Cueing basato sul MPC in cui i termini che compongono l’accelerazione laterale e la velocità di imbardata vengono gestiti separatamente al fine di preservare le informazioni transitorie relative allo stato del veicolo in fase di curva.

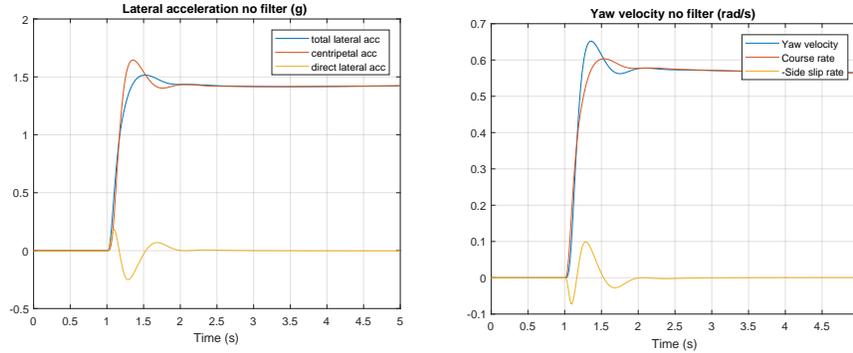


Figura 4.4: Accelerazione laterale e velocità di imbardata in una doppia curva ad S, di raggio pari a $20m$, effettuato al limite di aderenza con una vettura GT.

4.3 Confronto tra MCA

In questo paragrafo si vuole effettuare un primo confronto tra la strategia di MC precedentemente presentata, che chiameremo Yaw Dynamics, e quella di partenza. In entrambi i casi sono inizialmente escluse le problematiche di gestione dell'area di lavoro poiché l'obiettivo iniziale è quello di analizzare le differenze tra i due approcci e valutare l'eventuale miglioramento introdotto da quella oggetto del lavoro di tesi.

Nelle figure 4.5 e 4.6 sono stati riportati i segnali di riferimento, ottenuti dai due MCA, per il controllore del moto della piattaforma relativi all'accelerazione laterale e alla velocità di imbardata di un gradino di sterzo di 90° effettuato ad una velocità di percorrenza pari a $25m/s$ con una vettura GT. Chiaramente, in entrambi i MCA, la componente a dinamica lenta dei segnali di interesse non può essere riprodotta per non eccedere i limiti dell'area di lavoro, in particolare è stato utilizzato un filtro passa-alto con frequenza di taglio pari a $0.5Hz$.

Focalizzandosi sul segnale di riferimento per la piattaforma relativo all'accelerazione laterale è evidente come, grazie alla nuova strategia, questo mostri nella prima fase della manovra una pendenza maggiore rispetto a quello generato dal MCA di partenza, raggiungendo il picco di accelerazione $30ms$ prima e con un'ampiezza maggiore; ciò permette di ottenere una risposta più reattiva da parte della piattaforma agli input di sterzo in fase di guida. Dopo il raggiungimento del picco di accelerazione è possibile notare un calo di ampiezza dovuto al sovrasterzo manifestato in questa manovra; è possibile

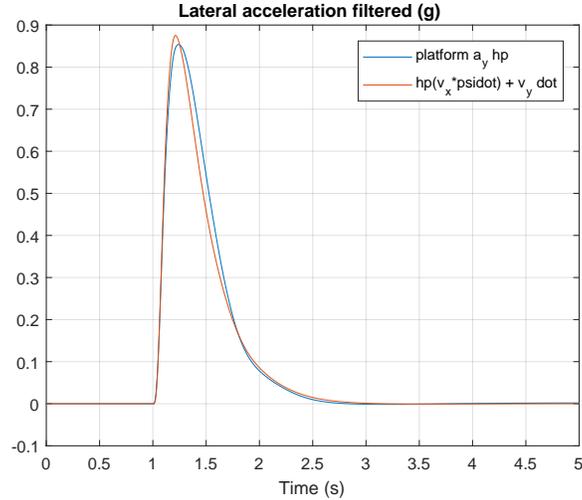


Figura 4.5: Confronto tra l’accelerazione laterale generata con la Yaw Dynamics e quella ottenuta con il MCA di partenza in caso di un gradino di sterzo di 90° effettuato con una velocità di percorrenza pari a 25m/s con una vettura GT.

individuare tale comportamento anche attraverso il segnale della velocità di imbardata che presenta un picco seguito da un calo repentino [21].

La risposta della Yaw Dynamics è pari ad una diminuzione di accelerazione più rapida concorde con la sensazione che si ha durante l’esperienza di guida in cui viene percepita un’improvvisa perdita di accelerazione laterale. Questo accade a causa della \dot{v}_y che viene riprodotta tale e quale senza essere filtrata consentendo di mantenere inalterata la risposta degli pneumatici e quindi il comportamento in sovrasterzo della vettura.

In fase di sovrasterzo l’accelerazione laterale diretta \dot{v}_y presenta un andamento opposto rispetto a quella centripeta $v_x\dot{\psi}$ (figura 4.7), ciò provoca la sensazione del pilota di muoversi in direzione opposta rispetto al centro della curva e tale sensazione verrà stimolata grazie ad una maggiore pendenza del segnale di accelerazione laterale generato.

Per quanto riguarda la velocità di imbardata, anche in questo caso, si manifesta un picco maggiore in ampiezza ma in ritardo rispetto al MCA di partenza, causato dal termine non filtrato.

Data la complessità del sistema percettivo umano è soltanto attraverso dei test sperimentali che è possibile valutare l’efficacia della Yaw Dynamics, infatti, non si è in grado di stabilire quanto la rapidità di risposta e la varia-

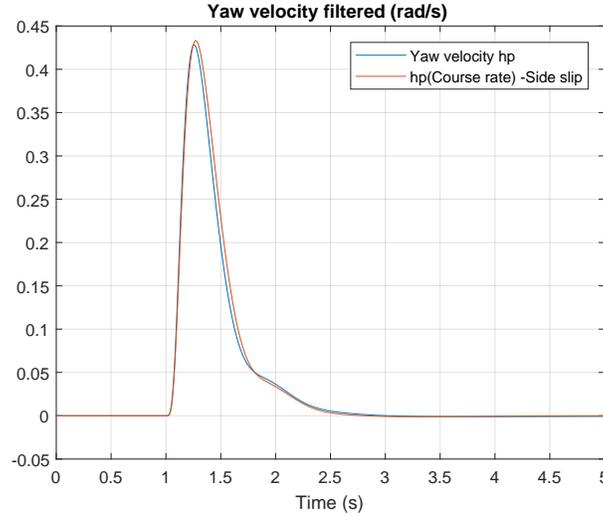


Figura 4.6: Confronto tra la velocità di imbardata generata con la Yaw Dynamics e quella ottenuta con il MCA di partenza in caso di un gradino di sterzo di 90° effettuato con una velocità di percorrenza pari a $25m/s$ con una vettura GT.

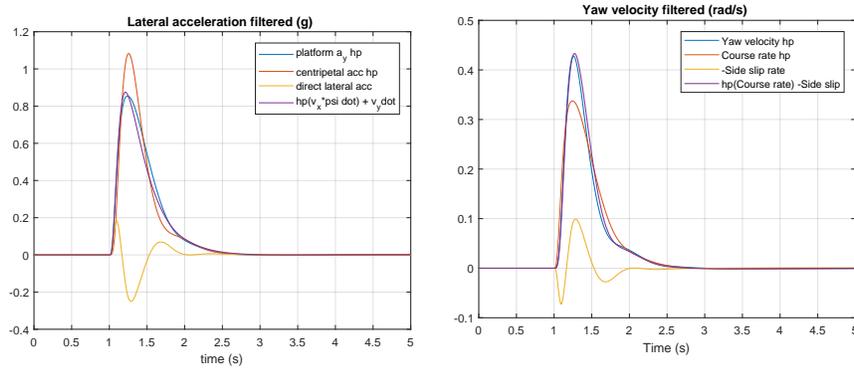


Figura 4.7: Confronto tra l'accelerazione laterale e la velocità di imbardata generate con i due MCA, in cui vengono esplicitati i termini dei segnali di riferimento, in caso di un gradino di sterzo di 90° effettuato con una velocità di percorrenza pari a $25m/s$ con una vettura GT.

zione dell'ampiezza vengano percepite durante la guida e se la strategia sia in grado di provocare sensazioni più naturali rispetto a quella di partenza.

4.4 Confronto tra MCA in piattaforma

Obiettivo del seguente paragrafo è quello di mostrare le differenze tra i due diversi MCA attraverso un'analisi dei segnali che verranno utilizzati come riferimenti dal controllore della piattaforma. È importante sottolineare che per la generazione dei segnali viene tenuto conto dei limiti degli attuatori e dello spazio di lavoro.

Per l'analisi verrà utilizzata una doppia curva ad S (fig. 4.8 e 4.9), con raggio pari a $20m$, effettuata al limite di aderenza con una vettura GT, in cui, grazie all'aiuto del segnale di sterzo, è possibile notare il comportamento sovrasterzante del veicolo durante tutta la manovra. Come spiegato in precedenza, per poter riprodurre in piattaforma i segnali di interesse è necessario manipolarli attraverso l'uso di fattori di scala e filtri passa-alto, i cui valori vengono riportati in tabella 4.1.

Per questo tipo di vettura viene tipicamente utilizzato un filtro passa-alto

	MPC di partenza	Yaw Dynamics
k_1	–	0.5
k_2	–	0.5
$k_{\dot{v}}$	–	1
$k_{\dot{\beta}}$	–	1
k_{a_y}	0.5	–
$k_{\dot{\psi}}$	1	–
$HP_{\dot{v}_y}$	–	$0Hz$
$HP_{v_x \dot{\psi}}$	–	$0.5Hz$
$HP_{\dot{v}}$	–	$0.5Hz$
$HP_{\dot{\beta}}$	–	$0Hz$
HP_{a_y}	$0.5Hz$	–
$HP_{\dot{\psi}}$	$0.5Hz$	–

Tabella 4.1: Parametri utilizzati in fase di pre-scaling per la generazione dei riferimenti per la piattaforma relativi ai due algoritmi di MC

con frequenza di taglio pari a $0.5Hz$ poiché è la più bassa frequenza che consente di non eccedere i limiti della piattaforma, ma con l'applicazione della strategia in esame è possibile riprodurre parte della componente in bassa

frequenza relativa all'attitudine del veicolo grazie alle caratteristiche del *side slip rate* e dell'accelerazione laterale diretta.

Andando ad analizzare il segnale di riferimento relativo all'accelerazione laterale è possibile distinguere le differenze tra le due strategie specialmente nell'intervallo di tempo $t \in [4, 5.6]s$. In particolare, è possibile notare come il segnale generato con il cueing di partenza mostri una crescita lineare, quindi un jerk costante, mentre con la Yaw Dynamics si abbia una variazione di pendenza legata alla correzione di sterzo effettuata dal pilota che consente di percepire meglio il fatto che, dopo questa correzione, il veicolo cominci a riguadagnare aderenza e quindi accelerazione laterale.

È importante sottolineare che, grazie alla nuova strategia, la brusca variazione di pendenza che risultava fastidiosa durante la guida e che veniva percepita come una frustata, viene attenuata presentando un comportamento più fluido e più concorde con il comportamento naturale del veicolo.

Per quanto riguarda la velocità di imbardata è evidente un incremento della stessa in concomitanza dei picchi dovuti al sovrasterzo e una maggiore diminuzione in fase di risposta alla correzione effettuata, comportamento che potrebbe portare il pilota a percepire una rotazione più veritiera.

Per completezza vengono, inoltre, riportati gli spostamenti relativi ai due gradi di libertà di interesse generati dai due MCA, figura 4.10, che rientrano perfettamente nei limiti della piattaforma.

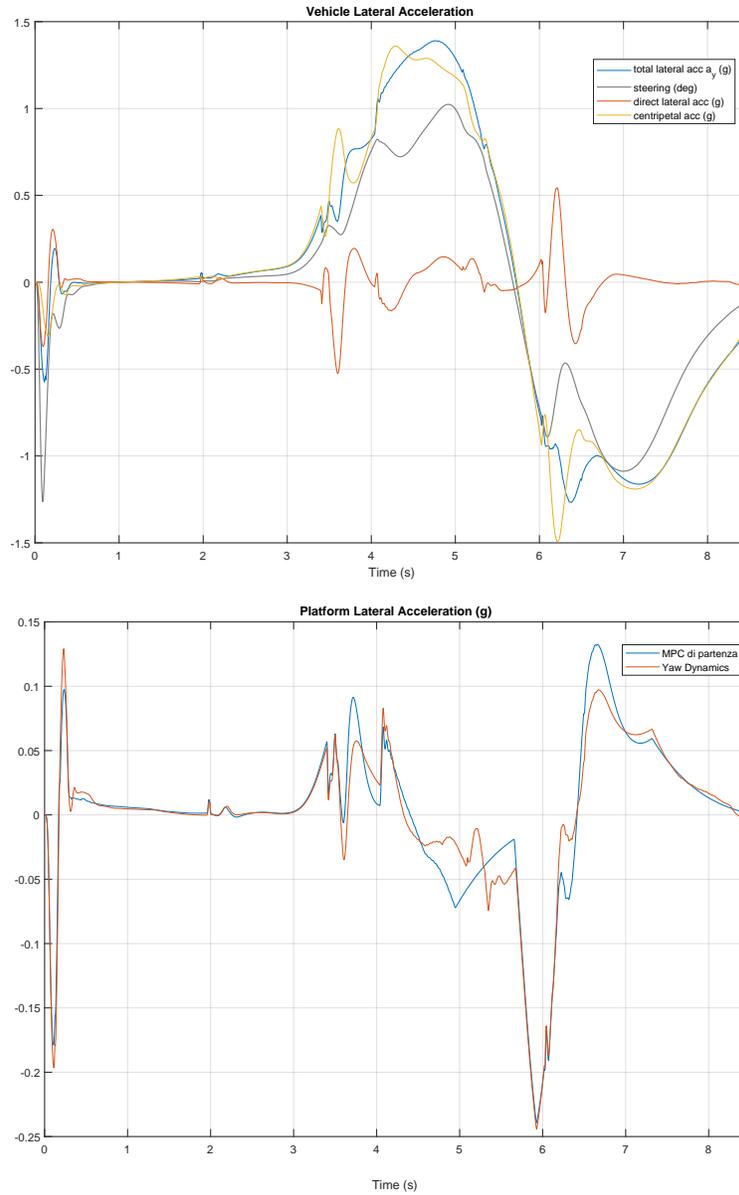


Figura 4.8: Confronto tra l'accelerazione laterale generata con la Yaw Dynamics e quella ottenuta con il MCA di partenza in caso di una doppia curva ad S, di raggio pari a $20m$, effettuato al limite di aderenza con una vettura GT.

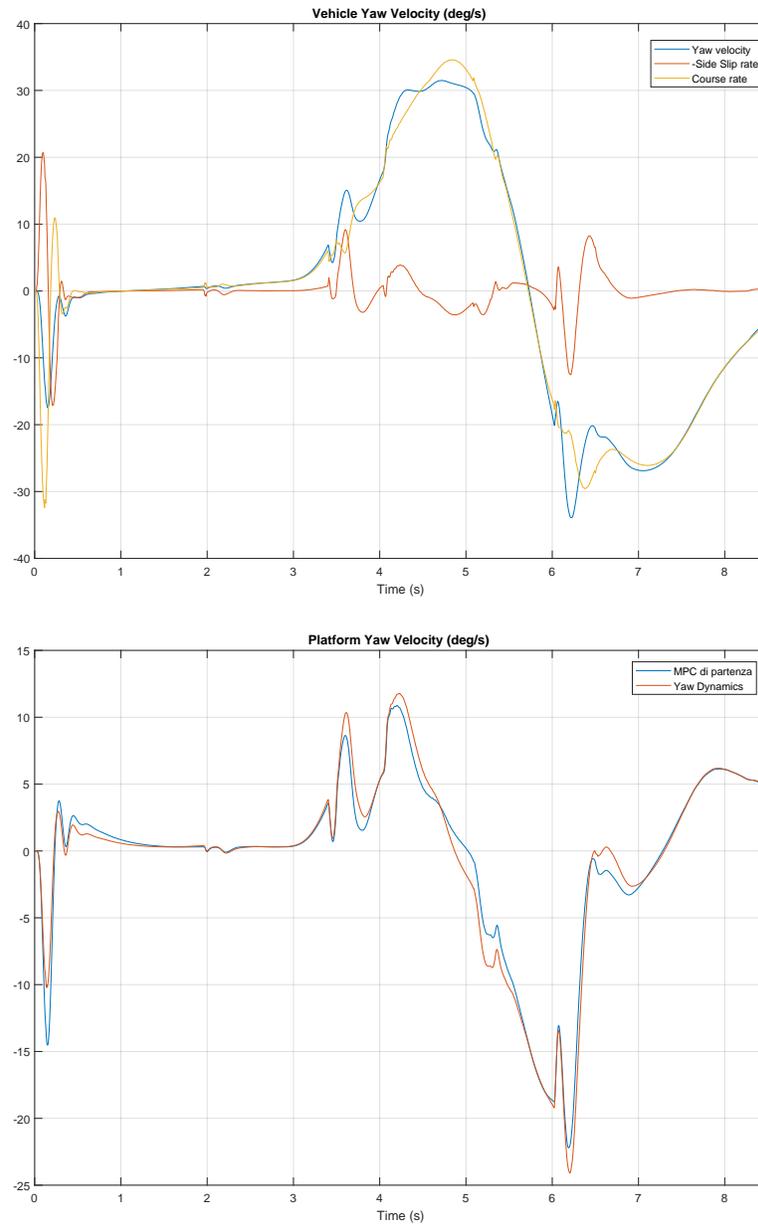


Figura 4.9: Confronto tra la velocità di imbardata generata con la Yaw Dynamics e quella ottenuta con il MCA di partenza in caso di una doppia curva ad S, di raggio pari a $20m$, effettuato al limite di aderenza con una vettura GT.

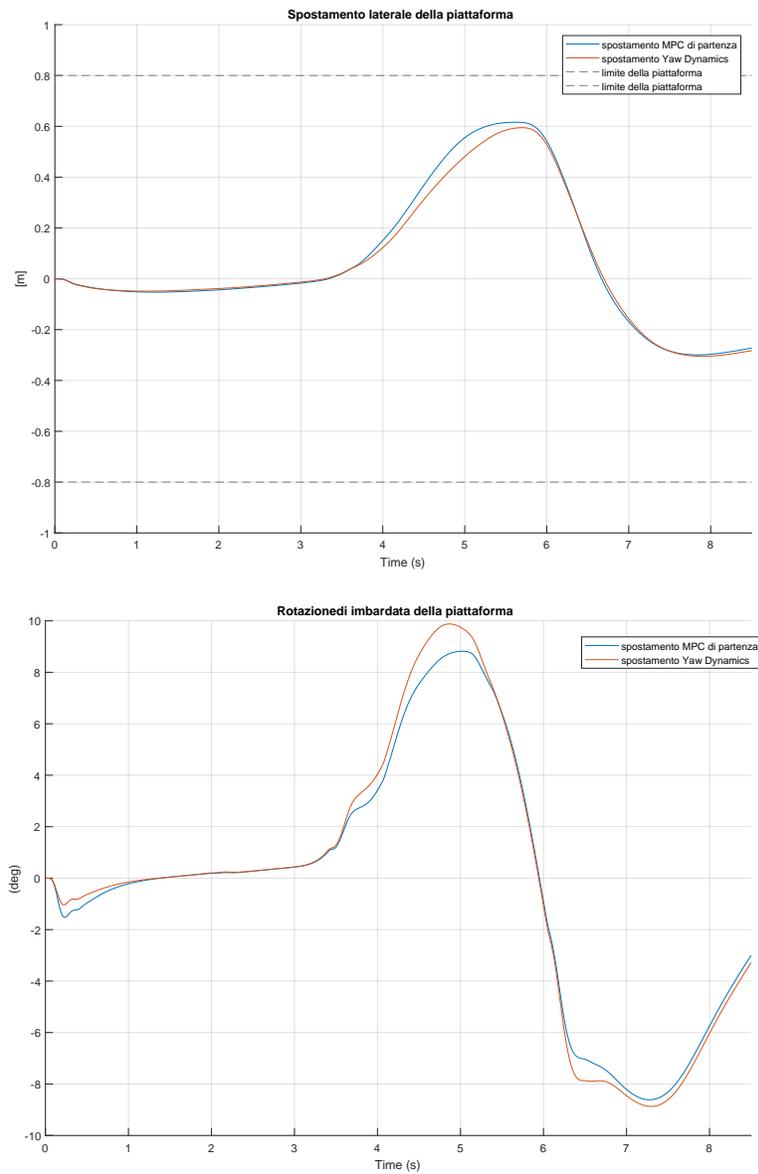


Figura 4.10: Confronto tra gli spostamenti laterali e angolari di imbardata della piattaforma generati dai due MCA in caso di una doppia curva ad S, di raggio pari a $20m$, effettuato al limite di aderenza con una vettura GT.

Capitolo 5

Taratura dei parametri in ambiente sperimentale

A causa della presenza del pilota nella catena di controllo, l'unico modo per valutare l'efficacia della Yaw Dynamics è quello di far effettuare a dei piloti esperti dei test sperimentali sul simulatore e di raccogliere le loro opinioni sui cambiamenti apportati dalla strategia.

Nel paragrafo 5.1 verranno inizialmente illustrati i parametri utilizzati per la taratura della strategia, nei paragrafi seguenti (5.2 e 5.3), verranno descritti i test effettuati rispettivamente su slalom e su pista e, inoltre, verranno presentati gli effetti della Yaw Dynamics che verranno poi approfonditi nel paragrafo 5.4.

5.1 Configurazione parametri

Per effettuare i test evitando i tempi di riconfigurazione dell'algoritmo è stato previsto un setup dei parametri, utilizzati per la manipolazione dei segnali in fase di pre-scaling, che fosse compatibile con i due MCA in esame.

Al fine di velocizzare la fase di test (fig. 5.1) sono state sfruttate le equazioni introdotte nei capitoli precedenti, in particolare eq.2.11 e eq.4.5, in cui sono stati inseriti i fattori $k_{\dot{\beta} in}$ e $k_{\dot{v}_y in}$ che hanno lo scopo di agevolare il passaggio da un MCA all'altro.

$$\begin{cases} a_y &= v_x \dot{\psi} - k_{\dot{v}_y in} \dot{v}_y + k_{\dot{v}_y out} \dot{v}_y \\ \dot{\psi} &= \dot{v} + k_{\dot{\beta} in} \dot{\beta} - k_{\dot{\beta} out} \dot{\beta} \end{cases} \quad (5.1)$$

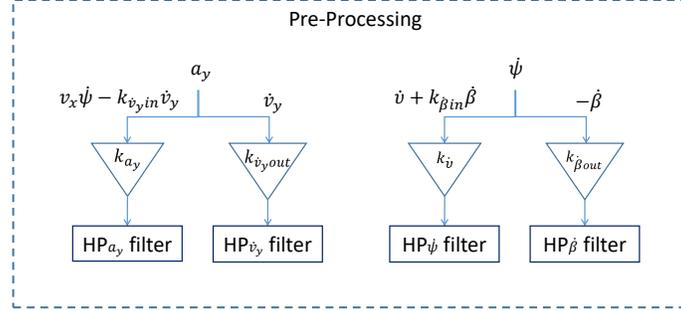


Figura 5.1: Struttura del setuo dei parametri utilizzato in fase di test sperimentali.

Essi avranno un valore nullo in fase di test della Yaw Dynamics e unitario per il MCA di partenza, mentre i parametri $k_{\dot{\beta} out}$ e $k_{\dot{v}_y out}$ assumeranno valori diversi da zero per la Yaw Dynamics e nulli in caso contrario.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva per la taratura dei parametri per la gestione del passaggio da un MCA all'altro.

Prova	$k_{\dot{v}_y in}$	$k_{\dot{v}_y out}$	$k_{\dot{\beta} in}$	$k_{\dot{\beta} out}$
Yaw Dynamics	0	$0 \div 1$	0	$0 \div 1$
MPC originale	1	0	1	0

Tabella 5.1: Configurazioni dei parametri per le due strategie di MCA.

5.2 Taratura su slalom

Obiettivo di questa prima fase di test è quello di valutare la Yaw Dynamics e tararne i parametri per individuare il range più efficace nell'uso sperimentale. I test sono stati effettuati con un veicolo GT stradale, vettura a trazione posteriore con attitudine al sottosterzo, effettuando degli slalom in modo poter forzare facilmente sia il sottosterzo che il sovrasterzo e valutare l'effetto della strategia sulle sensazioni di guida in fase di perdita del controllo.

In tabella 5.2 sono state riportate le configurazioni dei parametri utilizzate in questa prima fase.

Essendo il termine \dot{v}_y strettamente legato al *side slip rate* $\dot{\beta}$ si è deciso di utilizzare, inizialmente, gli stessi fattori di scala con l'obiettivo di mantenere un'informazione coerente legata a questi due termini.

Prova	k_{a_y}	HP_{a_y}	$k_{\dot{\psi}}$	$HP_{\dot{\psi}}$	$k_{\dot{v}_y in}$	$k_{\dot{v}_y out}$	$HP_{\dot{v}_y}$	$k_{\dot{\beta} in}$	$k_{\dot{\beta} out}$	$HP_{\dot{\beta}}$
1	0.5	0.6Hz	1	0.5Hz	1	0	—	1	0	—
2	0.5	0.6Hz	1	0.5Hz	0	0.5	0.1Hz	0	0.5	0.1Hz
3	0.5	0.6Hz	1	0.5Hz	0	0.3	0.1Hz	0	0.3	0.1Hz
4	0.5	0.6Hz	1	0.5Hz	0	0.3	—	0	0.3	—
5	0.5	0.6Hz	1	0.5Hz	0	0.5	—	0	0.5	—
6	0.5	0.6Hz	1	0.5Hz	0	0.3	0.1Hz	0	-0.3	0.1Hz
7	0	—	0	—	0	0.3	—	0	0.3	—

Tabella 5.2: Configurazioni dei parametri provate in fase di test per la valutazione della Yaw Dynamics in caso di slalom.

I piloti hanno notato, fin dalla prima configurazione provata della Yaw Dynamics, una maggiore capacità di riconoscere il comportamento sovrasterzante del veicolo riuscendo a percepire un movimento più naturale e concorde a quanto mostrato dal sistema grafico.

Inoltre, come visibile dalle configurazioni provate, hanno espresso una preferenza per il fattore di scala per l'accelerazione laterale diretta e per il *side slip rate* pari a 0.3 affermando di sentire un comportamento più fluido e naturale della vettura che ne agevola il controllo e preferendolo al fattore di scala 0.5, che è stato ritenuto disomogeneo tra le varie fasi di guida.

Per quanto riguarda il filtraggio di questi due termini, invece, durante la prima fase di test, è stata espressa una preferenza nei confronti della versione non filtrata poiché, a detta dei piloti, questa consente di agevolare la gestione della vettura durante lo slalom tra i coni.

Nella sesta prova è stata valutata una configurazione con un il segno della $\dot{\beta}$ invertito al fine di valutare quanto provato da Garrett in [16]. Nell'algoritmo presentato in tale lavoro, in cui l'angolo di *side slip* viene utilizzato come segnale di riferimento per la piattaforma, viene mantenuta la convenzione di segno utilizzata durante lo studio della dinamica del veicolo; ciò porta ad una rotazione in verso opposto rispetto a quanto aspettato dal pilota che ha affermato di percepire un comportamento insolito della vettura durante la prova causando l'interruzione del test per prevenire la cinetosi. È possibile, quindi, affermare che la sua reazione fisica dimostri la validità dalla convenzione utilizzata nella Yaw Dynamics.

Infine, è stata provata una configurazione in cui vengono restituiti al pilota solo il *side slip rate* e il suo effetto sull'accelerazione laterale (cioè la \dot{v}_y), in modo da valutare se, come affermato da Garrett in [16], le informazioni visive possano essere sufficienti per la restituzione delle informazioni sul comportamento globale della vettura; in tale caso il pilota ha lamentato un'incongruenza tra il comportamento della vettura percepito e quanto

mostrato dal sistema grafico, sottolineando la necessità di dovergli restituire oltre alle informazioni relative al comportamento locale del veicolo anche quelle relative al suo comportamento globale.

5.3 Taratura su pista

Vista la positività dei test effettuati durante lo slalom si è deciso di provare il comportamento su pista per valutare la reattività della strategia in diverse condizioni di guida e tipi di curva. Per questo tipo di test sono state utilizzate due diverse vetture, una GT stradale e un Suv sportivo, e il circuito utilizzato è una versione digitale dello Short Hockenheimring (fig.5.2), poiché è un tracciato corto che presenta vari tipi di curva e che quindi dà la possibilità di valutare il MCA in diverse condizioni.

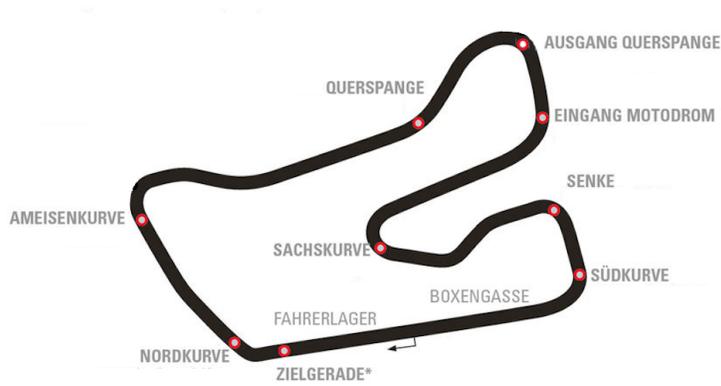


Figura 5.2: Short Hockenheimring

Prova	k_{a_y}	HP_{a_y}	$k_{\dot{\psi}}$	$HP_{\dot{\psi}}$	$k_{\dot{v}_y in}$	$k_{\dot{v}_y out}$	$HP_{\dot{v}_y}$	$k_{\dot{\beta} in}$	$k_{\dot{\beta} out}$	$HP_{\dot{\beta}}$
1	0.4	0.8Hz	1	0.5Hz	1	0	—	1	0	—
2	0.4	0.8Hz	1	0.5Hz	0	0.2	0.01Hz	0	0.2	0.01Hz
3	0.4	0.8Hz	1	0.5Hz	0	0.1	0.01Hz	0	0.1	0.01Hz
4	0.4	0.8Hz	1	0.5Hz	0	0.2	0.1Hz	0	0.2	0.1Hz
5	0.4	0.8Hz	1	0.5Hz	0	0.2	0.2Hz	0	0.2	0.2Hz

Tabella 5.3: Configurazioni dei parametri provate in fase di test per la valutazione della Yaw Dynamics durante le prova su pista con un Suv sportivo.

I piloti hanno affermato di percepire un comportamento più fluido e naturale nella fase di ingresso curva rispetto a quanto accadeva utilizzando il MCA di partenza. Come discusso nel paragrafo 4.4, la brusca variazione di pendenza del segnale di accelerazione viene attenuata facendo sì che si abbia un comportamento più fluido e più concorde a quello naturale del veicolo e che si eviti la sensazione di ricevere una frustata precedentemente percepita dal pilota. Anticipando l'informazione che viene fornita dal sistema grafico si ha una migliore percezione del sovrasterzo che permette una più facile gestione della vettura.

Inoltre, viene compensata la mancanza di informazioni relative al comportamento sovrasterzante o sottosterzante del veicolo che, talvolta, si manifestava con il cuicing di partenza e che costringeva i piloti a gestire la manovra soprattutto grazie alla loro esperienza sul simulatore; durante alcune manovre, infatti, i piloti si trovavano ad anticipare la loro reazione alla perdita di controllo pur non percependo informazioni dal movimento della piattaforma e anticipando quelle fornite dal sistema grafico.

Dai test effettuati è possibile provare come l'informazione aggiuntiva in bassa frequenza relativa al comportamento locale della vettura permetta una migliore percezione del suo stato e quindi un'esperienza di guida più realistica. Uno dei piloti ha affermato che: "Anche solo una componente aggiuntiva del 10% permette di sentire un movimento più naturale della cassa specialmente in fase di riposizionamento della vettura in uscita di curva".

Inoltre, i piloti hanno affermato di sentire in modo eccessivo, rispetto agli altri termini in gioco, la variazione di bilanciamento tra l'aderenza all'anteriore e quella al posteriore del veicolo in caso di fattori di scala $k_{\dot{\beta} out}$ e $k_{\dot{v}_y out}$ maggiori di 0.3. Va però sottolineato il fatto che le configurazioni che vengono preferite portano ad avere una componente in alta frequenza sbilanciata verso i termini relativi all'accelerazione centripeta e al *course rate*.

Ad esempio, nella configurazione utilizzata durante la quinta prova, preferita rispetto alle altre, al termine relativo all'accelerazione laterale diretta \dot{v}_y viene applicato un fattore di scala pari a 0.2 mentre all'accelerazione centripeta viene applicato un fattore di scala 0.4. Lo stesso vale per i termini riguardanti la velocità di imbardata, e si ottiene, quindi, la configurazione seguente relativa all'informazione in alta frequenza:

$$\begin{cases} a_y &= 0.4v_x\dot{\psi} + 0.2\dot{v}_y \\ \dot{\psi} &= \dot{v} - 0.2\dot{\beta} \end{cases} \quad (5.2)$$

Rimuovere le componenti \dot{v}_y e $\dot{\beta}$ per la gestione degli spostamenti riguardanti il comportamento in alta frequenza per poi riprodurle separatamente

porta ad una soluzione non efficace al fine di riprodurre in modo coerente il comportamento locale e globale della vettura. Di conseguenza si è mostrato necessario combinare la Yaw Dynamics alla strategia di partenza in modo da sfruttare i benefici portati dalla prima per quanto riguarda l'informazione in bassa frequenza e l'informazione coerente tra i termini della seconda strategia in alta frequenza. Per far ciò si è, quindi, deciso di sfruttare la configurazione utilizzata in fase di test tarando i parametri $k_{\dot{\beta}in}$ e $k_{\dot{v}_y in}$ in modo da ottenere, in alta frequenza, gli stessi guadagni tra i termini che compongono l'accelerazione laterale e la velocità di imbardata.

5.4 Analisi miglioramenti apportati

A partire dai feedback dei piloti durante la prova sperimentale, è possibile affermare come l'implementazione della Yaw Dynamics porti maggiori benefici sul cueing dell'accelerazione laterale rispetto a quello della velocità di imbardata. Ciò è visibile anche in figura 5.3 dove sono stati riportati i segnali di velocità di imbardata generati dai due MCA relativi ad un giro di pista sullo Short Hockenheimring in cui è stato utilizzato un SUV sportivo. Per quanto riguarda la taratura dei parametri della Yaw Dynamics, sono stati applicati dei fattori di scala in cui venisse bilanciata l'informazione in alta frequenza, come spiegato in precedenza.

I segnali relativi alla velocità di imbardata appaiono piuttosto simili ed è difficile interpretare gli eventuali benefici del cueing oggetto di tesi. Va inoltre sottolineato che generalmente viene effettuato un filtraggio meno pesante sul segnale della velocità di imbardata rispetto a quello effettuato sull'accelerazione laterale, e ciò porta ad una minore perdita di informazioni.

Per quanto riguarda quest'ultima, invece, è evidente il miglioramento in bassa frequenza apportato dalla nuova strategia che consente di assecondare le variazioni della domanda di sterzo con un segnale di accelerazione laterale più reattivo.

Ad esempio, in figura 5.4, è possibile notare come la nuova strategia reagisca alla correzione di sterzo effettuata dal pilota per limitare lo scivolamento del veicolo che manifesta il sovrasterzo. La Yaw Dynamics, enfatizzando il comportamento locale del veicolo, consente di percepire l'iniziale perdita di accelerazione al manifestarsi del sovrasterzo e il successivo recupero di aderenza da parte degli pneumatici. Questa reazione è comunque poco evidente sul segnale di accelerazione laterale totale ma viene fortemente percepita dal pilota durante l'esperienza di guida reale.

Per quanto riguarda il sottosterzo è possibile notare come non vi sia un vi-

sibile miglioramento apportato dalla Yaw Dynamics, figura 5.5. Infatti, i segnali generati dai due MCA appaiono abbastanza simili, tranne che per un'oscillazione presente sul segnale generato dalla strategia oggetto di tesi causato dalla \dot{v}_y di partenza.

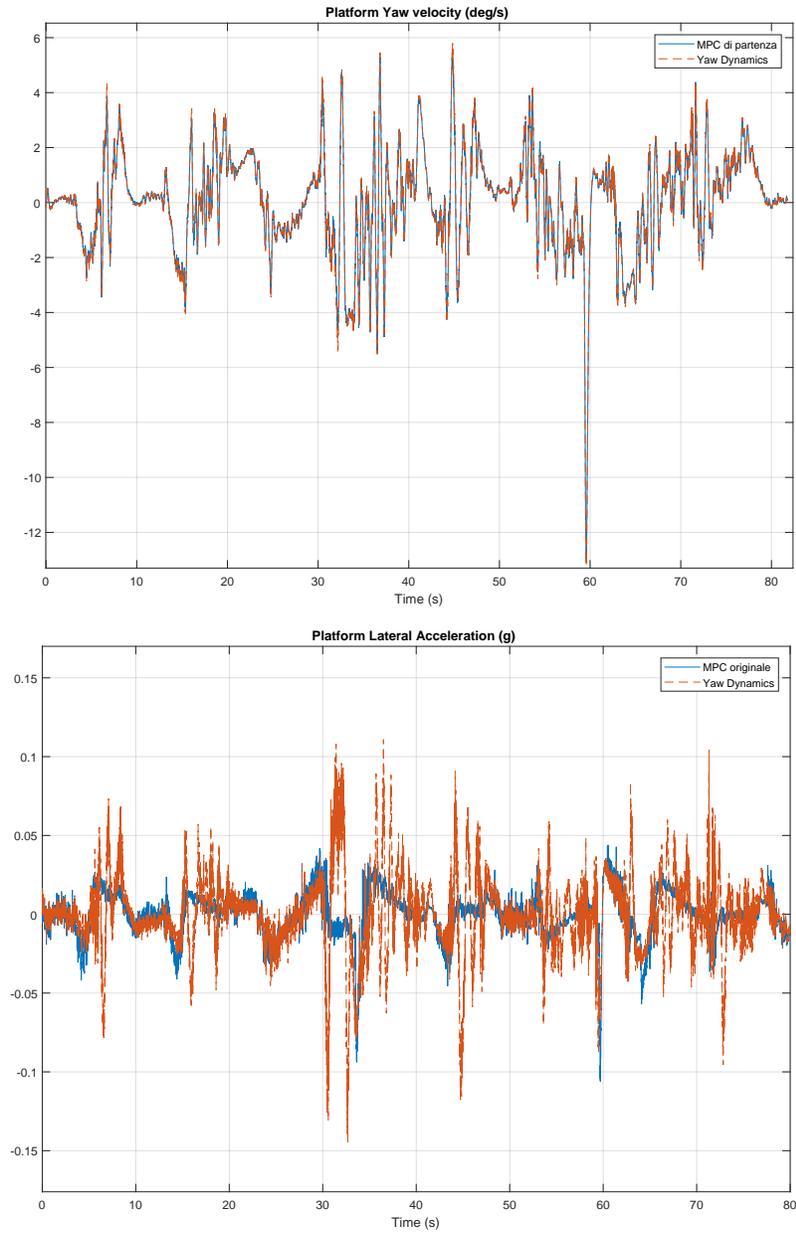


Figura 5.3: Confronto tra i segnali di interesse generati con la Yaw Dynamics e con il MCA di partenza in caso di un giro di pista sullo Short Hockenheimring effettuato con un Suv sportivo.

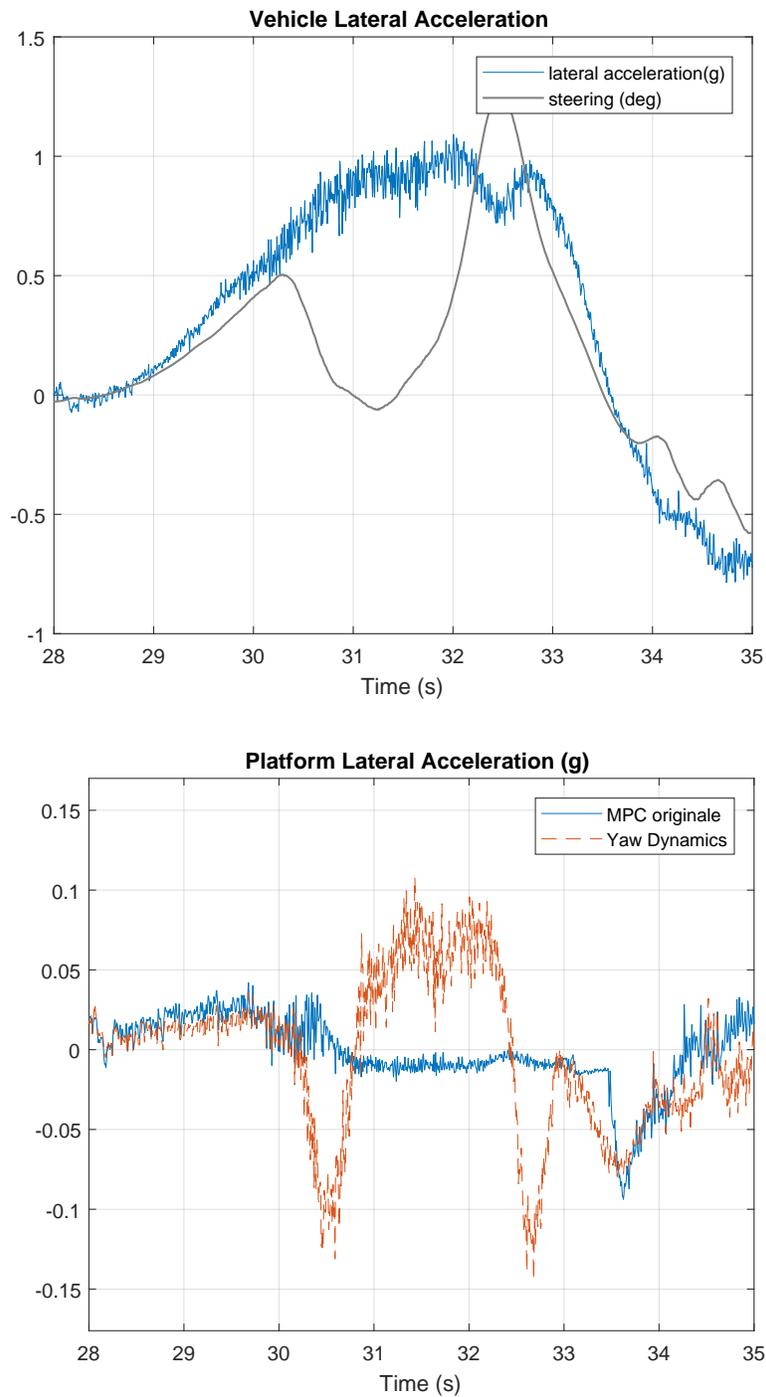


Figura 5.4: Confronto tra i segnali di accelerazione laterale generati con la Yaw Dynamics e con il MCA di partenza in caso di un giro di pista sullo Short Hockenheimring effettuato con un Suv sportivo. Focus sulla reazione al sovrasterzo.

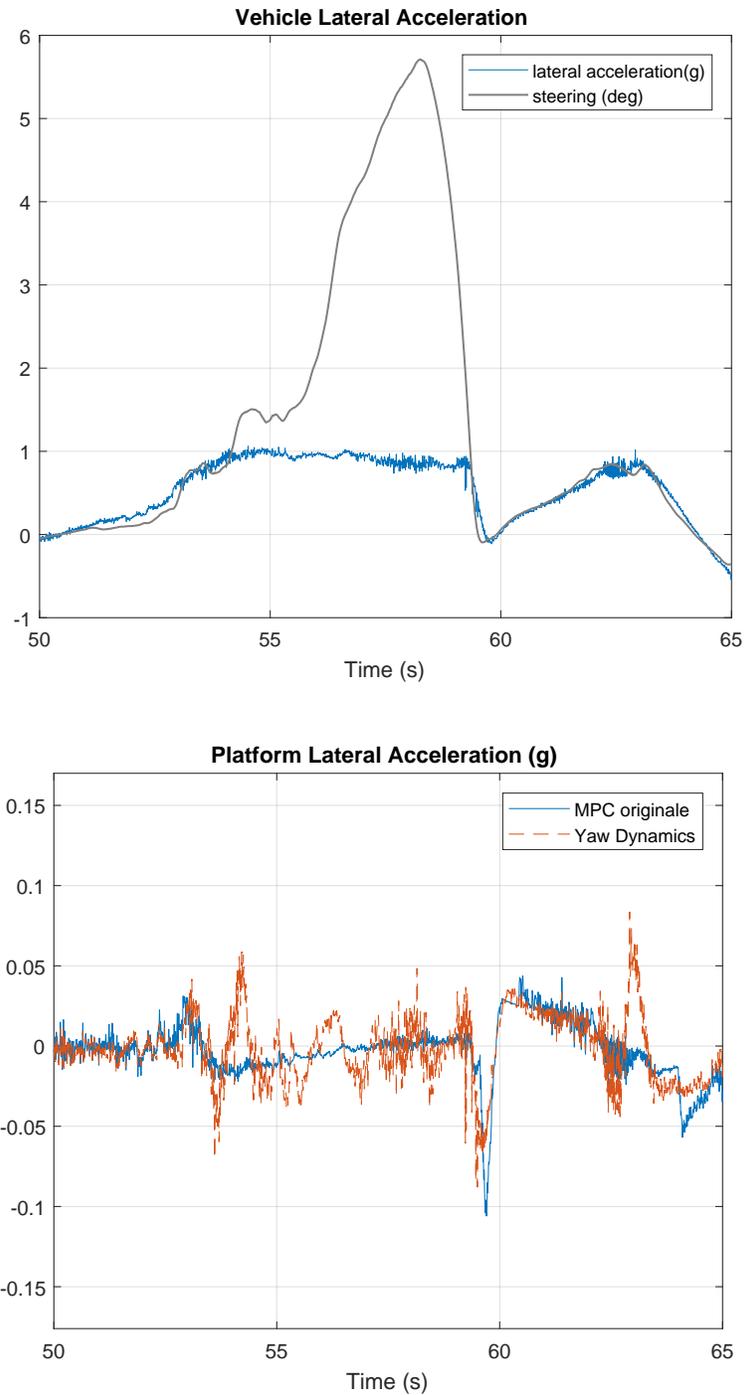


Figura 5.5: Confronto tra i segnali di accelerazione laterale generati con la Yaw Dynamics e con il MCA di partenza in caso di un giro di pista sullo Short Hockenheimring effettuato con un Suv sportivo. Focus sulla reazione al sottosterzo.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro di tesi è stato presentato un algoritmo di Motion Cueing, basato sul Model Predictive Control il cui obiettivo è quello di fornire al pilota maggiori informazioni relative all'*attitudine* del veicolo durante l'esperienza di guida in ambiente virtuale e per renderla il più realistica possibile.

Come si è visto, le accelerazioni e velocità angolari sostenute della maggior parte delle manovre sono impossibili da riprodurre in piattaforma per cui, specialmente nel caso di simulatori compatti, è necessario scalare e filtrare i segnali da riprodurre per generare dei riferimenti in posizione che rientrino nei limiti dell'area di lavoro.

L'applicazione dei filtri comporta una perdita di informazioni necessarie al pilota per poter percepire il comportamento della vettura ed essere in grado di controllarne il movimento nei casi di perdita di aderenza degli pneumatici. Con l'obiettivo di migliorare la percezione dello stato di aderenza degli pneumatici è stata sviluppata la Yaw Dynamics che consente di fornire al pilota maggiori informazioni sul comportamento locale del veicolo sfruttando al meglio l'area di lavoro poiché basato sul Model Predictive Control.

L'utilizzo del MPC consente di:

1. sfruttare il modello del sistema vestibolare per confrontare le accelerazioni e velocità percepite in piattaforma e sul veicolo reale;
2. utilizzare una tecnica di controllo in grado di gestire in modo efficace i vincoli della piattaforma;
3. semplificare il problema di taratura dei parametri.

A partire da uno studio dei termini che descrivono l'accelerazione laterale e la velocità di imbardata è stato possibile individuare quelli più utili al pilota

per ottenere informazioni sullo stato di aderenza degli pneumatici durante l'esperienza di guida; sono stati individuati come più rilevanti il *side slip rate* e l'accelerazione laterale diretta che sono a media nulla e di entità riproducibile in piattaforma e, quindi, non necessitano di un filtraggio pesante per essere riprodotti.

Per ottenere un movimento della piattaforma più naturale e simile a quello reale è stato sviluppato un algoritmo in grado di gestire separatamente sia il comportamento locale del veicolo che la componente in alta frequenza del comportamento globale.

Grazie a dei test sperimentali effettuati in ambiente virtuale è stato possibile valutare, attraverso i feedback dei piloti, gli effetti della strategia presentata. In particolare, il miglioramento apportato riguarda la componente in bassa frequenza relativa al comportamento locale del veicolo che con il MCA originale non veniva riprodotta.

Un ulteriore vantaggio di questo approccio è la possibilità di tradurre immediatamente i feedback dei piloti in modifiche dei parametri utilizzati per la Yaw Dynamics superando uno dei limiti del metodo presentato da Limebeer et al. in [17].

Poiché la taratura dei parametri dipende fortemente dal tipo di vettura simulata in ambiente virtuale e dalla sensibilità dei piloti il prossimo passo sarà quello di effettuare degli ulteriori test per individuare il range che permetta di ottenere una movimentazione della piattaforma il più realistica possibile. Alla luce degli ottimi risultati ottenuti, un interessante sviluppo della strategia proposta potrebbe essere il suo adattamento al coordinamento dell'accelerazione verticale al resto del moto per rendere l'esperienza del pilota in piattaforma più completa e sempre più simile alla realtà. Si potrebbero studiare i termini che descrivono tale accelerazione e gestirli in modo separato per poter riprodurre, anche in questo caso, il comportamento locale del veicolo, tenendo conto però della dipendenza dell'accelerazione verticale sia dalla rotazione attorno all'asse longitudinale (rollio) e da quella attorno all'asse laterale (beccheggio).

Bibliografia

- [1] Newton AP and Best MC. The influence of motion on handling dynamics analysis in full vehicle simulators. In: 8th international symposium on advanced vehicle control, Taipei, Republic of China, 20–24 August 2006, pp.303–308. Tokyo: JSAE.
- [2] Siegler I, Reymond G, Kemeny A and Berthoz A. Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks. In: Driving simulation conference, Nice, France, 5–7 September 2001, pp.21–32. Paris: IFSTTAR.
- [3] S. F. Schmidt and B. Conrad, Motion drive signals for piloted flight simulators. Technical Report CR-1601, NASA, 1970.
- [4] G. Reymond and A. Kemeny, Motion Cueing in the Renault Driving Simulator. *Vehicle System Dynamics*, 34(4):249-259, 2000.
- [5] R. Parrish, J. Dieudonne, and D. Martin, Coordinated adaptive washout for motion simulators. *Journal of Aircraft* 12, pp. 44-50, 1975.
- [6] Sivan R, Ish-Shalom J and Huang JK. An optimal control approach to the design of moving flight simulators. *IEEE Trans Man, Systems, Cybernetics* 1982; 12(6): 818–827.
- [7] Zacharias GL. Motion cue models for pilot-vehicle analysis. Alexandria, VA: Department of Defense; 1978. Report No.: AMLR-TR-78-2.
- [8] Telban R, Wu W, Cardullo F, et al. Motion cueing algorithm development: initial investigation and redesign of the algorithms. Langley: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2000.
- [9] Telban RJ, Cardullo FM, Houck JA. Motion cueing algorithm development: human-centered linear and nonlinear approaches. *NASACR*. 2005:37–47.

- [10] d'Ambrosio D., Algoritmi di motion cueing per simulatori di veicolo, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione, Università di Padova, 2010.
- [11] A. Beghi, M. Bruschetta, and F. Maran, "A real time implementation of mpc based motion cueing strategy for driving simulators," in Decision and Control (CDC), 2012 51st International IEEE Conference on, dec. 2012.
- [12] M. Bruschetta, F. Maran and A. Beghi (2017) A fast implementation of MPCbased motion cueing algorithms for mid-size road vehicle motion simulators, *Vehicle System Dynamics*, 55:6, 802-826, DOI:10.1080/00423114.2017.1280173
- [13] Wang L. Model predictive control system design and implementation using matlab. London: Springer Verlag; 2009.
- [14] F. Maran, Model-Based Control Techniques for Automotive Applications. Doctoral thesis, University of Padova, Control System Engineering, 2013.
- [15] Reza N. Jazar, Vehicle Dynamics: Theory and Application. Springer, 2008.
- [16] Garrett NJ, BestMC. Evaluation of a new body-sideslip-based driving simulator motion cueing algorithm. *Proc Inst Mech Eng Part D: J Automob Eng.* 2012;226(11):1433–1444.
- [17] I.G. Salisbury, D.J.N. Limebeer (2017) Motion cueing in highperformance vehicle simulators, *Vehicle System Dynamics*, 55:6, 775-801, DOI:10.1080/00423114.2017.1280172.
- [18] M. Guiggiani, Dinamica del veicolo. CittàStudiEdizioni, 2007.
- [19] M. Guiggiani, The Science of Vehicle Dynamics. Springer, 2014.
- [20] Milliken WF. and Milliken DL. Race car vehicle dynamics. Warrendale, PA: SAE International, 1995.
- [21] Segers J. Analysis techniques for race car data acquisition. Warrendale, PA: SAE International; 2008
- [22] <http://www.vi-grade.com/>