

Il Metodo della Manovra Ottima e le sue Applicazioni

BIRAL FRANCESCO¹, DA LIO MAURO¹

¹ *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale, Università di Trento, Trento*

SOMMARIO

Il “*Metodo della Manovra Ottima*” rappresenta una nuovo approccio per la valutazione oggettiva della manovrabilità e maneggevolezza dei veicoli. Il metodo, presentato in modo rigoroso in [1][6], è un metodo del tutto generale applicabile a qualsiasi tipo di veicolo e risolve un problema di tempo minimo in cui un veicolo, soggetto a vincoli fisici (ad esempio aderenza dei pneumatici, bordi della strada, etc.), deve muoversi da un punto iniziale ad un punto finale di un dato tracciato. Gli ingressi di controllo, che rappresentano le azioni del pilota, sono ottenuti come parte integrante del metodo di risoluzione, e servono a produrre la manovra più efficiente. Il moto risultante è detto *manovra ottima*, e gli ingressi di controllo che la generano sono definiti *ingressi ottimi*. L’efficienza della manovra è fissata per mezzo di un criterio “di ottimo” che matematicamente è espresso da una funzione penalità. L’espressione della funzione penalità definisce in modo rigoroso i concetti di manovrabilità e maneggevolezza e il valore finale dell’integrale della funzione penalità che è uno scalare (detto *indice di prestazione*) ne rappresenta una misura oggettiva. L’idea di base di questo metodo è quella di valutare la manovrabilità di veicoli differenti confrontando i loro indici di prestazione.

In questa memoria è presentata l’evoluzione del *Metodo della Manovra Ottima* nei suoi punti fondamentali. Verranno illustrati i principali risultati ottenuti in tre anni di ricerche applicando in concreto il metodo ad un modello matematico che descrive la dinamica in grande delle motociclette. In particolare, per differenti tipi di tracciati, si è valutata l’influenza dei parametri di progetto del veicolo come evidenziato in [2],[3] e [6].

Si illustra anche la possibilità di impiegare l’evoluzione degli ingressi ottimi per controllare modelli di motociclette più dettagliati quando devono eseguire la stessa manovra. Questo approccio è stato adottato in [4], per analizzare l’influenza delle sospensioni.

Nell’ultima parte dell’articolo si propongono gli sviluppi futuri del metodo e una recentissima applicazione [5], che consiste nel suo utilizzo come blocco di pianificazione in un modello di pilota da usare sia nelle simulazioni, sia come sistema di guida automatica per veicoli reali.

ABSTRACT

The *Optimal Manoeuvre Method* represents a new kind of approach to evaluate handling and manoeuvrability of vehicles in an objective way. The method is general and can be applied to almost any kind of vehicles. It solves the problem of moving a vehicle from an initial position to a final one of a given road in the minimum time, or according any other desired criterion of

optimality. This criterion is expressed by an integral of a penalty function that has to be minimized respecting, at the same time, physical and geometrical constraints such as tyre adherence limits, road boundaries, and others. The final value of this integral, which is a scalar, is taken as an objective measure of vehicle manoeuvrability and it is called *performance index*. The whole solution is called the “*optimal manoeuvre*”.

In this review the intent is to present the evolution of this Method and summarise the main results obtained applying the method to a mathematical model of racing motorcycle, as presented in papers [2][3][6]. The method has been applied both as tool to evaluate handling and manoeuvrability and to drive more complex vehicle model by means of the optima controls in order to investigate vehicle particular behaviours, as suspension [4].

In the last part of this paper a recent application of the method as a manoeuvre planning block in an hybrid driver model is discussed and other future developments are explained [5].

1. INTRODUZIONE

E' ormai prassi consolidata nelle moderne procedure di progettazione di nuovi veicoli definire quali devono essere le qualità dinamiche (generalmente indicate con i termini di manovrabilità e maneggevolezza) che il prototipo deve possedere. Quindi in questa fase è fondamentale capire quali sono i parametri di progetto che più influenzano le prestazioni e i comportamenti dinamici del veicolo. Tuttavia, a complicare la questione interviene il fatto che il veicolo è comunque condotto da un essere umano e quindi va valutato nel suo complesso, ovvero come sistema **uomo-macchina**. Questo fatto è tanto più vero nel caso dei veicoli a due ruote essendo questi sistemi intrinsecamente instabili. Ad esempio per dare un'idea della difficoltà che un pilota reale incontra quando guida una motocicletta, è sufficiente pensare al fatto che per farla curvare a destra il pilota deve ruotare inizialmente lo sterzo a sinistra. Il fenomeno è noto come “*out-tracking*” e non è per nulla intuitivo. Dall'esempio citato si può intuire quanto complesso è guidare un veicolo a due ruote e il motivo per cui i modelli matematici che descrivono le azioni del pilota sono sempre una semplice schematizzazione dell'effettivo comportamento reale. Questo si riflette nelle simulazioni al computer in quanto non è facile separare in modo netto l'effetto delle azioni del controllo (sia esso di tipo PID, basati su logica fuzzy o reti neurali o ibrido) dal solo comportamento dinamico del veicolo. D'altra parte anche nelle prove sperimentali l'abilità del pilota (legata alla sensibilità, alla prontezza, all'esperienza e alle capacità fisiche-mentali) incide sulle prestazioni che possono essere ottenute e inficia il giudizio che il pilota darà del veicolo che deve testare

In più, esiste anche la difficoltà di stabilire in modo rigoroso ed univoco i concetti di “*manovrabilità*” e “*maneggevolezza*” e come sia possibile misurarle in modo oggettivo. Le definizioni e la percezione del concetto di manovrabilità e maneggevolezza sono spesso diverse per i vari autori, per cui anche il modo in cui vengono misurate e valutate sono differenti tra loro. Solo una rigorosa definizione matematica di questi concetti è utile dal punto di vista ingegneristico.

Il procedimento comunemente adottato per determinare le caratteristiche di un veicolo (a due o quattro ruote) consiste nell'individuare l'esistenza di correlazioni tra i dati sperimentali ottenuti dai test in pista o durante manovre tipiche e i giudizi soggettivi dei collaudatori [7]. A questi si cerca sempre di affiancare dei modelli matematici nel tentativo di descrivere lo stesso fenomeno, con lo scopo di riprodurre il comportamento ottenuto dai dati sperimentali e capirne i motivi. L'astrazione, da queste correlazioni, di indici di prestazioni da usare come

valutazioni oggettive delle qualità intrinseche del veicolo non sempre significano capire il fenomeno. Anche se i modelli matematici sono un valido aiuto in questo.

Quindi la mancanza di una definizione univoca e rigorosa dei concetti di manovrabilità e maneggevolezza e la necessità di una misura oggettiva di queste due grandezze, indipendente dal giudizio dei collaudatori, ci ha spinti ad occuparci del problema proponendo come soluzione il “metodo della manovra ottima”.

2. IL METODO DELLA MANOVRA OTTIMA: CONSIDERAZIONI GENERALI

L’idea alla base del metodo della manovra ottima stava nel riuscire ad esprimere il concetto di manovrabilità e/o maneggevolezza con un’espressione matematica che rappresentasse allo stesso tempo un significato fisico legato alle prestazioni del veicolo. Da quest’espressione sarebbe stato possibile ricavare una misura di tali prestazioni.

Considerato il sistema veicolo-pilota si è pensato di separare la prestazione massima intrinseca ottenibile dal solo veicolo da quella ottenibile includendo anche i limiti psicofisici del pilota. In quest’ottica si è legato il concetto di **manovrabilità** *all’insieme dei moti possibili senza introdurre i limiti di attuazione del pilota.* (Per moti possibili si intendono moti dinamicamente possibili nel rispetto dei vincoli fisici e geometrici esistenti). In altre parole era come richiedere che il veicolo fosse condotto ai limiti delle sue potenzialità da un *pilota ideale e perfetto*. Dall’altra parte, il concetto di maneggevolezza è stato legato *all’insieme dei moti possibili includendo anche i limiti psicofisici del pilota*. In altre parole, si è definito “maneggevole” un veicolo che può essere controllato facilmente, o che può produrre un ampio insieme di moti con un costo limitato da parte del pilota. Per “manovrabile” invece, si è definito un veicolo in grado di produrre un ampio insieme di moti nel rispetto dei suoi soli limiti fisici. Tuttavia, per avere una misura oggettiva dei termini di manovrabilità o maneggevolezza era necessario trovare un modo di esprimere matematicamente i due concetti.

L’idea è stata quella di calcolare la soluzione che più si avvicina ad una “manovra ottimale”, tra tutte le possibili soluzioni. La “manovra ottimale” è definita da un certo “criterio di efficienza” (o “criterio di ottimo”) della manovra. In tal modo definendo qual’è il “criterio di efficienza” si stabilisce anche il concetto stesso di manovrabilità o maneggevolezza, se si considerano anche i limiti di attuazione del pilota. Ad esempio nel caso di veicoli da competizione, si potrebbe impiegare il tempo minimo per percorrere un giro di pista quale “criterio di ottimo”. In questo caso il veicolo più manovrabile é quello più veloce.

Dal punto di vista matematico si è pensato che il “criterio di ottimo” poteva essere espresso con una funzione da minimizzare per tutto l’intervallo di durata della manovra stessa. In altre parole in generale, si trattava di minimizzare il seguente integrale:

$$I = \int_0^T f_0(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, t) dt \quad (1)$$

dove T rappresenta il tempo finale. Il valore finale dell’integrale, l’indice I che è uno scalare, essendo minimo per definizione poteva essere adottato come misura della manovrabilità del veicolo. La minimizzazione della (1) doveva avvenire scegliendo gli opportuni valori degli ingressi di controllo del pilota $u = \{u_1, \dots, u_k\}$ in modo che fossero rispettati anche i vincoli fisici del problema. Per vincoli fisici si intendono:

- le equazioni della dinamica del veicolo (con $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), \dots, x_N(t)\}$ variabili di stato):

$$F_i(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, t) = 0 \quad \text{con } i = 1 \dots N \quad (2)$$

- i limiti ambientali (limiti di aderenza dei pneumatici, coppia massima del motore, bordi della strada, limiti di attuazione, etc.), in generale espressi da delle disequazioni:

$$\Phi_h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) < 0 \quad \text{con } h = 1, \dots, H \quad (3)$$

- le eventuali condizioni iniziali e finali da imporre sulle variabili di stato:

$$\Psi_j^0(\mathbf{x}(0), 0) = 0 \quad \text{con } j = 1, \dots, m_0 \quad \Psi_{jj}^T(\mathbf{x}(T), T) = 0 \quad \text{con } jj = 1, \dots, m_T \quad (4)$$

Dal punto di vista matematico si trattava di un problema di minimo vincolato per la cui risoluzione si è fatto ricorso alla teoria del calcolo variazionale, che ha permesso di ottenere le equazioni che risolvono tale tipo di problema (riassunte in Tabella 1).

Equazioni del Problema della Manovra Ottima		
Equazioni del sistema	$\frac{d}{d\zeta} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0$	con $i = 1, \dots, N$
Co-equazioni	$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = F_i(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) = 0$	con $i = 1, \dots, N$
Equazione aggiuntiva	$\dot{x}_0 - f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$	
Condizioni al contorno libere	$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right)_0 = 0$ e $\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right)_T = 0$	con $i = 1, \dots, N$
Condizioni al contorno imposte	$\Psi_j^0(\mathbf{x}(0), 0) = 0$ e $\Psi_{jj}^T(\mathbf{x}(T), T) = 0$	con $j = 1, \dots, m_0$ $jj = 1, \dots, m_T$
Condizione di stazionarietà	$\frac{\partial L}{\partial u_{ii}} = 0$	con $ii = 1, \dots, K$

Tabella 1 – Tabella riassuntiva delle equazioni che descrivono il problema della Manovra Ottima
 – L è il Lagrangiano che si ottiene combinando con i moltiplicatori di Lagrange con le (1), (2), (3) e (4) -

Il metodo in sostanza, permette di calcolare le azioni di controllo richieste al pilota (es.: coppia di sterzo, forze frenate, accelerazione, cambio, ecc.) che consentono di far muovere il veicolo tra punti estremi di un percorso stradale dato, secondo un criterio di ottimizzazione (tempo minimo, minimo utilizzo delle forze dei pneumatici, massima distanza da ostacoli ecc.).

La soluzione del Metodo della Manovra Ottima consiste di tre parti:

- a) Il moto del veicolo che soddisfa il criterio di ottimizzazione prescelto (senza violare alcun vincolo di traiettoria).
- b) L'indice di prestazione associato al criterio di ottimizzazione (che è un numero scalare che indica la bontà della prestazione; il fatto di essere scalare facilita la valutazione ed il confronto fra diversi veicoli).
- c) Le azioni di controllo del veicolo che producono il moto; che sono, come detto, le azioni richieste al pilota per far eseguire al veicolo il moto ottimo. Se vengono

introdotti dei limiti di attuazione del pilota si parla di analisi di maneggevolezza altrimenti si parla di analisi di manovrabilità, nel senso che la massima prestazione (intrinseca) di un veicolo è valutata come se alla guida ci fosse un pilota ideale senza limitazioni.

Le equazioni del problema di ottimo (Tabella 1), che vengono generate automaticamente per mezzo di un software di matematica simbolica, formano un problema ODE-BV (equazioni differenziali ordinarie con condizioni al contorno), la cui risoluzione avviene numericamente per mezzo di un software sviluppato ad hoc.

3. VALUTAZIONE DELLA MANOVRABILITÀ E MANEGGEVOLEZZA DEI MOTOCICLI

Inizialmente, il Metodo della Manovra Ottima è stato applicato in concreto alle motociclette da competizione su tratti di circuito reale. Il modello matematico della motocicletta inizialmente utilizzato, (descritto in [1][6]) consisteva in una schematizzazione della motocicletta per mezzo di tre corpi rigidi: telaio, compreso avantreno e retrotreno, più le due ruote dotate del moto di rotazione attorno al loro asse.

Dapprima, per validare il Metodo, sono stati eseguiti dei confronti tra il profilo di velocità ottenuto con il metodo e i dati della telemetria ottenuti da collaudatori esperti su tratti di circuito reale. In particolare in Figura 1 si ha il confronto per le prime due curve del circuito del Mugello.

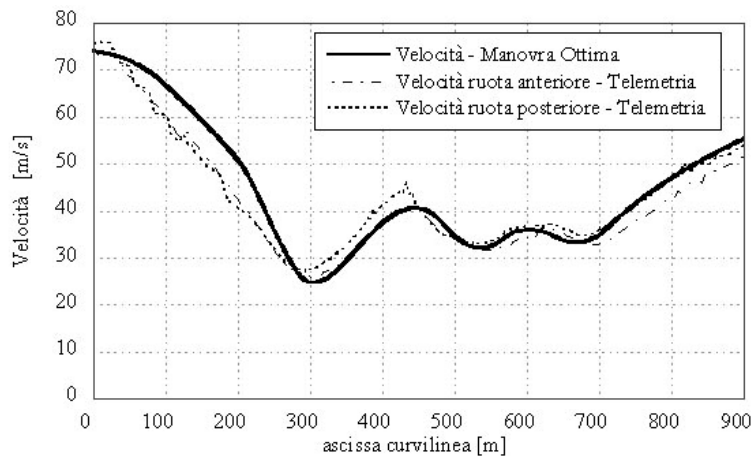


Figura 1 – Confronto tra soluzione della Manovra Ottima e telemetria per le curve San Donato e Lucco Poggio Secco del circuito del Mugello

Il confronto dimostra un buon accordo con i dati sperimentali, considerato anche che il modello di motocicletta è semplificato descrivendo solo la dinamica in grande del sistema (ad esempio non sono schematizzate le sospensioni). Il confronto suggerisce anche che, almeno nelle competizioni, i piloti cercano di eseguire delle manovre di tempo minimo.

In seguito in [2] il metodo è stato applicato alla simulazione di tre tipi di manovre semplici: slalom, cambio di corsia ed inversione ad U (che sono manovre tipiche utilizzate nei test sperimentali per la valutazione della manovrabilità e maneggevolezza). Il lavoro ha evidenziato come il Metodo sia in grado di rilevare variazioni di prestazioni anche per minime variazioni nei parametri di progetto.

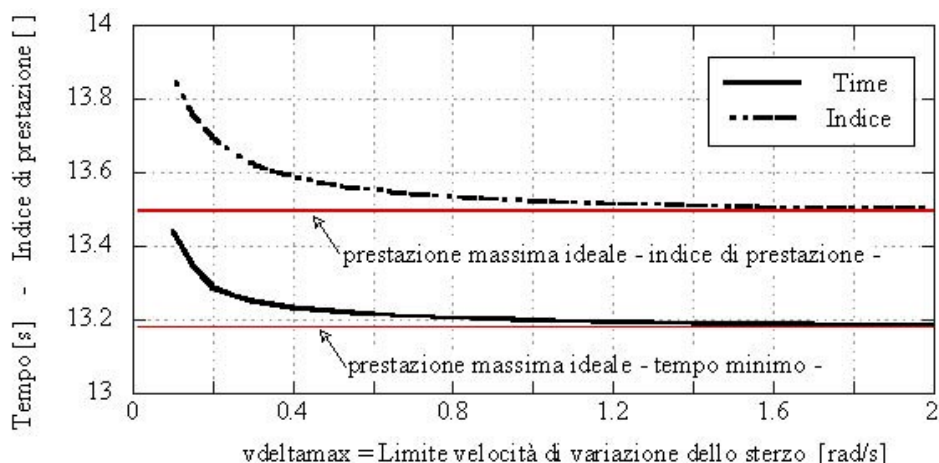


Figura 2 – Tempo minimo e indice di prestazione al variare del limite massimo di variazione della velocità di sterzo (ingresso di controllo)

Introducendo nel criterio di ottimizzazione i limiti sulle azioni di controllo del pilota si è valutata l’influenza dell’abilità di guida del pilota. Si è osservato in [6] come al variare di questi limiti cambia la “manovra ottima” per una stessa motocicletta. In particolare se a questi limiti si fa assumere un peso trascurabile (in sostanza le azioni di controllo possono variare con velocità molto grandi) l’indice di prestazione e il tempo minimo tendono a degli asintoti (Figura 2) che rappresentano la prestazione massima ottenibile con quel veicolo (prestazione intrinseca, ovvero manovrabilità). In altre parole è come se alla guida ci fosse il pilota ideale perfetto di cui si è detto.

Un altro dato rilevante emerso da queste analisi, consiste nel fatto che i veicoli differenti producono “traiettorie ottime” diverse, a dimostrazione dell’evidenza sperimentale che questi vanno guidati in modo differente se si vuole sfruttarli nel pieno delle loro potenzialità, come sperimentalmente mostrato in [8].

3.1. Valutazione dell’influenza dei parametri geometrici ed inerziali

Il principale utilizzo del metodo era finalizzato ad individuare quali fossero i parametri geometrici ed inerziali del veicolo che più influiscono sulle prestazioni massime. La valutazione dell’influenza di un parametro avviene confrontando gli indici di prestazione di veicoli differenti, ottenuti variando quel parametro, con l’indice di prestazione del veicolo di riferimento. Questo approccio è stato largamente usato per analizzare l’effetto di numerosi parametri geometrici ed inerziali (come posizione del baricentro, inclinazione dell’asse di sterzo, passo del veicolo, geometria dei pneumatici, momenti d’inerzia, massa, etc.). Il circuito utilizzato per le simulazioni è quello rappresentato in Figura 3.

In particolare nella pubblicazione [3] è stata approfondita l’importanza che i pneumatici hanno sulla dinamica complessiva e sulle prestazioni dei motocicli. Sono stati presentati dei grafici (simili a quelli di Figura 4) che presentano le curve di livello del tempo sul giro, considerato come indice di prestazione, al variare di volta in volta di una coppia di parametri che descrivono le caratteristiche del comportamento dei pneumatici (ad esempio il coefficiente di rigidità a deriva del pneumatico anteriore e di quello posteriore). Le simulazioni hanno permesso di evidenziare come la manovrabilità è fortemente influenzata più dalla rigidità a rollio del pneumatico che da quella a deriva. Inoltre, si è notato che esiste una regione (individuata dai maggiori coefficienti di rigidità del pneumatico anteriore e posteriore, indicata dal zona più chiara in Figura 4) in cui le prestazioni sono massime (il tempo è

minimo). E' stato dimostrato anche che la posizione di questa zona non dipende dall'abilità del pilota.

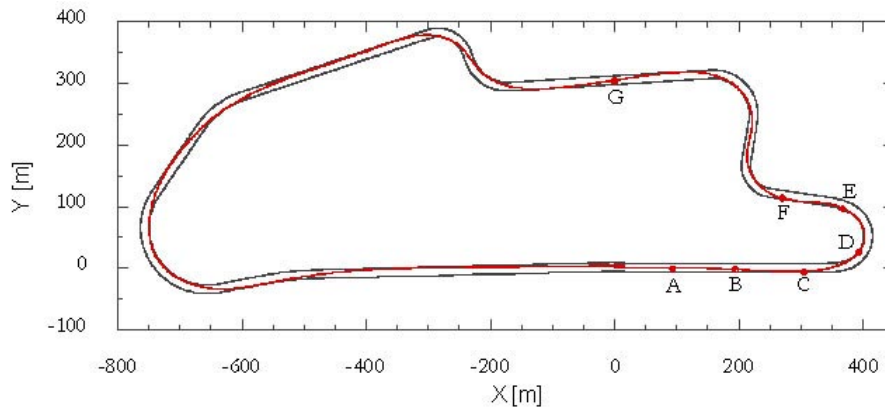


Figura 3 – Circuito (contiene le prime 6 curve del circuito del Mugello). E' indicata anche la traiettoria ottenuta applicando il Metodo

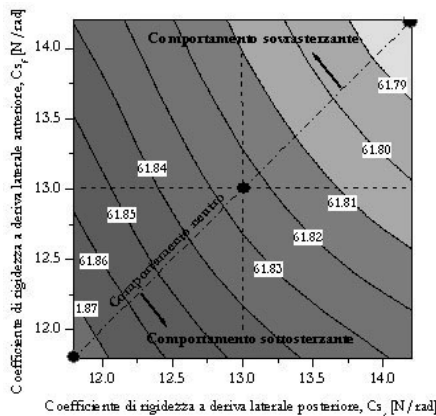


Figura 4 - Curve di livello del tempo (indice di prestazione) al variare dei coefficienti di rigidezza a deriva dei pneumatici – per il circuito di Figura 3

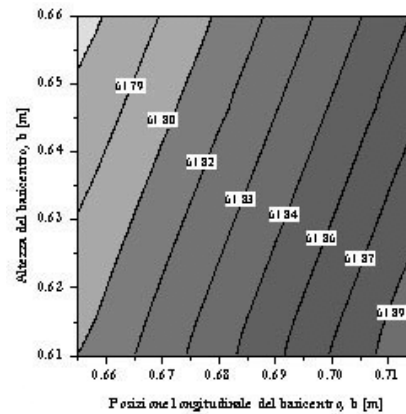


Figura 5 - Curve di livello del tempo (indice di prestazione) al variare della posizione del baricentro – per il circuito di Figura 3

Grafici analoghi sono stati ottenuti per altri parametri come ad esempio la posizione del baricentro Figura 5, in cui si nota come sia preferibile un baricentro complessivo più alto ai fini della manovrabilità. I risultati sono stati presentati in [6].

3.2. Ingressi Ottimi come controllo per modelli di veicolo più dettagliati

Come si è detto il modello matematico della motocicletta adottato nel Metodo della Manovra Ottima, descrive solo il moto “in grande” del veicolo. In sostanza non tiene conto della presenza delle sospensioni. Tuttavia esiste un buon accordo con i dati sperimentali e in più il metodo produce l’andamento degli ingressi di controllo che producono la traiettoria ottima. Sulla base di queste considerazioni si è pensato di sfruttare gli “ingressi ottimi” come ingressi obiettivo da inseguire, ad esempio con un controllo proporzionale derivativo integrativo, per guidare un modello di motocicletta più dettagliato. Questo procedimento è stato adottato nel lavoro [4]. In breve si è calcolato il moto “in grande” con il Metodo per il circuito di Figura 3, in modo da ottenere la manovra di tempo minimo, e in particolare gli andamenti delle accelerazioni e decelerazioni necessarie a compiere la manovra. Come secondo passo, utilizzando un modello

completo del veicolo che descrive la dinamica nel piano, si è analizzato in dettaglio il moto dei corpi che compongono il veicolo (in particolare le sospensioni) “guidando” il modello con gli ingressi ottimi ottenuti in precedenza. In particolare si è studiato il caso di un veicolo da competizione e si è visto che esiste un buon accordo con i dati della telemetria (Figura 6). In seguito è stata condotta un’analisi parametrica per quanto riguarda l’effetto sull’angolo di beccheggio di diverse configurazioni delle sospensioni. Il confronto è presentato nel grafico di Figura 7. Ad esempio si osserva come una sospensione anteriore “anti-dive” riduca il moto di beccheggio.

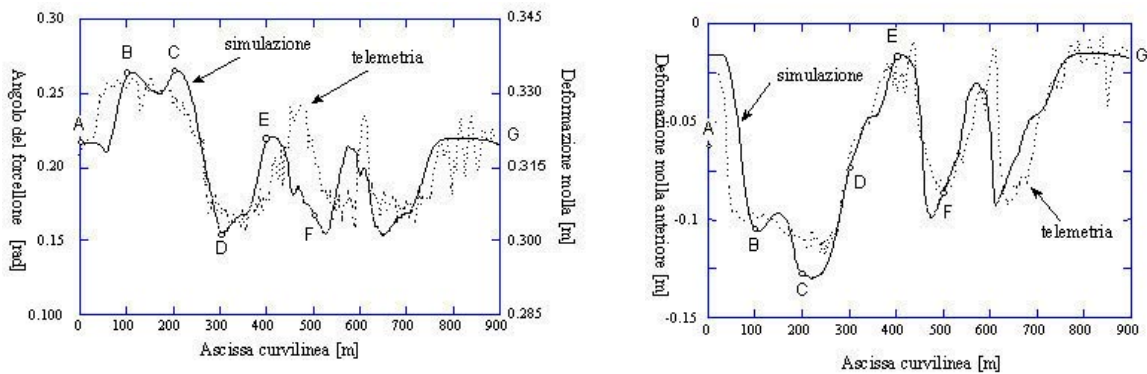


Figura 6 – Confronto tra la telemetria e i risultati delle simulazioni per le prime due curve del Mugello – punti indicati in Figura 3

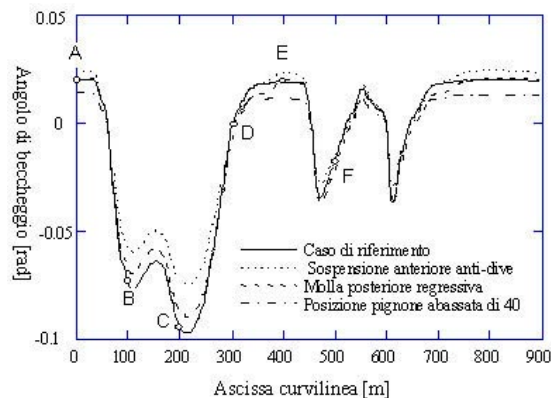


Figura 7 – Differenti andamenti dell’angolo di beccheggio per differenti geometrie delle sospensioni e rigidità delle molle

4. APPLICAZIONI E SVILUPPI FUTURI

4.1. Estensione del metodo a modelli più complessi di veicoli

Il Metodo della Manovra Ottima è del tutto generale e la procedura di generazione delle equazioni è stata automatizzata. La funzione penalità, che definisce l’indice di prestazione, può essere scelta liberamente – e cambiata – per esprimere qualunque si voglia criterio o una combinazione di più criteri con differente peso. Ciò richiede solamente la rimanipolazione del sistema di equazioni differenziali e la ricompilazione del software che risolve il problema a valori al contorno. Questa flessibilità sarà sfruttata per applicare il metodo a modelli matematici di veicoli più complessi, e per analizzare l’effetto di diversi criteri di ottimizzazione.

Attualmente si sta sviluppando il modello matematico di automobile al quale applicare il Metodo. Tuttavia, anche per le motociclette è in fase di sviluppo un modello più dettagliato per evidenziare alcuni fenomeni legati alla dinamica in piccolo, come l’effetto delle sospensioni.

4.2. Utilizzo della Manovra Ottima come blocco di pianificazione in un modello ibrido di pilota

Sebbene in origine il metodo è stato concepito per la valutazione di maneggevolezza e manovrabilità, per il fatto stesso che è in grado di produrre traiettorie ottimizzate, può essere sfruttato per sviluppare veri e propri blocchi di pianificazione delle manovre, da includere in modelli di guida di tipo ibrido. Il fatto che il metodo produca autonomamente il percorso, e che questo percorso soddisfi un criterio di ottimizzazione modificabile a piacere, costituisce un evidente punto di forza. In più l'utilizzo di differenti criteri di ottimizzazione può consentire di modellare differenti stili di guida.

Queste potenzialità hanno permesso di sviluppare un primo modello di pilota basato sul Metodo della Manovra Ottima e i cui risultati sono stati presentati in [5]. La Figura 8 riporta la traiettoria reale di una motocicletta e quelle pianificate per l'esecuzione di una curva ad U.

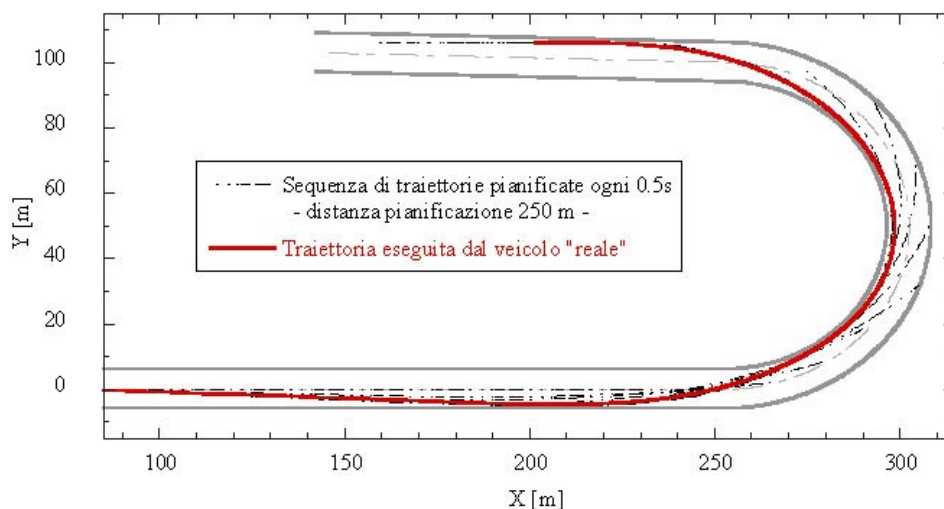


Figura 8 – Esecuzione di una curva ad U di una motocicletta guidata con modello di pilota virtuale con blocco di pianificazione basato sul Metodo della Manovra Ottima

Brevemente si può dire che il modello ibrido comprende due blocchi principali: uno per la pianificazione della manovra basato sulla manovra ottima e l'altro per l'esecuzione della manovra sulla base degli ingressi ottimi. Il modo di operare di questo modello è molto semplice: ad intervalli di tempo esso calcola le manovre ottime tra la posizione corrente e una posizione finale posta in avanti ad una certa distanza (la quale rappresenta una sorta di parte "visibile" o "conosciuta" del percorso). Dopo che la manovra è stata calcolata, le azioni di controllo che la producono sono inviate al blocco di esecuzione e la manovra viene seguita dal "veicolo reale" per una sua piccola parte. Dopo di che, è pianificata una nuova manovra, considerando la nuova posizione raggiunta e la nuova parte di percorso "visibile". La ripetizione della pianificazione è necessaria per due ragioni: la prima è che al procedere del veicolo, nuove parti del percorso divengono "note" (e possono anche apparire nuovi ostacoli), la seconda è che possono essersi verificate delle variazioni tra la manovra pianificata e quella eseguita. Il secondo fenomeno (divergenza) è dovuto al fatto che il modello impiegato nel blocco di pianificazione della manovra ottima è più semplice rispetto al "veicolo reale". In un certo senso, il modello utilizzato per il blocco di pianificazione rappresenta il modello "mentale" del veicolo che il pilota ha, mentre la dinamica reale è più complessa. La ripianificazione consente allora la correzione della variazione dovuta a questa discrepanza.

Un simile modello di pilota ha due possibili applicazioni di notevole interesse: la prima per la guida di modelli multi-body di veicoli nelle simulazioni al computer, la seconda forse di ben maggiore interesse, come pilota virtuale da impiegare nella guida automatica di veicoli reali.

5. CONCLUSIONI

Dall'esigenza di avere a disposizione una definizione rigorosa ed univoca dei concetti di manovrabilità e maneggevolezza, si è introdotto il Metodo della Manovra Ottima, che è un metodo del tutto generale per la valutazione delle prestazioni di un veicolo per mezzo di un solo indice. Nella presente memoria si sono descritti i punti fondamentali del metodo e sono stati riportati alcuni dei risultati ottenuti dalla sua applicazione ad un modello di motocicletta. I risultati ottenuti ben si accordano con i dati telemetrici ed è stato possibile ricavare delle interessanti informazioni sui parametri di progetto che più influenzano la manovrabilità e la maneggevolezza.

Infine si sono illustrati i futuri impieghi e sviluppi del metodo ed in particolare la possibilità di utilizzarlo come blocco di pianificazione delle manovre in un modello di pilota virtuale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] V. Cossalter, M. Da Lio R. Lot, L.Fabbri : A General Method for the Evaluation of Vehicle Manoeuvrability with Special Emphasis on Motorcycles, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol 31, N° 2, pp 113-135, February 1999
- [2] V. Cossalter, M. Da Lio, F. Biral , L.Fabbri: Evaluation of Motorcycle Manoeuvrability with the Optimal Manoeuvre Method, *SAE Meeting;1998 Motorsports Engineering Conference&Exposition*, Dearborn, Michigan, 16-19 November 1998
- [3] M. Da Lio, V. Cossalter, R. Lot, L. Fabbri: The influence of tyre characteristics on motorcycle manoeuvrability, *European Automotive Congress "Vehicle systems technology for the next century"*, Barcelona 30 June-2 July 1999
- [4] V. Cossalter, M. Da Lio, R. Lot, L. Fabbri: Simulation and performance evaluation of race motorcycle dynamics based on parts of real circuit, *Power Two Wheels International Conference*, Atti, Pisa 14-15/12/98
- [5] F. Biral, M. Da Lio: Modelling Driver with the Optimal Manoeuvre Method, 7th International Conference ATA, paper 01A1029, Florence, 23-25 May 2001
- [6] F. Biral: Manovrabilità e Maneggevolezza dei Motocicli con il Metodo della Manovra Ottima, *Tesi del Dottorato di Ricerca in Meccanica Applicata XIII ciclo*, anni accademici 1997-2000
- [7] R.S. Sharp: Vehicle dynamics and the judgment of quality Vehicle Performance, *Vehicle Performance* (ed.), pp.87-96, J.P.Pauwelussen
- [8] Kerry Spackman: "The future of formula one driver training", *Race Driving*, 2000