

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902064787A1

Publication Date

20131229

Applicant

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Title

METODO E DISPOSITIVO PER LA DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI
ROLLIO DI UN VEICOLO

METODO E DISPOSITIVO PER LA DETERMINAZIONE DELL'ANGOLO DI ROLLIO DI UN VEICOLO

Richiedente: **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI di PADOVA** a Padova

5 Inventore: **Prof. LOT Roberto**

La presente invenzione riguarda un metodo ed un dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio in un motociclo o di altro veicolo sprovvisto di
10 sistema per il controllo attivo del rollio ed atto ad inclinarsi lateralmente rispetto al piano stradale quando percorre un tratto di strada in curva.

Nella presente descrizione e nelle rivendicazioni che seguono il termine "veicolo" sta ad indicare un qualsiasi veicolo a due o più ruote, ad esempio un triciclo o quadriciclo, il quale, percorrendo un tratto stradale in curva, si inclina
15 lateralmente rispetto al piano stradale e, come indicato, non è dotato di un sistema per il controllo attivo del rollio.

I sistemi ABS ed i sistemi frenanti integrali di tali veicoli utilizzano l'informazione relativa all'angolo di rollio per il controllo del movimento del veicolo in curva e per il controllo ottimale della frenata. L'angolo di rollio è un parametro
20 essenziale anche per sistemi di movimentazione luci (turning light systems ed altri sistemi di sicurezza, quali i sistemi di controllo della stabilità, di assistenza in curva ed i sistemi anti-collisione.

Non esistono, ad oggi, metodi e dispositivi che consentano la misurazione diretta dell'angolo di rollio di un veicolo. La misurazione dell'angolo di rollio di un

veicolo avviene in modo indiretto a partire, ad esempio, dalla misurazione della velocità di rollio, acquisibile tramite un adatto girometro montato sul veicolo.

L'angolo di rollio di un veicolo in movimento lungo un tratto stradale in curva viene determinato integrando nel tempo la velocità angolare del veicolo così acquisita. La determinazione dell'angolo di rollio mediante tale procedura è però soggetta al cosiddetto errore di deriva, il quale rende del tutto inaffidabile la determinazione di tale parametro. Vi è pertanto la necessità di ricorrere ad una procedura di compensazione dell'errore di deriva ed, a questo proposito, sono stati sviluppati negli anni diversi metodi di correzione implementati da dispositivi di misurazione dell'angolo di rollio.

Il brevetto **DE-198 17 594** insegna, ad esempio, un sistema di controllo dei fanali di un motociclo, il quale comprende, tra l'altro, un sistema per la determinazione l'angolo di rollio del motociclo durante la percorrenza di un tratto stradale in curva. Il sistema comprende due sensori giroscopici: un primo sensore giroscopico essendo preposto al rilevamento della velocità di rollio, mentre il secondo sensore giroscopico è preposto al rilevamento della velocità di imbardata del veicolo. Un limite di questo sistema di rilevamento è che esso implica la conoscenza di informazioni aggiuntive per stabilire un valore iniziale dell'angolo di rollio. Inoltre, il sistema insegnato in **DE-198 17 594** richiede componenti di elevata precisione e, pertanto, molto costosi.

Il brevetto **DE-100 39 978** descrive un dispositivo per misurare l'angolo di inclinazione rispetto ad un asse verticale (direzione della forza di gravità) o rispetto alla direzione della forza di contatto risultante (resulting contact force), il quale è dotato di un gruppo sensore e di una unità di calcolo elettricamente connessi tra loro, il gruppo sensore essendo provvisto di due accelerometri.

L'unità di calcolo determina l'angolo di inclinazione sulla base delle misure fornite in uscita dai due accelerometri.

Il brevetto **DE-42 44 112** insegna un sistema ABS per motocicli, il quale comprende, tra l'altro, un circuito ausiliario preposto al calcolo dell'inclinazione del motociclo rispetto al piano stradale tramite l'impiego di due accelerometri.

La domanda di brevetto **WO 2002/01151** descrive un metodo per la determinazione dell'angolo di rollio, il quale prevede l'impiego sia di accelerometri che di girometri per l'acquisizione di parametri da fornire in ingresso ad un filtro di Kalman esteso, basato su un modello in spazio di stato molto complesso.

Inoltre, la domanda di brevetto **WO 2006/063886** insegna un dispositivo ed un metodo per la determinazione di almeno un angolo di inclinazione di un veicolo a motore monotraccia (single-track motor vehicle). Il dispositivo comprende almeno due sensori di velocità angolare, sulla base delle misurazioni dei quali è possibile determinare: almeno due velocità angolari del veicolo a motore attorno a due assi differenti e l'angolo di rollio e/o l'angolo di beccheggio del veicolo. Il metodo implementato dal dispositivo si basa sull'integrazione della velocità angolare e sul filtraggio delle misure così ottenute.

La domanda di brevetto **WO 2007/107935** descrive un dispositivo ed un metodo per determinare l'angolo di rollio di un motociclo. Il dispositivo comprende un primo girometro, che fornisce in uscita un segnale correlato alla velocità di rollio, un secondo girometro preposto a fornire in uscita un segnale correlato alla velocità di imbardata del veicolo ed un sensore di velocità. Il dispositivo determina, a partire dai segnali in uscita dai girometri e dal sensore di velocità, due valori intermedi dell'angolo di rollio, che vengono successivamente combinati tra loro ottenendo così un valore unico.

La domanda di brevetto **WO 2007/096319** insegna un metodo per determinare l'angolo di rollio combinando tra loro i risultati o le informazioni fornite in uscita da due o più metodi di determinazione dell'angolo di rollio, al fine di ottenere una stima dell'angolo di rollio sufficientemente accurata sia in stato
5 stazionario che transitorio (o non-stazionario). Il metodo richiede l'impiego di girometri, accelerometri e sensori di velocità.

La domanda di brevetto **WO 2008/067900** descrive un metodo per determinare l'angolo di rollio di un motociclo, il quale metodo prevede di filtrare ed integrare i segnali in uscita da uno o più girometri e di correggere l'errore di
10 deriva relativo al rollio sulla base dei segnali in uscita da sensori di accelerazione.

Il brevetto **IT-1 382 014** insegna pure un dispositivo ed un metodo per la determinazione dell'angolo di rollio. Il dispositivo comprende due girometri ed un sensore di velocità, il metodo prevede inoltre di integrare le componenti alle alte
15 frequenze della velocità di rollio per ottenere una prima stima di tale angolo e di utilizzare le informazioni alle basse frequenze ed un modello in stato stazionario per correggere gli errori di deriva.

La domanda di brevetto **US-2010/0168958** descrive, tra l'altro, un metodo per determinare l'angolo di rollio, il quale richiede l'impiego di due girometri e di
20 un sensore di velocità. Il metodo determina l'angolo di rollio integrando la velocità di rollio e correggendo l'errore di deriva di tale determinazione tramite un modello in stato stazionario.

I metodi e dispositivi sopra elencati, soffrono di numerosi inconvenienti.

Alcuni di essi non sono adatti per determinare l'angolo di rollio di un
25 veicolo in movimento sia in condizioni stazionarie che transitorie. Altri forniscono

stime dell'angolo di rollio poco precise oppure richiedono, per poter fornire in uscita stime più affidabili, l'impiego di componenti molto costosi.

Scopo principale, quindi, della presente invenzione è quello di fornire un metodo ed un dispositivo che consentano la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo in movimento sia in condizioni stazionarie che transitorie.

Un altro scopo della presente invenzione è quello di mettere a disposizione un metodo ed un dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo, i quali forniscano in uscita segnali di qualità elevata, ossia in cui l'errore di deriva sia minimo ed abbiano un'elevata larghezza di banda (maggiore o uguale a 100 Hz).

Un ulteriore scopo della presente invenzione è quello di fornire un metodo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo che sia facile da implementare.

Non ultimo scopo della presente invenzione è quello di mettere a disposizione un dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo che sia realizzabile a costi competitivi.

Questi ed altri scopi ancora della presente invenzione sono raggiunti da un metodo per la determinazione dell'angolo di rollio in un veicolo comprendente le seguenti fasi operative:

- acquisire la velocità angolari ω_z e ω_x del veicolo , ciascuna di tali velocità angolari essendo determinata con riferimento ad un asse che giace sul piano sagittale o di simmetria del veicolo ed è rivolto, rispettivamente, verso il basso e verso la direzione di avanzamento del veicolo;
- acquisire la velocità di avanzamento V del veicolo;

- determinare sulla base di tali velocità angolari e di avanzamento l'angolo di rollio φ del veicolo.

Ulteriori aspetti e vantaggi della presente invenzione appariranno meglio dalla seguente descrizione dettagliata di un suo esempio di realizzazione
5 attualmente preferito, illustrato a titolo puramente esemplificativo e non limitativo negli uniti disegni, nei quali:

la Figura 1 illustra una vista prospettica leggermente dall'alto di un veicolo inclinato lateralmente rispetto al piano stradale e sul quale sono riportati i sistemi di riferimento previsti dal metodo di determinazione dell'angolo di rollio secondo
10 la presente invenzione;

la Figura 2 mostra una vista dal retro del veicolo di Figura 1;

le Figure 3a e 3b illustrano ciascuna un flow chart del metodo di determinazione dell'angolo di rollio secondo la presente invenzione;

le Figure 4a, 4b e 4c illustrano alcuni grafici relativi a manovre simulate
15 durante un test di prova, eseguito al calcolatore, del metodo secondo la presente invenzione;

la Figura 5 illustra alcuni grafici relativi a manovre simulate durante un altro test di prova eseguito al calcolatore del metodo secondo la presente invenzione;

20 le Figure 6 e 7 illustrano, rispettivamente, l'allestimento di un gruppo di sensori su di un veicolo per eseguire test di prova ed il circuito stradale sul quale le prove sono state eseguite;

la Figura 8 mostra alcuni grafici relativi ai segnali acquisiti durante un test di prova su strada ed i relativi risultati; e

la Figura 9 illustra uno schema a blocchi di un esempio di realizzazione preferito del dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio secondo la presente invenzione.

Con riferimento dapprima alle Figure 1, 2 e 9 si noter  che il dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo secondo la presente invenzione   indicato con il numero di riferimento 1 e comprende primi mezzi sensori, tipicamente almeno due giroscopici 2 e 3, preposti a rilevare le velocit  angolari di un veicolo 4 che percorre un tratto stradale 5. Il veicolo 4   raffigurato, per semplicit , come un motociclo dotato di ruota anteriore 6 e posteriore 7.

Il dispositivo secondo la presente invenzione comprende anche secondi mezzi sensori, preposti a rilevare la velocit  di avanzamento V del veicolo.

Tali primi e secondi mezzi sensori sono elettricamente connessi ad una unit  di elaborazione dati U , la quale riceve in ingresso i segnali forniti in uscita dai mezzi sensori e li elabora nel modo che sar  qui di seguito descritto, fornendo cos  in uscita una determinazione dell'angolo di rollio.

La determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo secondo la presente invenzione prevede l'impiego di un modello matematico M che descriva la dinamica del moto del veicolo rispetto al piano stradale (come appare dalle Figure 1 e 2).

Il modello M si basa su due sistemi di riferimento cartesiano, $CX_1Y_1Z_1$ e $SX_2Y_2Z_2$, entrambi solidali al veicolo e cos  composti:

- l'origine C del sistema di riferimento $CX_1Y_1Z_1$ corrisponde al punto di contatto, sulla ruota posteriore 7 del veicolo 4, tra la ruota posteriore stessa ed il piano stradale 5, quando il veicolo   in posizione verticale (non inclinato lateralmente e, pertanto, con rollio nullo);

- L'asse X_1 corrisponde è parallelo al piano stradale, giace sul piano sagittale o di simmetria del veicolo 4 ed è diretto verso la direzione di avanzamento del veicolo;
- L'asse Z_1 è un asse ortogonale al piano stradale e diretto verso il basso; e
- 5 - L'asse Y_1 è un asse che giace sul piano stradale ed è ortogonale al piano formato dagli assi X_1 e Z_1 .

L'asse X_1 del sistema di riferimento $CX_1Y_1Z_1$ rappresenta l'asse di rollio e la componente della velocità angolare del veicolo rispetto a tale asse rappresenta la velocità di rollio ω_φ .

- 10 L'asse Z_1 illustrato nelle Figure 1 e 2 rappresenta l'asse di imbardata e la componente della velocità angolare del veicolo attorno a tale asse corrisponde alla velocità di imbardata ω_ψ .

Per quanto riguarda il secondo sistema di riferimento $SX_2Y_2Z_2$, esso è definito come segue:

- 15 - l'origine S del sistema di riferimento è un punto fisso del veicolo 4, ad esempio in corrispondenza della sella del veicolo;
- l'asse Y_2 è un asse parallelo all'asse di rotazione della ruota posteriore 7 del veicolo ed è diretto verso la destra del veicolo stesso;
- l'asse X_2 e Z_2 giacciono sul piano sagittale o di simmetria del veicolo 4
- 20 rivolti, rispettivamente, verso la direzione di avanzamento del veicolo e verso il basso.

- Come si noterà, quando il veicolo percorre un rettilineo e non risulta inclinato lateralmente rispetto al piano stradale, l'asse X_1 risulta parallelo a X_2 ed entrambi gli assi giacciono sul piano sagittale o di simmetria del veicolo. Lo
- 25 stesso dicasi per gli assi Z_1 e Z_2 .

L'angolo di rollio φ , indicato in Figura 2, corrisponde all'angolo compreso tra i piani X_1Z_1 e X_2Z_2 .

Tornando alla Figura 1, secondo un esempio di realizzazione della presente invenzione, i sensori giroscopici 2 e 3 sono montati sul veicolo, in corrispondenza della sella, rispettivamente lungo gli assi X_2 e Z_2 . Il primo sensore giroscopico 2 è preposto a rilevare la velocità angolare ω_x rispetto all'asse X_2 . Il secondo sensore giroscopico 3 è preposto a rilevare la velocità angolare ω_z rispetto all'asse Z_2 .

Come è noto, in corrispondenza di angoli di beccheggio ridotti, la velocità di rollio ω_φ e la velocità angolare ω_x sono molto simili tra loro in termini di ampiezza. Quando si hanno angoli di beccheggio e di rollio ridotti, ossia quando il veicolo viaggia sostanzialmente lungo una direzione rettilinea a velocità costante e senza inclinazione laterale, la velocità di imbardata ω_ψ e la velocità angolare ω_z presentano ampiezze molto simili tra loro.

In caso di beccheggio ridotto e angolo di rollio elevato, ad esempio quando il veicolo sta compiendo una curva, la relazione che lega le velocità di imbardata ω_ψ e angolare ω_z è data dalla seguente relazione:

$$\omega_z = \omega_\psi \cos(\varphi)$$

e, pertanto, la velocità angolare ω_z può essere notevolmente inferiore rispetto alla velocità di imbardata ω_ψ .

Come si noterà, la posizione sul veicolo dei mezzi sensori di velocità angolari non è rilevante, in quanto le velocità rotazionali del veicolo sono le medesime in ogni suo punto.

Il modello M della dinamica di un veicolo in movimento secondo la presente invenzione si basa sull'ipotesi vantaggiosa di considerare il veicolo 4 come un corpo rigido, controllabile in termini di velocità V e velocità di imbardata ω_ψ e libero di rotolare lungo un piano (stradale).

5 La velocità del veicolo V corrisponde alla velocità di avanzamento del veicolo calcolata rispetto all'asse di riferimento X_2 .

Il modello M del veicolo è vantaggiosamente semplice e consente di tener conto delle principali componenti dinamiche del moto del veicolo, come ad esempio degli effetti legati all'inerzia del veicolo (forza peso e forza centrifuga),
10 all'inerzia e velocità angolare delle ruote del veicolo (effetti giroscopici) ed alla conformazione delle ruote.

Il modello in spazio di stato del corpo rigido rotolante, sul quale si basa il metodo della presente invenzione, è il seguente:

$$\begin{aligned}
 \dot{\varphi} &= \omega_\varphi \\
 \dot{\omega}_\varphi &= \frac{\left(\omega_\varphi^2 r_t \sin \varphi + g \sin \varphi - \omega_z V \right) h_1 - \frac{r_t \omega_z V}{\cos \varphi}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} \\
 &\quad + \frac{\omega_z^2 h_1 \sin \varphi [h_1 \cos \varphi + r_t]}{\left[h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m \right] \cos^2 \varphi} \\
 &\quad + \frac{\omega_z^2 \tan \varphi - \frac{\omega_z V}{r_r + r_t (\cos \varphi - 1)} \frac{I_w}{m}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} \frac{I_w}{m}
 \end{aligned} \tag{M}$$

dove:

il vettore delle variabili di stato è: $\mathbf{x} = \left(\varphi \quad \omega_\varphi \right)^T$;

25 la variabile osservata è: $y = \omega_\varphi$;

e (si veda in particolare la Figura 2):

- m è la massa totale del veicolo;
- h è l'altezza del centro di massa del veicolo, illustrato in Figura 2 con il numero
5 di riferimento 8;
- I_x è il momento di inerzia del veicolo rispetto all'asse passante per il centro di
mazza 8 e parallelo all'asse X2;
- I_w è la somma dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori;
- r_r è il raggio di rotolamento medio tra le ruote;
- 10 - $h_1 = h - r_r$ è la differenza tra l'altezza del baricentro e il raggio di rotolamento
medio;
- r_i è il valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del
veicolo) del raggio di un cerchio 9 che include la sezione trasversale del
pneumatico; e
- 15 - g è l'accelerazione gravitazionale.

Il vantaggio del modello in spazio di stato M della dinamica del veicolo secondo la presente invenzione è che esso è molto semplice e può essere implementato da componenti elettronici economici.

- 20 Come detto sopra, un tale modello tiene conto degli effetti giroscopici e delle dimensioni dei pneumatici, i quali determinato fino al 10% dell'angolo di rollio del veicolo in curva.

Alcuni dei parametri inclusi nel modello M in spazio di stato della dinamica del veicolo sono predefiniti. Ad esempio, è possibile predeterminare il valore dei parametri m e h ed altri ancora per ciascun tipo di veicolo.

Nel metodo secondo la presente invenzione, il modello M in spazio di stato è applicato ad un Filtro di Kalman esteso implementato dall'unità di elaborazione dati e fornisce in uscita la determinazione dell'angolo di rollio del veicolo. Le equazioni tipiche del filtro di Kalman esteso, si sono qui di seguito

5 riportate e commentate.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \Delta t + \mathbf{w}_{k-1} \\ y_k &= \mathbf{H} \mathbf{x}_k + v_k \end{aligned}$$

dove:

- Δt è l'intervallo di campionamento;
- 10 - k è l'istante temporale attuale;
- $k-1$ è l'istante temporale precedente;
- $\mathbf{x}$ è il vettore di stato;
- $\mathbf{f}$ sono le equazioni di stato non lineari;
- $\mathbf{w}$ è un vettore che rappresenta il rumore di processo;
- 15 - $\mathbf{u}$ è il vettore dei segnali di ingresso al modello;
- y è la variabile osservata del modello;
- v (scalare) è l'errore di misura; e
- $\mathbf{H}$ è una matrice costante .

In tale modello M gli errori $\mathbf{w}$ e v sono assunti, per ipotesi, Gaussiani a

20 media nulla.

Nelle Figure 3a e 3b sono rappresentati i flow chart delle fasi principali del metodo di determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo secondo la presente invenzione.

Vengono dapprima acquisiti, alla fase 100, mediante i mezzi sensori

25 sopra richiamati, i segnali della velocità di avanzamento V e la velocità angolare

ω_z che costituiranno il vettore di segnali di ingresso $\mathbf{u}$ (fase 100) al filtro di Kalman esteso.

Alla fase 100 viene anche rilevata la velocità angolare ω_x del veicolo che rappresenta la variabile osservata y del filtro di Kalman esteso.

5 I segnali così rilevati vengono inviati, alla fase 200, all'unità di elaborazione dati U che li elabora sulla base del modello della dinamica del veicolo sopra descritto e del filtro di Kalman esteso.

Più in particolare, le variabili di stato del filtro di Kalman, sono indicate con il vettore x (blocco 101) e sono rappresentate dall'angolo di rollio φ e dalla
10 velocità di rollio ω_φ . Il metodo secondo la presente invenzione fornisce in uscita, alla fase 300, la determinazione di tali variabili di stato.

Con particolare riferimento alla fase 200 di elaborazione dei segnali in ingresso, alla fase 201 si determina la stima a priori della derivata temporale delle variabili di stato $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ secondo la funzione:

15

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \quad (11)$$

dove:

- k indica l'istante temporale attuale;
- $k-1$ indica l'istante temporale precedente;
- 20 - $\mathbf{f}$ indica la parte destra delle equazioni di stato non lineari del modello M;
- $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ indica la stima a posteriori delle variabili di stato al tempo $k-1$;

Successivamente, alla fase 202, si determina la stima a priori delle variabili di stato $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$, integrando la derivata sopra riportata $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$.

Volendo, è possibile ottenere tale stima a priori utilizzando la seguente
25 formula alle differenze finite in avanti:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \Delta t \quad (12)$$

dove Δt rappresenta il campione temporale.

Nell'esempio di realizzazione considerato, la stima a priori della matrice di

5 covarianza $\mathbf{P}$ è data da:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (13)$$

dove $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$

- φ è la stima a posteriori della matrice di covarianza al tempo $k-1$;

10 - $\mathbf{F}$ è una matrice di funzioni definite come $\mathbf{F} = \mathbf{I} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Delta t$;

- $\mathbf{F}_{k-1}$ è la matrice $\mathbf{F}$ al tempo $k-1$;

- $\mathbf{Q}_{k-1}$ è la matrice di covarianza del rumore di processo al tempo $k-1$

Una volta ottenuta la stima a priori delle variabili di stato alla fase 202, si attende alla fase 203 che la misura successiva della variabile osservata y_k sia
15 disponibile.

Alla fase 204 si calcola la stima a priori della variabile osservata secondo la formula:

$$\hat{y}_{k|k-1} = \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{\varphi, k|k-1} \quad (14)$$

in cui $\mathbf{H}$ indica la matrice di uscita che isola la velocità di rollio rispetto alle
20 variabili di stato.

Tale determinazione a priori è inviata in ingresso alla fase 205 dove viene calcolata la differenza tra la variabile osservata y_k , misurata alla fase 100, e la sua stima a priori $\hat{y}_{k|k-1}$.

Alla fase 206, quindi, si calcola la correzione a posteriori, secondo le
25 formule:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{H}^T \mathbf{S}_k^{-1} \quad (16)$$

5

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{K}_k \left(y_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \quad (17)$$

dove:

- $\mathbf{R}$ rappresenta la matrice di covarianza del rumore di misura al tempo k ;
- $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ rappresenta la correzione dell'errore.

10

La stima a posteriori delle variabili di stato $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ viene eseguita alla fase
207 andando a sommare la correzione dell'errore $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ alla stima a priori $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$.

15

Vantaggiosamente, come si noter , la stima a priori dell'angolo di rollio e
della velocit  di rollio $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ viene eseguita, secondo il metodo della presente
invenzione, sulla base delle velocit  angolare ω_Z e di avanzamento V del
veicolo. Tale determinazione viene quindi corretta sulla base della velocit 
angolare ω_X e considerando le matrici di covarianza delle misure e del rumore
del modello.

20

Il fatto che il modello M della dinamica del veicolo secondo il metodo della
presente invenzione abbia dimensioni ridotte, lo rende molto semplice da
implementare e molto efficiente da calcolare anche in tempo reale a frequenza di
campionamento di 100 Hz e oltre e con componenti hardware molto economici.

Il vantaggio di questo metodo di determinazione dell'angolo di rollio di un
veicolo   che   possibile ottenere, anche in tempo reale, una misura affidabile di
questo parametro φ in qualsiasi condizione di corsa, rettilineo compreso, curva

in stato stazionario (raggio di curvatura costante percorsa dal veicolo a velocità costante) e qualsiasi manovra transitoria.

Orbene, il modello M sopra descritto si basa sull'ipotesi che il rumore di processo $\mathbf{w}$ e l'errore di osservazione v siano Gaussiani a media nulla.

5 E' tuttavia possibile che le misure delle velocità angolari ω_X e ω_Z siano affette da errori sistematici, rispettivamente $\varepsilon_X, \varepsilon_Z$. Volendo tenere conto di tali errori sistematici nell'acquisizione delle misure delle velocità angolari, il modello M viene rappresentato, secondo una sua prima variante, mediante la seguente rappresentazione in spazio di stato, cui viene assegnato il riferimento Me:

$$\begin{aligned}
 10 \quad \dot{\varphi} &= \omega_\varphi \\
 \dot{\omega}_\varphi &= \frac{\left(\omega_\varphi^2 r_t \sin \varphi + g \sin \varphi - (\omega_z + \varepsilon_z) V \right) h_1 - \frac{r_t (\omega_z + \varepsilon_z) V}{\cos \varphi}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} \\
 &+ \frac{(\omega_z + \varepsilon_z)^2 h_1 \sin \varphi \left[(h - r_t) \cos \varphi + r_t \right]}{\left[h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m \right] \cos^2 \varphi} \quad (\text{Me}) \\
 15 \quad &+ \frac{(\omega_z + \varepsilon_z)^2 \tan \varphi - \frac{(\omega_z + \varepsilon_z) V}{r_r + r_t (\cos \varphi - 1)} \frac{I_w}{m}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} \\
 \dot{\varepsilon}_X &= 0 \\
 \dot{\varepsilon}_Z &= 0
 \end{aligned}$$

20

dove:

il vettore delle variabili di stato è: $\mathbf{x} = \left(\varphi \quad \omega_\varphi \quad \varepsilon_X \quad \varepsilon_Z \right)^T$

e la variabile osservata è: $y = \omega_\varphi + \varepsilon_Z$

Tale modello Me è applicabile, in modo analogo a quanto descritto sopra

25 con riferimento al modello M, ad un filtro di Kalman esteso.

Secondo una seconda variante del modello della dinamica del veicolo, in condizioni di rollio ridotto il modello M sopra descritto è linearizzabile rispetto all'angolo di rollio φ ed assume, in tal caso, la seguente formulazione (modello ML):

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega_{\varphi} \\ \dot{\omega}_{\varphi} &= \frac{(\omega_{\varphi}^2 r_t + g)\varphi h_1 - h\omega_z V}{h_1 h + I_x/m} + \frac{\omega_z^2 h_1 h \varphi}{h_1 h + I_x/m} + \frac{\omega_z^2 \varphi - \omega_z \frac{V}{r_r} \frac{I_w}{m}}{h_1 h + I_x/m} \end{aligned} \quad (\text{ML})$$

il vettore delle variabili di stato essendo: $\mathbf{x} = (\varphi \quad \omega_{\varphi})^T$

$$10 \quad \text{la variabile osservata essendo: } y = \omega_{\varphi}$$

Anche in questo caso, volendo tener conto dei possibili errori sistematici $\varepsilon_X, \varepsilon_Z$ associati alle rispettive misure delle velocità angolari ω_X e ω_Z , la rappresentazione in spazio di stato del modello ML secondo una terza variante del modello della dinamica del veicolo (indicata per comodità con MLe) diventa la seguente:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega_{\varphi} \\ \dot{\omega}_{\varphi} &= \frac{(\omega_{\varphi}^2 r_t + g)\varphi h_1 - h\omega_z V}{h_1 h + I_x/m} + \frac{\omega_z^2 h_1 h \varphi}{h_1 h + I_x/m} + \frac{\omega_z^2 \varphi - \omega_z \frac{V}{r_r} \frac{I_w}{m}}{h_1 h + I_x/m} \\ \dot{\varepsilon}_X &= 0 \\ \dot{\varepsilon}_Z &= 0 \end{aligned} \quad (\text{MLe})$$

dove il vettore delle variabili di stato è: $\mathbf{x} = (\varphi \quad \omega_{\varphi} \quad \varepsilon_X \quad \varepsilon_Z)^T$

$$25 \quad \text{e la variabile osservata è: } y = \omega_{\varphi} + \varepsilon_Z$$

Le varianti Me, ML ed MLe del modello M sono tutte vantaggiosamente applicabili ad un filtro di Kalman esteso sulla base del quale l'unità di elaborazione dati U del dispositivo secondo la presente invenzione elabora la stima dell'angolo di rollio del veicolo.

Per testare la validità del metodo secondo la presente invenzione, sono stati eseguiti dei test sperimentali, sia al calcolatore che su strada, i quali vengono qui di seguito descritti.

Per quanto riguarda i test al calcolatore, per avere a disposizione dati realistici sui quali applicare il metodo di determinazione secondo la presente invenzione, è stato utilizzato, per rappresentare la dinamica del veicolo, un modello, validato sperimentalmente, descritto nell'articolo della rivista "Meccanica", 2011, 46(5), pp. 943-958, avente titolo "An advanced multibody code for handling and stability analysis of motorcycles" ("Un codice multicorpo avanzato per l'analisi di stabilità e maneggevolezza di motocicli"), autori Cossalter V., Lot R., Massaro M..

Tale modello è completamente non lineare ed include tutti i componenti principali di un motociclo (chassis, ruote, forcellone, pinze dei freni ed altre masse non sospese, catena di trasmissione). Il modello presenta dodici gradi di libertà di moto rigido e gradi di libertà aggiuntivi (indicati anche con DoF) utilizzati per descrivere la deformabilità del telaio del veicolo.

Il modello utilizzato per rappresentare il pneumatico è pure non lineare e prende in considerazione la geometria della carcassa del pneumatico e la sua deformazione, la quale influenza in modo evidente le dinamiche di rotolamento del veicolo. In aggiunta, si è utilizzato anche un modello di pilota virtuale

avanzato, come descritto negli articoli di Lot, R., Massaro, M., Sartori, R. 2008, "Advanced motorcycle virtual rider" ("Pilota virtuale di motocicletta avanzato"), Vehicle System Dynamics, vol. 46, no. SUPPL.1, pp. 215-224, e di Massaro M., Lot R., 2010, "A Virtual Rider for Two-Wheeled Vehicles" ("Un pilota virtuale per
 5 veicoli a due ruote"), Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta (GA), pp. 5586-5591. Il modello di pilota virtuale è in grado di effettuare manovre impegnative con valori elevati di velocità sia longitudinali che laterali.

TEST 1

10 Nel primo caso, si è considerato un veicolo in movimento alla velocità costante di 20m/s lungo un rettilineo diritto che giunge ad una curva stazionaria con accelerazione laterale finale di 6m/s^2 , corrispondente ad un angolo di rollio di 42.4° ed a una velocità di imbardata di $22.8^\circ/\text{s}$ (Figure 4a, 4b e 4c).

Più in particolare nella Figura 4a , sono rappresentati i segnali della
 15 velocità di rollio ω_φ , della velocità di imbardata ω_ψ e delle velocità angolari ω_X e ω_z simulate al calcolatore. Tali segnali sono stati utilizzati per la determinazione dell'angolo di rollio secondo il metodo della presente invenzione (applicando al filtro di Kalman esteso i modelli della dinamica del veicolo M, Me, ML ed MLe) e secondo metodi alternativi noti che saranno qui sotto descritti.

20 Si noterà che i parametri ω_X e ω_z differiscono dai parametri ω_φ e ω_ψ a causa della dinamica del veicolo (in particolare per il movimento di rollio e beccheggio) ed a causa di rumore che è stato aggiunto ai dati, rispettivamente un rumore bianco di $3^\circ/\text{s}$ rms più un errore sistematico (offset) di $1^\circ/\text{s}$, per ω_X , ed un rumore bianco di $3^\circ/\text{s}$ rms per ω_z .

La Figura 4b mostra l'angolo di rollio simulato con frequenza di campionamento di 100 Hz e tre stime diverse ottenute, la prima, mediante una semplice integrazione del segnale ω_X , la quale evidenzia un errore di deriva non trascurabile causato dall'aggiunta, nel modello, dell'errore di offset.

5 La seconda stima dell'angolo di rollio è stata ottenuta applicando il modello ML della dinamica del veicolo ad un filtro di Kalman : come si evince, tale determinazione non è soggetta ad errore di deriva ma mostra un errore statico medio di circa 5° e prova la necessità di ricorrere ad un metodo di determinazione non lineare per la determinazione dell'angolo di rollio.

10 L'applicazione del Filtro di Kalman esteso, con modello M della dinamica del veicolo, si veda sempre la figura 4b, fornisce una stima dell'angolo di rollio combaciante perfettamente con il valore dell'angolo di rollio simulato ed evidenzia soltanto un rumore di 0.6° rms, il quale è comunque molto inferiore rispetto al rumore aggiunto ai dati.

15 La Figura 4c mostra invece i risultati della stima dell'angolo di rollio, eseguita con i modelli M ed Me della dinamica del veicolo. Ai dati di entrambe le velocità angolari ω_X e ω_Z è stato aggiunto un rumore bianco di $2^\circ/\text{s}$ rms più un errore sistematico (offset) di $1^\circ/\text{s}$. I risultati indicano che l'applicazione del modello M non consente di correggere eventuali errori sistematici associati alla
20 velocità angolare ω_Z . Tali errori sono in parte compensati con il modello Me.

TEST 2

Il secondo caso simula un tratto di percorso naturalistico lungo 600 m che include quattro curve (rispettivamente a sinistra, destre, sinistra ed ancora
25 sinistra rispetto alla direzione di avanzamento del veicolo) con un angolo di rollio

fino a 42° , come mostrato in Figura 5. La frequenza di campionamento del segnale è stata, anche in questo caso, pari a 100 Hz. Come nel test precedente, si è aggiunto sia rumore bianco che errore sistematico ai dati e la determinazione dell'angolo di rollio si è ottenuta applicando una semplice integrazione del
5 segnale ω_X oppure il filtro di Kalman esteso secondo la presente invenzione impiegando il modello M per la dinamica del veicolo. Si è riscontrata nuovamente, si veda in particolare la Figura 5 in basso, una buona affidabilità delle stime fornite in uscita dal metodo secondo la presente invenzione, con un errore massimo di circa 4° ed errori rms di 1.5° .

10

VALIDAZIONE SPERIMENTALE

La validazione finale del metodo secondo la presente invenzione si è condotta su strada, utilizzando un motociclo da strada a 750cc. Il veicolo è stato equipaggiato con due gruppi di sensori diversi, uno preposto all'acquisizione dei
15 dati da inviare in ingresso all'unità di elaborazione dati per il calcolo dell'angolo di rollio secondo il metodo della presente invenzione, l'altro gruppo per collezionare dati aggiuntivi al fine di ottenere una seconda determinazione, indipendente, dell'angolo di rollio del veicolo.

Per comodità, il primo set di sensori, montato sotto la sella del veicolo,
20 comprendeva tre girometri, tre accelerometri ed un ricevitore GPS incorporati in un unico dispositivo (IMU – Inertial measurement Platform). Con un tale gruppo di sensori si sono acquisite le velocità angolari ω_X , ω_z e V . Il secondo gruppo di sensori comprendeva una coppia di sensori laser montati sul forcellone, rispettivamente a destra ed a sinistra della ruota posteriore del veicolo, per
25 misurare la rispettiva distanza Z_R e Z_L dal piano stradale durante il movimento del

veicolo stesso (si veda Figura 6) In questo caso, l'angolo di rollio è calcolabile tramite la formula:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{z_L - z_R}{B} \cos \alpha\right)$$

5 dove:

B è la distanza tra i due sensori laser

α è l'oscillazione del forcellone rispetto al piano stradale. Quest'ultimo valore è ignoto e, pertanto, rappresenta un rumore di misurazione. Tuttavia, poiché le oscillazioni del forcellone sono molto limitate ($\pm 5^\circ$ rispetto alla configurazione
10 nominale o anche meno) l'errore nella determinazione dell'angolo di rollio, causato da questo fattore si è verificato essere inferiore allo 0.5%, anche in presenza di ampi angoli di curvatura.

I test sperimentali con un veicolo così equipaggiato sono stati condotti presso il circuito di Monza (illustrato schematicamente in Figura 7). I dati relativi a
15 velocità di avanzamento del veicolo (con picco a 170km/h), velocità angolari ω_X e ω_Z e stime dell'angolo di rollio sono rappresentati in Figura 8.

La differenza riscontrata tra la determinazione dell'angolo di rollio con i sensori laser e quella ottenuta con il metodo secondo la presente invenzione (impiegante un filtro di Kalman esteso con modello M per la dinamica del veicolo)
20 ha un r.m.s. di circa 4° con alcuni picchi attorno a 10° . Questo errore è maggiore rispetto a quello ottenuto con i test di prova eseguiti al calcolatore ma è accettabile se confrontato con i metodi di determinazione della tecnica nota. Si noterà inoltre dalla Figura 8 che le performance dei sensori laser non sono state
25 grafico. L'analisi dei risultati, tra l'altro, non ha evidenziato la presenza di alcun

errore sistematico nella determinazione dell'angolo di rollio né errori maggiori in corrispondenza ad angoli di rollio più elevati.

Vantaggiosamente, il metodo di determinazione dell'angolo di rollio secondo la presente invenzione è implementabile in sistemi cosiddetti a "scatola nera", installabili a bordo di veicoli e preposti a registrare i dati di navigazione. I sistemi a scatola nera prevedono, come è noto, la possibilità di esaminare a posteriori i dati registrati, ad esempio in caso di incidente stradale (ad esempio, una caduta dal veicolo oppure l'impatto con un altro corpo o veicolo).

Il dispositivo secondo la presente invenzione, adibibile a sistema a "scatola nera" secondo un esempio di realizzazione della presente invenzione comprende (si veda la Figura 9):

- primi mezzi sensori delle velocità angolari del veicolo, tipicamente un primo girometro orientato secondo l'asse di avanzamento del veicolo ed un secondo girometro orientato secondo un asse perpendicolare al piano stradale

- secondi mezzi sensori della velocità di un veicolo, acquisibile in via diretta mediante un sensore adatto qualsiasi oppure indirettamente mediante un sistema GPS;

- una unità di acquisizione ed elaborazione dati U cui i mezzi sensori sono elettricamente connessi;

- mezzi di memoria S, elettricamente connessi all'unità di acquisizione ed elaborazione dati, sui quali memorizzare i dati acquisiti ed elaborati dall'unità di acquisizione ed elaborazione dati; e

- mezzi di ingresso/uscita I/O, pure connessi all'unità di acquisizione ed elaborazione dati, previsti per il collegamento, anche remoto, con una unità di elaborazione dati esterna.

Mezzi di ingresso/uscita potrebbero essere, ad esempio, uno schermo visualizzatore oppure una porta di accesso USB oppure un ricevitore/trasmittitore dati a distanza o altro mezzo adatto qualsiasi.

Un tale dispositivo, implementante il metodo secondo la presente
5 invenzione, consente la determinazione dell'angolo di rollio durante tutta la corsa del veicolo e, quindi, anche nella fase immediatamente precedente un incidente stradale.

Opzionalmente, la determinazione dell'angolo di rollio, che può essere effettuata tanto in tempo reale dall'unità di acquisizione ed elaborazione dati,
10 quanto a posteriori, nell'unità di elaborazione dati esterna, una volta scaricati in essa i dati di navigazione, consentirebbe di ricostruire in modo efficace la dinamica dell'incidente.

Secondo una ulteriore variante della presente invenzione, il dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo può essere
15 vantaggiosamente integrato in un dispositivo elettronico di trasmissione di dati a distanza portatile, quale un telefono cellulare, tipicamente uno smart phone, oppure ad esempio un I-PAD e similari, per cui la presente invenzione si riferisce anche ad un tale dispositivo elettronico di trasmissione di dati a distanza portatile includente un dispositivo secondo la presente invenzione. Un utente dotato di un
20 dispositivo elettronico di trasmissione di dati a distanza portatile potrebbe, ad esempio per divertimento, percorrere con un veicolo un percorso stradale ed acquisire, per la durata del percorso, i parametri relativi alla traiettoria seguita dal veicolo, ossia (posizione, velocità e, grazie al metodo secondo la presente invenzione, l'angolo di rollio).

Il metodo ed il dispositivo sopra descritti sono suscettibili di numerose modifiche e varianti entro l'ambito di protezione definito dalle rivendicazioni che seguono.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo (4), comprendente le seguenti fasi operative:

- determinare la velocità angolari (ω_z e ω_x) del veicolo (fase 100), dette velocità angolari essendo determinate con riferimento ad un asse che giace sul piano sagittale o di simmetria di detto veicolo (4) ed è rivolto, rispettivamente, verso il basso e verso la direzione di avanzamento del veicolo;

- determinare la velocità di avanzamento (V) del veicolo (fase 100);

- determinare, sulla base di dette velocità angolari e di avanzamento (ω_z , ω_x e V), l'angolo di rollio (φ) di detto veicolo (fase 200).

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detta fase 200 di determinazione dell'angolo di rollio (φ) di detto veicolo (4) prevede di fornire dette velocità angolari e di avanzamento (ω_z , ω_x e V) in ingresso ad un filtro di Kalman esteso.

3. Metodo secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che detto filtro di Kalman esteso si basa su un modello (M, ML) della dinamica di detto veicolo (4), le cui variabili di stato sono l'angolo di rollio (φ) e la velocità di rollio (ω_φ).

4. Metodo secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_φ) sono correlate all'inerzia di detto veicolo (4), alle dimensioni ed all'inerzia delle ruote dello stesso.

5. Metodo secondo le rivendicazioni 3 o 4, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_φ) sono correlate :

- alla massa (m) del veicolo;
- all'altezza (h) del centro di massa del veicolo,
- 5 - al momento di inerzia (I_x) rispetto all'asse passante per detto centro di massa e parallelo all'asse longitudinale di detto veicolo;
- alla somma (I_w) dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
- al raggio di rotolamento (r_r) medio tra dette ruote anteriori e posteriori di
- 10 detto veicolo;
- al valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del veicolo) del raggio (r_t) di un cerchio (9) che comprende la sezione trasversale del pneumatico di dette ruote di detto veicolo; ed
- all'accelerazione gravitazionale (g).

15

6. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni da 3 a 5, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_φ) sono correlate :

- alla massa (m) del veicolo;
- all'altezza (h) del centro di massa del veicolo,
- 20 - al momento di inerzia (I_x) rispetto all'asse passante per detto centro di massa e parallelo all'asse longitudinale di detto veicolo;
- alla somma (I_w) dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
- al raggio di rotolamento (r_r) medio tra dette ruote anteriori e posteriori di
- 25 detto veicolo;

- al valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del veicolo) del raggio (r_t) di un cerchio (9) che comprende la sezione trasversale del pneumatico di dette ruote di detto veicolo; ed
- all'accelerazione gravitazionale (g)

5 secondo la relazione

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega_{\varphi} \\ \dot{\omega}_{\varphi} &= \frac{\left(\omega_{\varphi}^2 r_t \sin \varphi + g \sin \varphi - \omega_z V\right) h_1 - \frac{r_t \omega_z V}{\cos \varphi}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} \\ &+ \frac{\omega_z^2 h_1 \sin \varphi \left[h_1 \cos \varphi + r_t\right]}{\left[h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m\right] \cos^2 \varphi} \\ &+ \frac{\omega_z^2 \tan \varphi - \frac{\omega_z V}{r_r + r_t (\cos \varphi - 1)} \frac{I_w}{m}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m}\end{aligned}$$

15

7. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni da 3 a 5, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_{φ}) sono correlate :

- alla massa (m) del veicolo;
- all'altezza (h) del centro di massa del veicolo,
- 20 - al momento di inerzia (I_x) rispetto all'asse passante per detto centro di massa e parallelo all'asse longitudinale di detto veicolo;
- alla somma (I_w) dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
- al raggio di rotolamento (r_r) medio tra dette ruote anteriori e posteriori di
- 25 detto veicolo;

- al valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del veicolo) del raggio (r_t) di un cerchio (9) che comprende la sezione trasversale del pneumatico di dette ruote di detto veicolo; ed
- all'accelerazione gravitazionale (g)

5 secondo la relazione

$$\dot{\varphi} = \omega_{\varphi}$$

$$\dot{\omega}_{\varphi} = \frac{(\omega_{\varphi}^2 r_t + g) \varphi h_1 - h \omega_z V}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 h_1 h \varphi}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 \varphi - \omega_z \frac{V}{r_r} \frac{I_w}{m}}{h_1 h + I_x / m}$$

10

8. Metodo secondo la rivendicazione 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detto filtro di Kalman esteso si basa su un modello (M_e , MLe) della dinamica di detto veicolo (4), le cui variabili di stato sono l'angolo di rollio (φ), la velocità di rollio (ω_{φ}) e gli errori sistematici ($\varepsilon_X, \varepsilon_Z$) correlati a dette velocità angolari (ω_Z e ω_X).

15

9. Metodo secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_{φ}) sono correlate all'inerzia di detto veicolo (4), alle dimensioni ed all'inerzia delle ruote dello stesso.

20 10. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni 8 o 9, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_{φ}) sono correlate :

- alla massa (m) del veicolo;
- all'altezza (h) del centro di massa del veicolo,
- al momento di inerzia (I_x) rispetto all'asse passante per detto centro di

25 massa e parallelo all'asse longitudinale di detto veicolo;

- alla somma (I_w) dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
- al raggio di rotolamento (r_r) medio tra dette ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
- 5 - al valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del veicolo) del raggio (r_t) di un cerchio (9) che comprende la sezione trasversale del pneumatico di dette ruote di detto veicolo; ed
- all'accelerazione gravitazionale (g).

10 11. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni da 8 a 10, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_φ) sono correlate :

- alla massa (m) del veicolo;
 - all'altezza (h) del centro di massa del veicolo,
 - al momento di inerzia (I_x) rispetto all'asse passante per detto centro di
 - 15 massa e parallelo all'asse longitudinale di detto veicolo;
 - alla somma (I_w) dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
 - al raggio di rotolamento (r_r) medio tra dette ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;
 - 20 - al valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del veicolo) del raggio (r_t) di un cerchio (9) che comprende la sezione trasversale del pneumatico di dette ruote di detto veicolo; ed
 - all'accelerazione gravitazionale (g)
- secondo la relazione

$$\dot{\phi} = \omega_{\phi}$$

$$\dot{\omega}_{\phi} = \frac{\left(\omega_{\phi}^2 r_t \sin \varphi + g \sin \varphi - (\omega_z + \varepsilon_z) V \right) h_1 - \frac{r_t (\omega_z + \varepsilon_z) V}{\cos \varphi}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m}$$

$$+ \frac{(\omega_z + \varepsilon_z)^2 h_1 \sin \varphi \left[(h - r_t) \cos \varphi + r_t \right]}{\left[h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m \right] \cos^2 \varphi}$$

5

$$+ \frac{(\omega_z + \varepsilon_z)^2 \tan \varphi - \frac{(\omega_z + \varepsilon_z) V}{r_r + r_t (\cos \varphi - 1)} \frac{I_w}{m}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m}$$

$$\dot{\varepsilon}_X = 0$$

$$\dot{\varepsilon}_Z = 0$$

10 12. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni da 8 a 10, caratterizzato dal fatto che dette variabili di stato (φ , ω_{ϕ}) sono correlate :

- alla massa (m) del veicolo;
- all'altezza (h) del centro di massa del veicolo,
- al momento di inerzia (I_x) rispetto all'asse passante per detto centro di

15 massa e parallelo all'asse longitudinale di detto veicolo;

- alla somma (I_w) dell'inerziale di rotazione delle ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;

- al raggio di rotolamento (r_t) medio tra dette ruote anteriori e posteriori di detto veicolo;

20 - al valore medio (calcolato rispetto alle due ruote anteriore e posteriore del veicolo) del raggio (r_t) di un cerchio (9) che comprende la sezione trasversale del pneumatico di dette ruote di detto veicolo; ed

- all'accelerazione gravitazionale (g)

secondo la relazione

25

$$\dot{\phi} = \omega_{\phi}$$

$$\dot{\omega}_{\phi} = \frac{(\omega_{\phi}^2 r_t + g) \phi h_1 - h \omega_z V}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 h_1 h \phi}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 \phi - \omega_z \frac{V}{r_r} \frac{I_w}{m}}{h_1 h + I_x / m}$$

$$\dot{\varepsilon}_X = 0$$

5

$$\dot{\varepsilon}_Z = 0$$

13. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni da 1 a 12, caratterizzato dal fatto di essere eseguibile in tempo reale.

10 14. Dispositivo per la determinazione dell'angolo di rollio di un veicolo secondo il metodo recitato in una qualunque delle rivendicazioni da 1 a 13, caratterizzato dal fatto di comprendere:

- primi mezzi sensori (2,3) atti a rilevare le velocità angolari (ω_z e ω_x) di detto veicolo (4), ciascuna di dette velocità angolari essendo determinata con riferimento ad un asse che giace sul piano sagittale o di simmetria di detto veicolo (4) ed è rivolto, rispettivamente, verso il basso e verso la direzione di avanzamento del veicolo;

15

- secondi mezzi sensori atti a rilevare la velocità di avanzamento (V) di detto veicolo (4);

20 - un'unità di elaborazione dati (U) elettricamente connessa a detti primi e secondi mezzi sensori e preposta a ricevere da essi dette velocità rilevate (ω_z , ω_x e V) ed a fornire in uscita l'angolo di rollio (ϕ) di detto veicolo.

15. Dispositivo elettronico portatile di trasmissione di dati a distanza, quando

25 include un dispositivo secondo la rivendicazione 14.

16. Dispositivo secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto di comprendere uno smart-phone.

5 17. Dispositivo a scatola nera includente un dispositivo secondo la rivendicazione 14 e comprendente:

- mezzi di ingresso/uscita (I/O) elettricamente connessi a detta unità di elaborazione dati (U); e

- mezzi di memoria, elettricamente connessi a detta unità di elaborazione dati (U)

10 ed in grado di mantenere memorizzato, nel tempo, i segnali (ω_z , ω_x e V) rilevati da detti primi e secondi mezzi sensori e l'angolo di rollio (φ) in uscita da detta unità di elaborazione dati (U).

Per il Richiedente: **UNIVERSITÀ degli STUDI di PADOVA**

15 Un Mandatario

CLAIMS

1. A method of determining the roll angle of a vehicle (4), comprising the following operational steps:

- determining the angular speeds (ω_z and ω_x) of the vehicle (step 100), said angular speeds being determined with reference to an axis laying in the sagittal or symmetry plane of said vehicle (4) and directed towards the bottom and towards the advancing direction of the vehicle, respectively;

- determining the advancing speed (V) of the vehicle (step 100);

- determining, on the base of said angular speeds and advancing speed (ω_z , ω_x and V), the roll angle (φ) of said vehicle (step 200).

2. A method according to claim 1, characterized in that said step 200 of determining the roll angle (φ) of said vehicle (4) comprises applying such angular and advancing speeds (ω_z , ω_x and V) to the input of an extended Kalman filter.

3. A method according to claim 2, characterized in that said extended Kalman filter is based on a model (M, ML) of the dynamics of said vehicle (4), the state variables of said model (M, ML) being the roll angle (φ) and the roll rate (ω_φ).

4. A method according to claim 3, characterized in that said state variables (φ , ω_φ) are related to the inertia of said vehicle (4), the dimensions and the inertia of the vehicle wheels.

5. A method according to claims 3 or 4, characterized in that said state variables (φ , ω_φ) are related to:

- the mass (m) of the vehicle;
- the height (h) of the center of mass of the vehicle,
- 5 - the moment of inertia (I_x) with respect to the axis passing through said center of mass and parallel to the longitudinal axis of said vehicle;
- the sum (I_w) of the inertial spin of the rear and front wheels of said vehicle;
- the averaged rolling radius (r_r) between said front and rear wheels of said vehicle;
- 10 - the mean value (calculated between the front and rear wheels of the vehicle) of the radius (r_t) of a circle (9) including the cross section of the tire of said vehicle wheels; and
- gravitational acceleration (g).

15 6. A method according to any claim 3 to 5, characterized in that said state variables (φ , ω_φ) are related to:

- the mass (m) of the vehicle;
- the height (h) of the center of mass of the vehicle,
- the moment of inertia (I_x) with respect to the axis passing through said center of
- 20 mass and parallel to the longitudinal axis of said vehicle;
- the sum (I_w) of the inertial spin of the rear and front wheels of said vehicle;
- the averaged rolling radius (r_r) between said front and rear wheels of said vehicle;

- the mean value (calculated between the front and rear wheels of the vehicle) of the radius (r_t) of a circle (9) including the cross section of the tire of said vehicle wheels; and

- gravitational acceleration (g)

5 according to the formula

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \omega_{\phi} \\ \dot{\omega}_{\phi} &= \frac{\left(\omega_{\phi}^2 r_t \sin \varphi + g \sin \varphi - \omega_z V\right) h_1 - \frac{r_t \omega_z V}{\cos \varphi}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} \\ &+ \frac{\omega_z^2 h_1 \sin \varphi [h_1 \cos \varphi + r_t]}{\left[h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m\right] \cos^2 \varphi} \\ &+ \frac{\omega_z^2 \tan \varphi - \frac{\omega_z V}{r_r + r_t (\cos \varphi - 1)} \frac{I_w}{m}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m}\end{aligned}$$

10

15 7. A method according to any claim 3 to 5, characterized in that said state variables (φ , ω_{ϕ}) are related to:

- the mass (m) of the vehicle;

- the height (h) of the center of mass of the vehicle,

- the moment of inertia (I_x) with respect to the axis passing through said center of

20 mass and parallel to the longitudinal axis of said vehicle;

- the sum (I_w) of the inertial spin of the rear and front wheels of said vehicle;

- the averaged rolling radius (r_r) between said front and rear wheels of said vehicle;

- the mean value (calculated between the front and rear wheels of the vehicle) of the radius (r_t) of a circle (9) including the cross section of the tire of said vehicle wheels; and

- gravitational acceleration (g)

5 according to the formula

$$\dot{\phi} = \omega_{\phi}$$

$$\dot{\omega}_{\phi} = \frac{(\omega_{\phi}^2 r_t + g) \phi h_1 - h \omega_z V}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 h_1 h \phi}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 \phi - \omega_z \frac{V}{r_r} \frac{I_w}{m}}{h_1 h + I_x / m}$$

10

8. A method according to claim 1 or 2, characterized in that said extended Kalman filter is based on a model (Me, MLe) of the dynamics of said vehicle (4), the state variables of said model (Me, MLe) being the roll angle (ϕ), the roll rate (ω_{ϕ}) and the systematic errors ($\varepsilon_X, \varepsilon_Z$) related to said angular speeds (ω_z and ω_X).

15

9. A method according to claim 8, characterized in that said state variables (ϕ, ω_{ϕ}) are related to the inertia of said vehicle (4), to the dimensions and to the inertia of the vehicle wheels.

20

10. A method according to any claim 8 to 9, characterized in that said state variables (ϕ, ω_{ϕ}) are related to:

- the mass (m) of the vehicle;
- the height (h) of the center of mass of the vehicle,

- the moment of inertia (I_x) with respect to the axis passing through said center of mass and parallel to the longitudinal axis of said vehicle;
- the sum (I_w) of the inertial spin of the rear and front wheels of said vehicle;
- the averaged rolling radius (r_r) between said front and rear wheels of said vehicle;
- the mean value (calculated between the front and rear wheels of the vehicle) of the radius (r_t) of a circle (9) including the cross section of the tire of said vehicle wheels; and
- gravitational acceleration (g).

10

11. A method according to any claim 8 to 10, characterized in that said state variables (φ , ω_φ) are related to:

- the mass (m) of the vehicle;
- the height (h) of the center of mass of the vehicle,
- the moment of inertia (I_x) with respect to the axis passing through said center of mass and parallel to the longitudinal axis of said vehicle;
- the sum (I_w) of the inertial spin of the rear and front wheels of said vehicle;
- the averaged rolling radius (r_r) between said front and rear wheels of said vehicle;
- the mean value (calculated between the front and rear wheels of the vehicle) of the radius (r_t) of a circle (9) including the cross section of the tire of said vehicle wheels; and
- gravitational acceleration (g)

according to the formula

25

$$\dot{\varphi} = \omega_{\varphi}$$

$$\dot{\omega}_{\varphi} = \frac{\left(\omega_{\varphi}^2 r_t \sin \varphi + g \sin \varphi - (\omega_z + \varepsilon_z) V \right) h_1 - \frac{r_t (\omega_z + \varepsilon_z) V}{\cos \varphi}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m} + \frac{(\omega_z + \varepsilon_z)^2 h_1 \sin \varphi \left[(h - r_t) \cos \varphi + r_t \right]}{\left[h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m \right] \cos^2 \varphi} + \frac{(\omega_z + \varepsilon_z)^2 \tan \varphi - \frac{(\omega_z + \varepsilon_z) V}{r_r + r_t (\cos \varphi - 1)} \frac{I_w}{m}}{h_1^2 + h_1 r_t \cos \varphi + I_x / m}$$

$$\dot{\varepsilon}_X = 0$$

$$\dot{\varepsilon}_Z = 0$$

12. A method according to any claim 8 to 10, characterized in that said state
15 variables (φ , ω_{φ}) are related to:

- the mass (m) of the vehicle;
- the height (h) of the center of mass of the vehicle,
- the moment of inertia (I_x) with respect to the axis passing through said center of
mass and parallel to the longitudinal axis of said vehicle;
- 20 - the sum (I_w) of the inertial spin of the rear and front wheels of said vehicle;
- the averaged rolling radius (r_r) between said front and rear wheels of said
vehicle;
- the mean value (calculated between the front and rear wheels of the vehicle) of
the radius (r_t) of a circle (9) including the cross section of the tire of said vehicle
25 wheels; and

- gravitational acceleration (g)

according to formula

$$\dot{\varphi} = \omega_{\varphi}$$

5

$$\dot{\omega}_{\varphi} = \frac{(\omega_{\varphi}^2 r_t + g) \varphi h_1 - h \omega_z V}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 h_1 h \varphi}{h_1 h + I_x / m} + \frac{\omega_z^2 \varphi - \omega_z \frac{V}{r_r} \frac{I_w}{m}}{h_1 h + I_x / m}$$

$$\dot{\varepsilon}_X = 0$$

$$\dot{\varepsilon}_Z = 0$$

10 13. A method according to any claim 1 to 12, characterized in that it can be carried out in real time.

14. A device for determining the roll angle of a vehicle according to the method of any claim 1 to 13, characterized in that it comprises:

- 15 - first sensor means (2,3) designed to detect the angular speeds (ω_z and ω_x) of said vehicle (4), said angular speeds being determined with reference to an axis which lays in the sagittal or symmetry plane of said vehicle (4) and is directed downwards and towards the advancing direction of the vehicle, respectively;
- second sensor means arranged to detect the advancing speed (V) of said
- 20 vehicle (4);
- a data processing unit (U) electrically connected to said first and second sensor means and designed to receive therefrom said detected speeds (ω_z , ω_x and V) and to apply in output the roll angle (φ) of said vehicle.

25 15. A portable electronic remote data transmission device including a device

according to claim 14.

16. A device according to claim 15, characterized in that it comprises a smart-phone.

5

17. A black box device including a device according to claim 14 and comprising:

- input/output means (I/O) electrically connected to said data processing unit (U),
and

10 - memory means, electrically connected to said data processing unit (U) and designed to keep stored therein, in time, signals (ω_z , ω_x and V) detected by said first and second sensor means and the roll angle (φ) output from said data processing unit (U).

15 For the Applicant: **UNIVERSITA' di PADOVA**

A Patent Attorney

Tavola 1/8

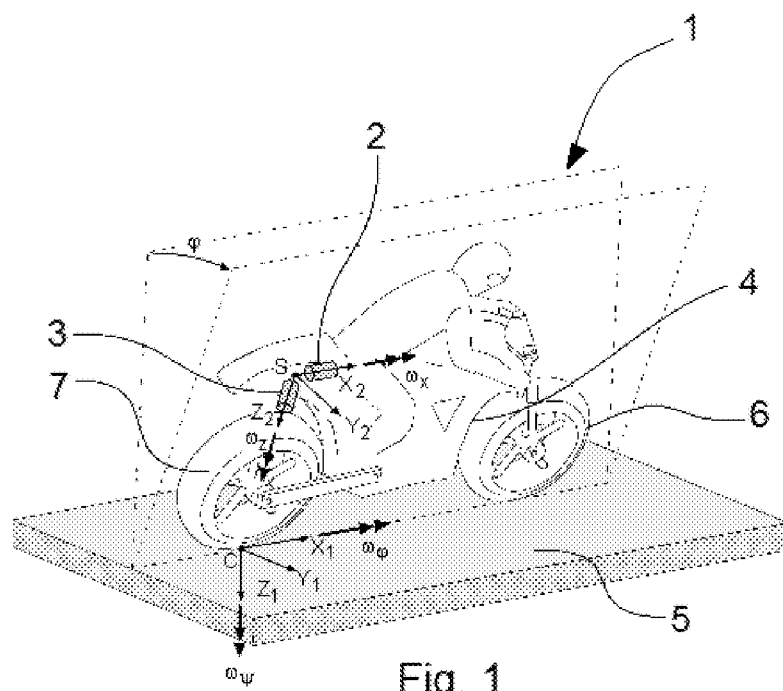


Fig. 1

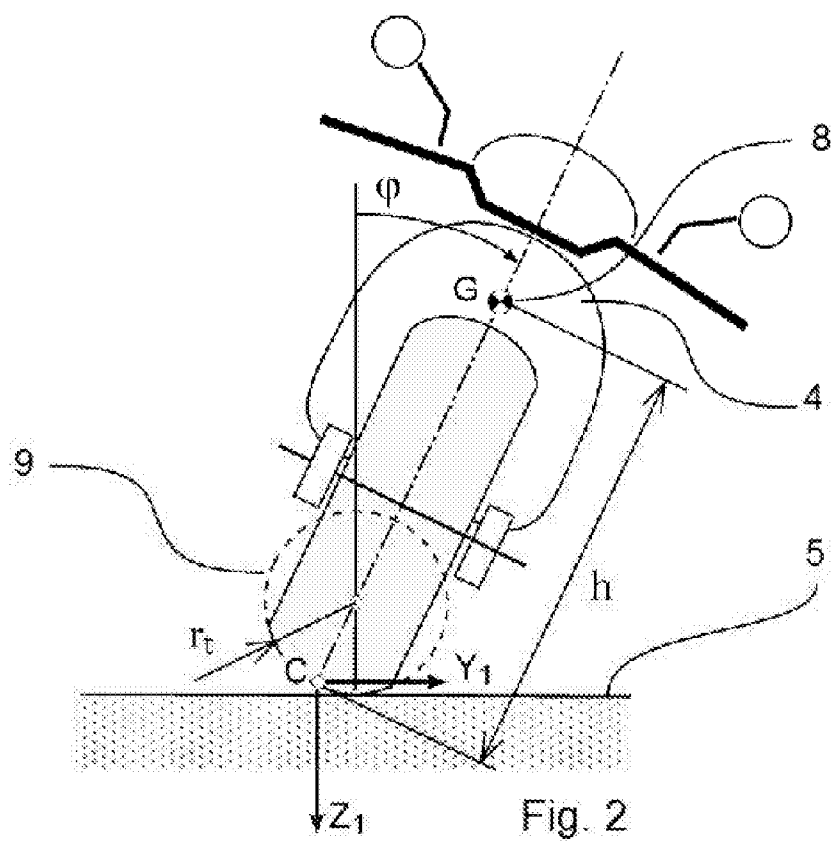


Fig. 2

Tavola 2/8

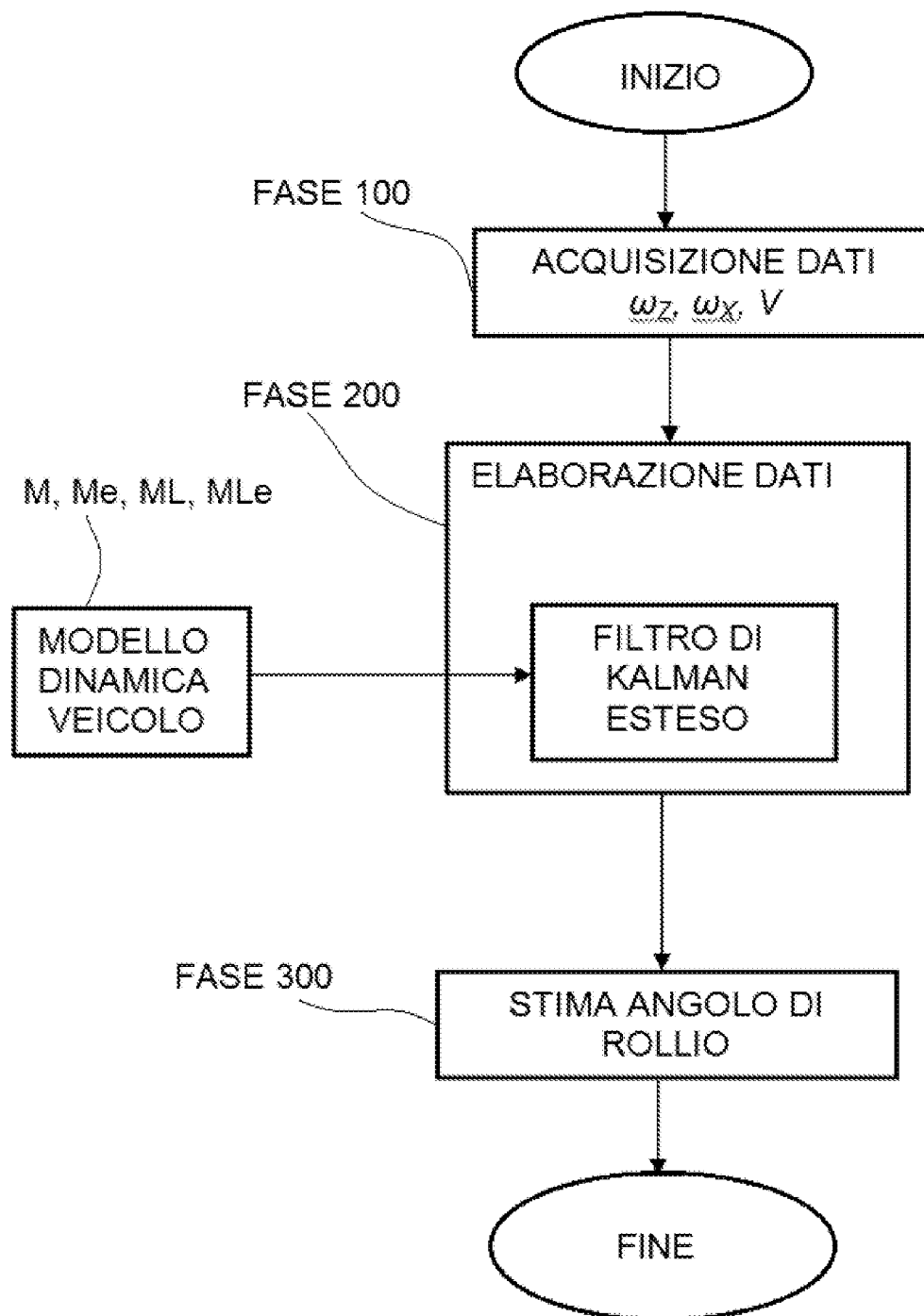


Fig. 3a

Tavola 3/8

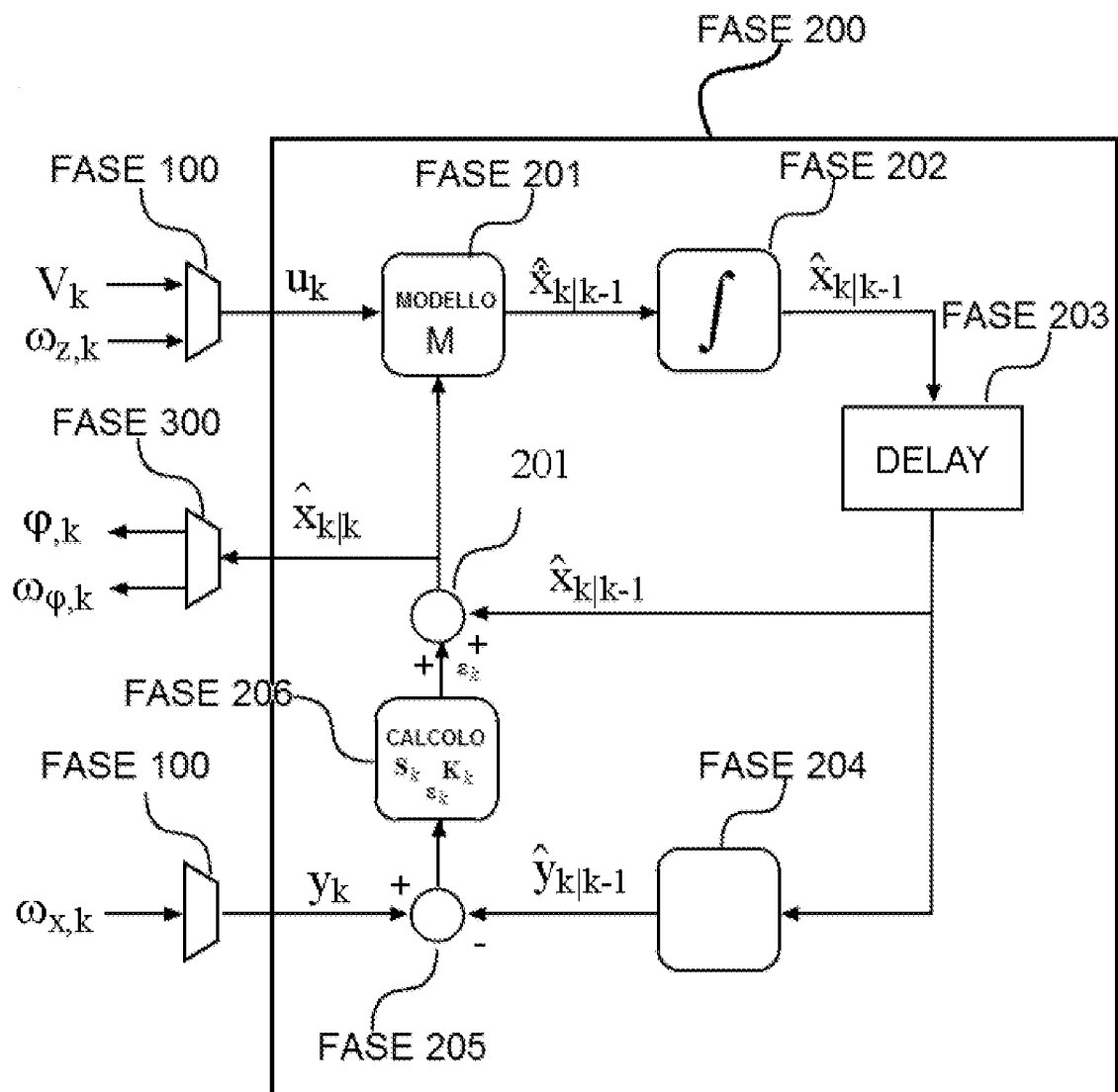


Fig. 3b

Tavola 4/8

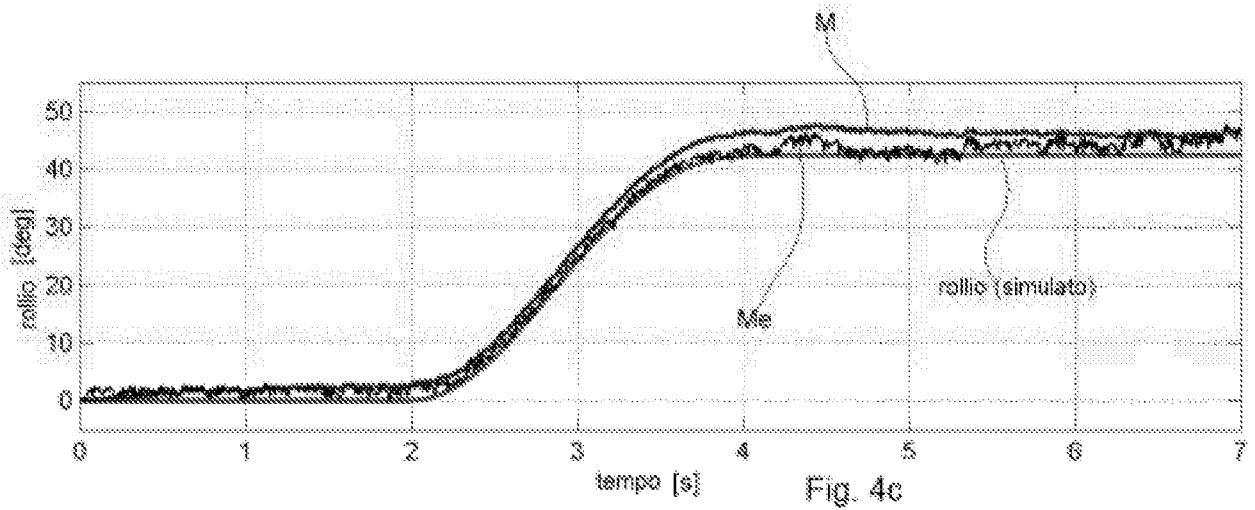
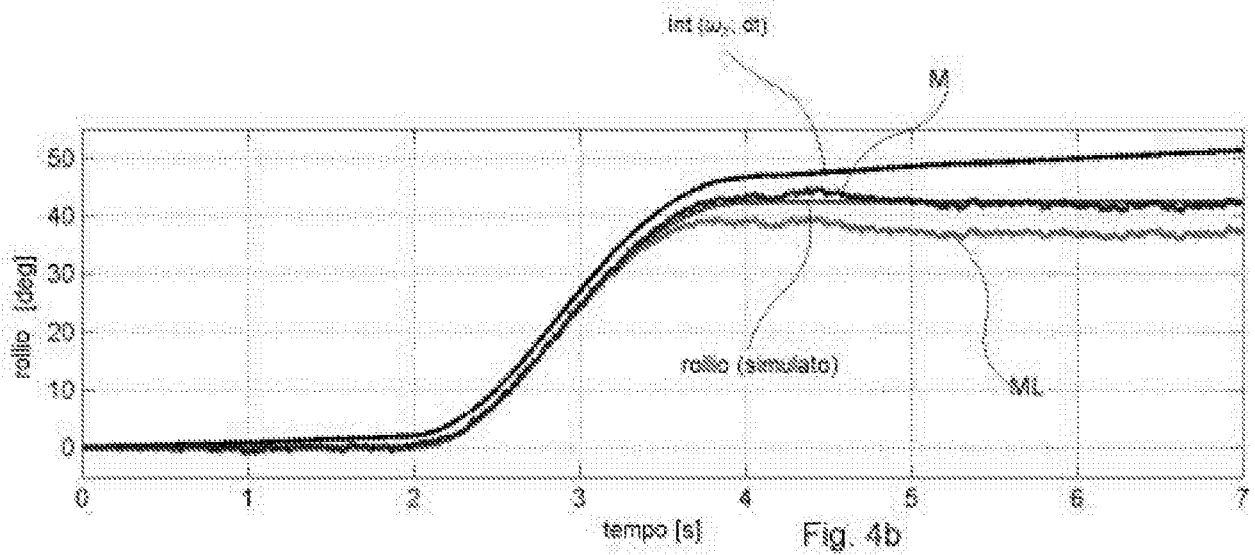
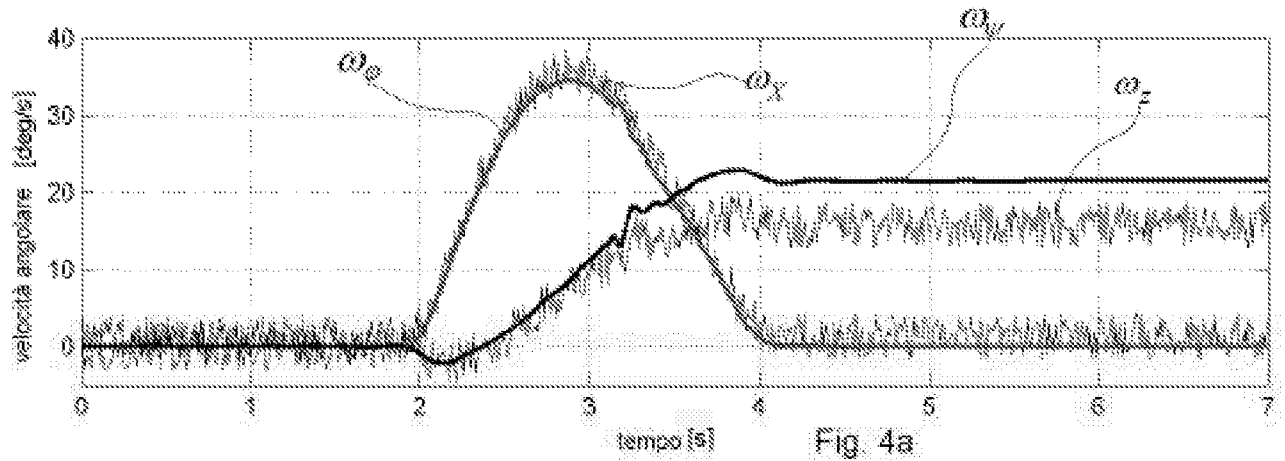


Tavola 5/8

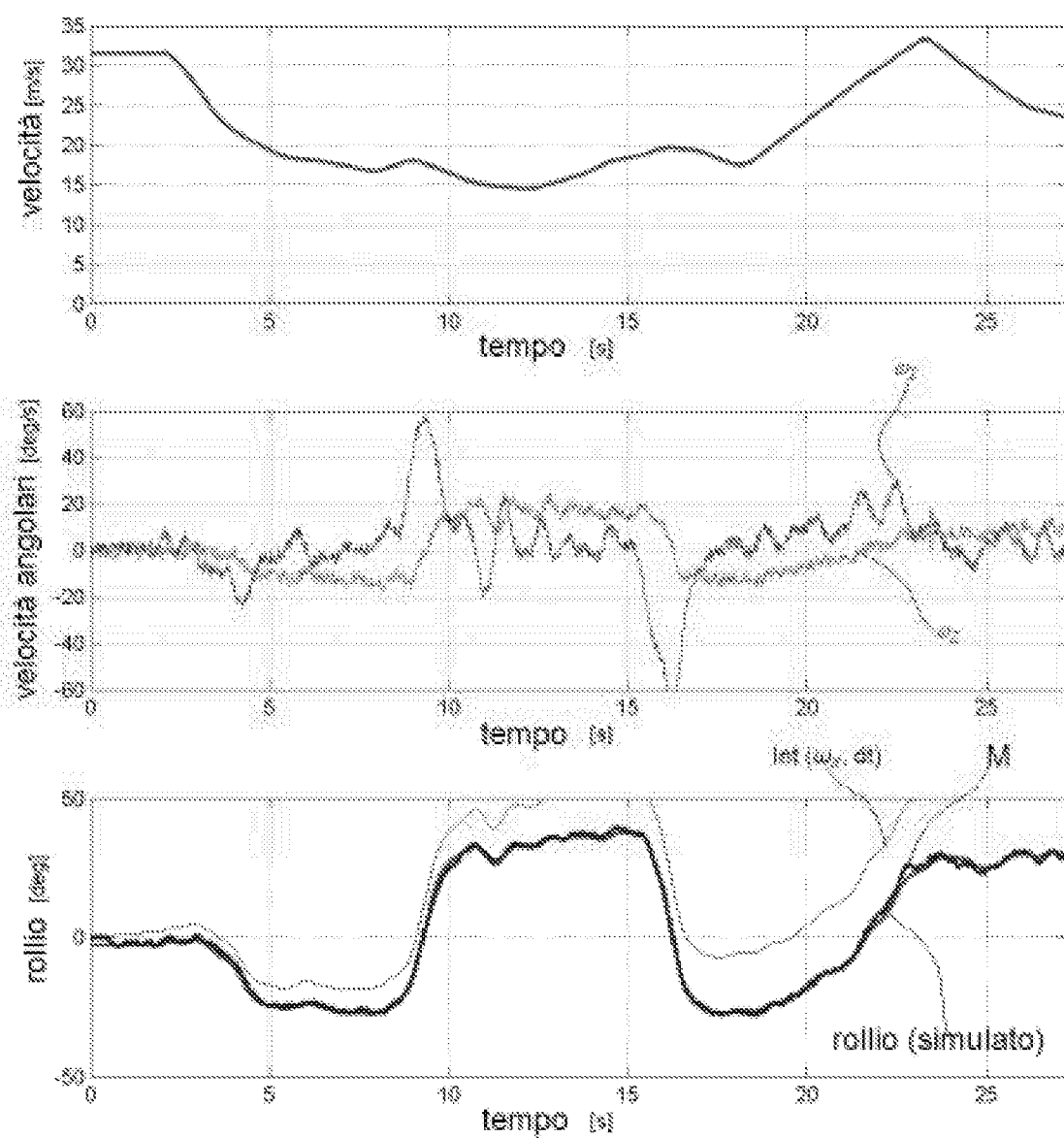


Fig. 5

Tavola 6/8

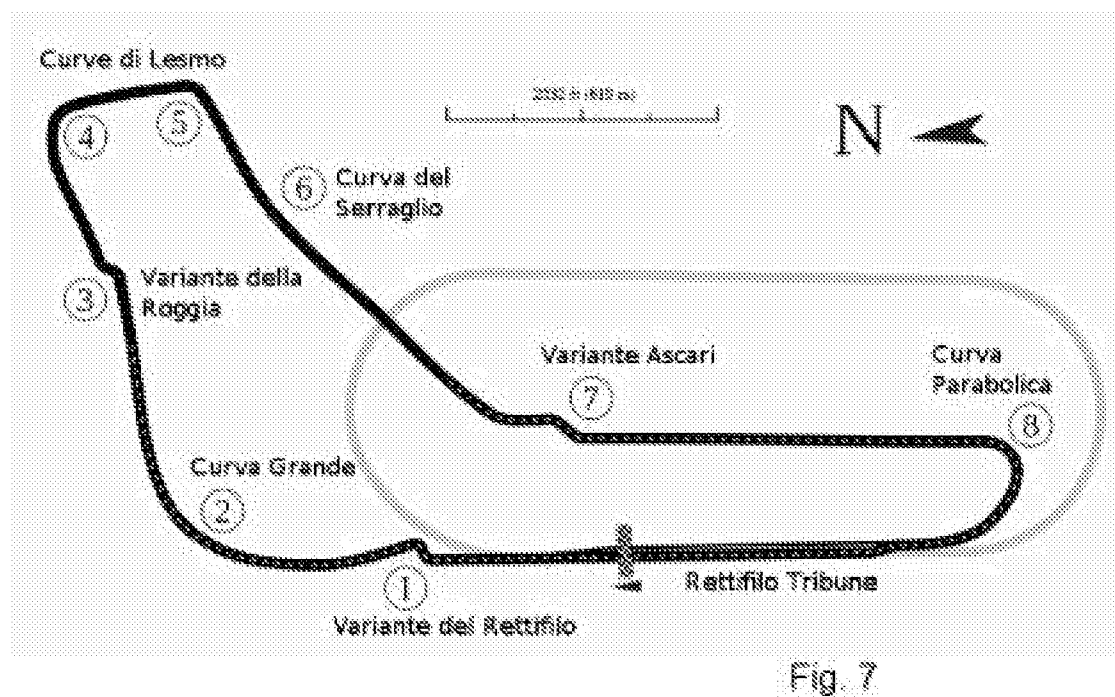
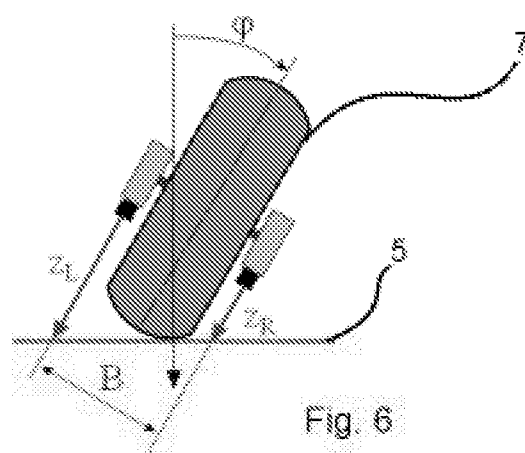


Tavola 7/8

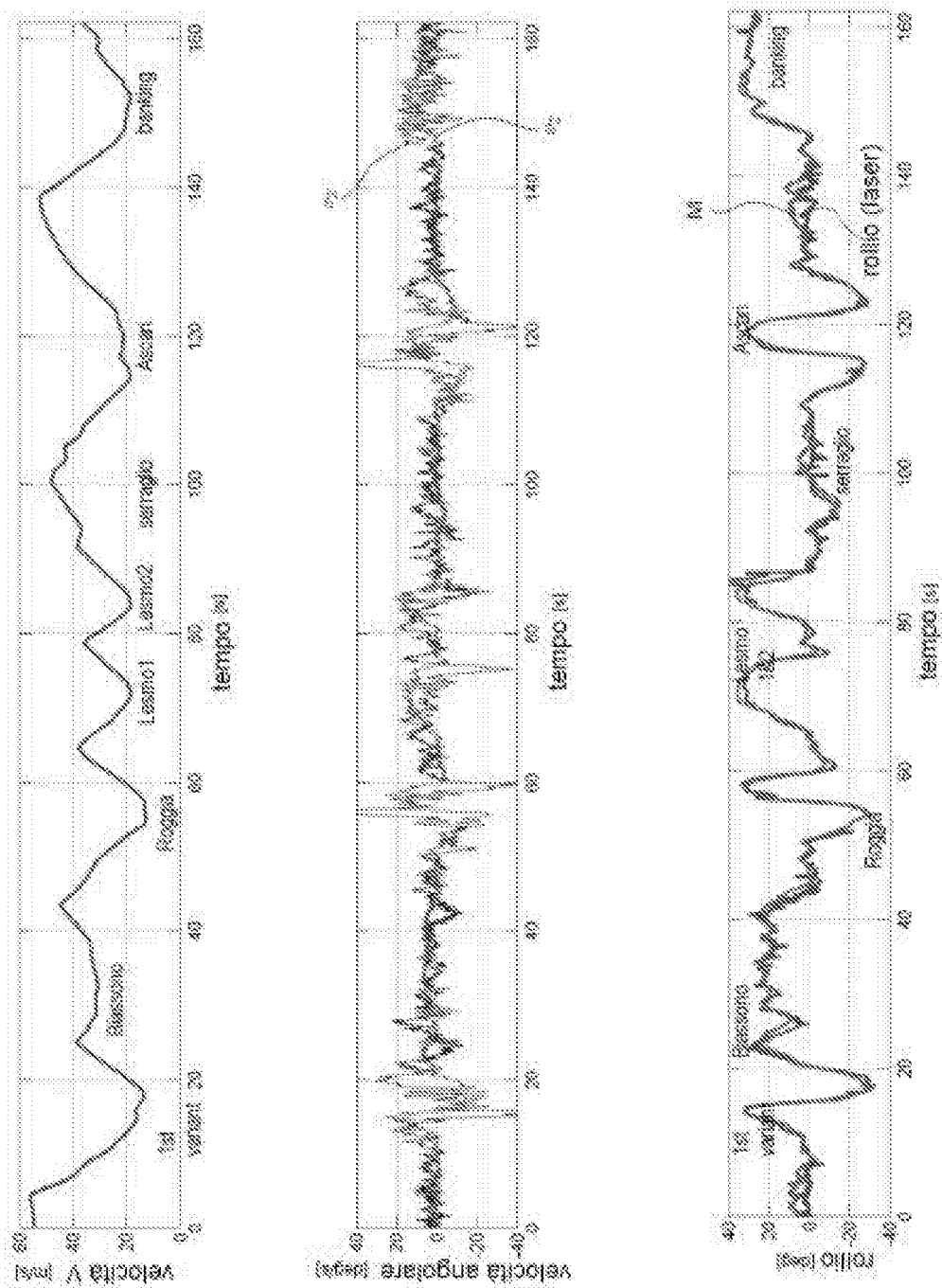


Fig. 8

Tavola 8/8

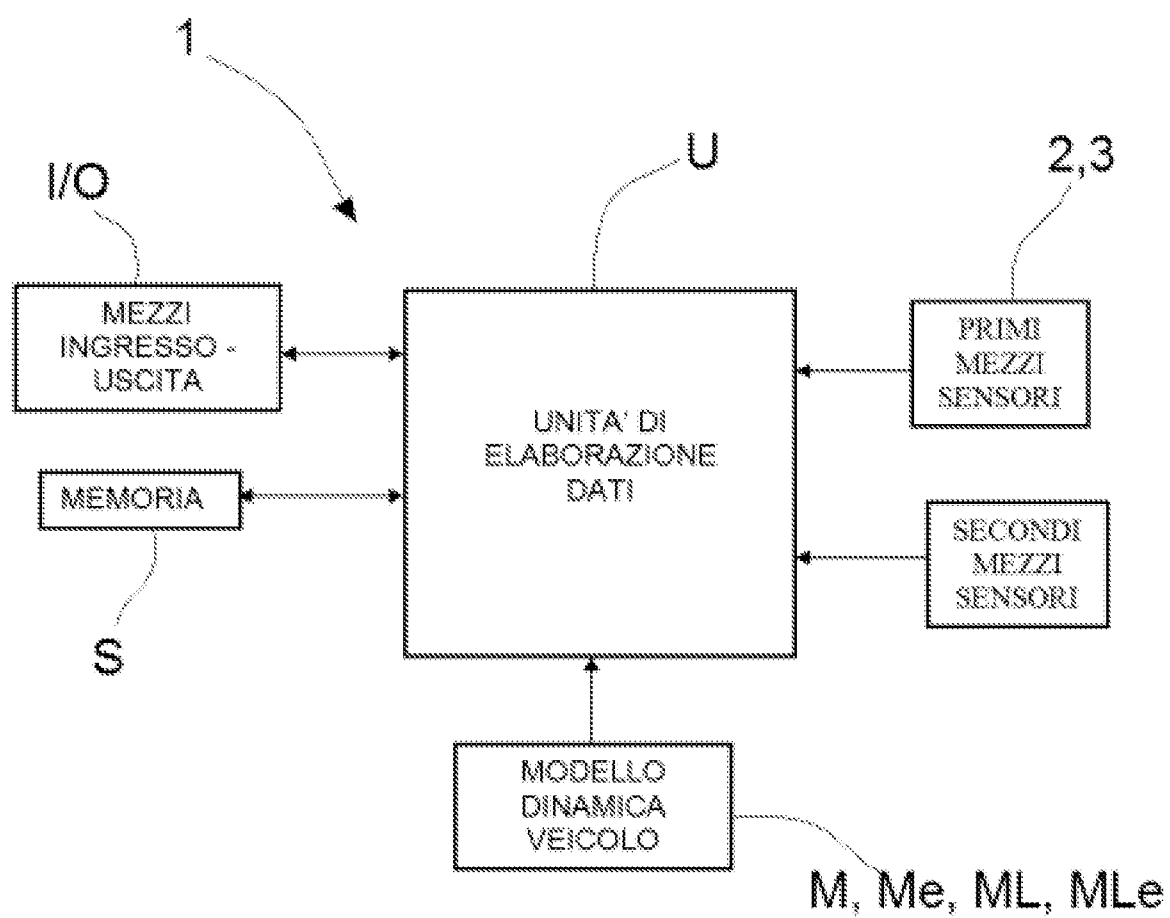


Fig. 9