HAL
open science

Commande couplée longitudinale/latérale de véhicules par platitude et estimation algébrique

Lghani Menhour, Brigitte d'Andréa-Novel, Michel Fliess, Hugues Mounier

To cite this version:

Lghani Menhour, Brigitte d'Andréa-Novel, Michel Fliess, Hugues Mounier. Commande couplée longitudinale/latérale de véhicules par platitude et estimation algébrique. 7e Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Jul 2012, Grenoble, France. pp.CDROM. hal-00686653

HAL Id: hal-00686653

https://polytechnique.hal.science/hal-00686653v1

Submitted on 10 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Commande couplée longitudinale/latérale de véhicules par platitude et estimation algébrique ⋆

Lghani Menhour * **Brigitte d'Andréa-Novel** ** **Michel Fliess** ***,**** **Hugues Mounier** †

* *Centre de Recherche STIC, IUT de Troyes, 9 rue du Québec, 10000 Troyes, France (e-mail : lghani.menhour@univ-reims.fr).*
** *Mines-ParisTech, CAOR-Centre de Robotique, Mathématiques et systèmes, 60 boulevard Saint-Michel, 75272 Paris cedex 06, France (e-mail : brigitte.dandrea-novel@mines-paristech.fr).*
*** *LIX (UMR CNRS 7161), École polytechnique, 91128 Palaiseau, France (e-mail : Michel.Fliess@polytechnique.edu).*
**** *AL.I.E.N., 24-30 rue Lionnois, BP 60120, 54003 Nancy, France www.alien-sas.com*
† *L2S (UMR 8506), CNRS – Supélec – Université Paris-Sud, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette, France (e-mail : hugues.mounier@lss.supelec.fr).*

Résumé. On présente une commande non linéaire couplée des modes longitudinal et latéral d'un véhicule et un estimateur du dévers de la route. Platitude différentielle des systèmes non linéaires et techniques algébriques d'estimation en sont les ingrédients théoriques principaux.

Abstract. This paper deals with a coupled longitudinal/lateral vehicle nonlinear control and road bank angle estimation. The control law is designed using the differential flatness property of nonlinear longitudinal and lateral vehicle model. An algebraic estimation approach is employed to estimate simultaneously the vehicle dynamic parameters (like lateral forces and roll angle) and unknown inputs (like road bank angle and corrective yaw moment). The control and estimation approaches use also the algebraic estimators to perform the filtering and the numerical derivatives of noisy measurements. To perform some coupled vehicle tasks like an automatic line keeping of straight or curved lines, a line change maneuver, obstacle avoidance, a combined control of longitudinal and lateral vehicle motions is required. Note that this controller is designed via steering angle and traction/braking torque of vehicle. Furthermore, some other parameters like road bank angle has an important influence on vehicle lateral dynamics behavior and control vehicle systems. For this, the algebraic based unknown input estimator is considered here to estimate road bank angle and consider a more realistic trajectories. Interesting results are obtained using real data which are acquired under high lateral accelerations.

Keywords: Flatness-based nonlinear control, algebraic nonlinear estimation, automotive coupled control, experimental validation.

1. INTRODUCTION

Les systèmes d'aide à la conduite jouent un rôle crucial dans l'amélioration et l'augmentation de la sécurité des usagers. Plusieurs versions de ces systèmes existent déjà sur le marché, tels que les systèmes de sécurité active comme l'ABS, l'ESP, l'ACC et les systèmes de sécurité passive comme les ADAS. Ces systèmes peuvent être améliorés par une meilleure connaissance des attributs de la route tels que pente, courbure, uni et dévers.

Le développement des systèmes intelligents nécessite un contrôle performant et couplé des mouvements longitudinal et latéral du véhicule. Cependant, la plupart des stratégies de contrôle proposées dans la littérature traitent indépendamment du contrôle longitudinal ou du contrôle latéral (voir par exemple Plochl et al. (2007)). Des contrôleurs utilisant l'angle de braquage sont développés pour le changement automatique de voies sur autoroutes ou pour la conduite automatisée dans les zones urbaines (voir Ackermann et al. (1995); Cerone et al. (2009); Guldner et al. (1999); Marino et al. (2009)). D'autres stratégies dédiées au contrôle longitudinal du véhicule sont également proposées, par exemple (Martinez et al. (2007); Nouvelière (2002); Villagra et al. (2009)). Ces lois de commande sont utilisées pour réaliser des tâches de type stop-and-go, évitement de collision, maintien et gestion des

⋆ Travail soutenu par le projet INOVE/ANR 2010 BLANC 308.

inter-distances. D'autres lois de commande qui couplent le contrôle en freinage et en suspension sont également présentées dans la littérature, par exemple Poussot-Vassal et al. (2011). Il est à noter que ces approches considèrent la vitesse longitudinale comme un paramètre qui intervient dans le mouvement de lacet, mais non comme un état du système à commander. Des lois de contrôle global châssis sont proposées par d'Andréa-Novel et al. (2001); Chou et al. (2005), ces lois utilisent le couple de freinage et les efforts de suspension mais pas l'angle de braquage.

Cependant, les systèmes intelligents nécessitent aussi une bonne connaissance des attributs de la route. En effet, la géométrie de la route joue un rôle important sur la dynamique latérale du véhicule, par exemple la vitesse maximale du véhicule dans un virage est contrainte par la valeur de l'angle de dévers. L'estimation de l'angle de dévers a été traitée par plusieurs auteurs parmi lesquels nous pouvons citer Imsland et al. (2007); Sebsadji et al. (2008). Dans certains de ces travaux, l'estimation de l'angle de dévers utilise la mesure de l'angle de roulis. Cependant, la mesure de l'angle de roulis n'est pas toujours facile. Pour cette raison, dans notre étude nous proposons une estimation simultanée de l'angle de roulis du véhicule, de l'angle de dévers de la route et du moment de lacet correctif. De plus, l'angle de roulis peut être utilisé pour l'étude de stabilité, de retournement et du rapport de transfert de charges du véhicule.

On présente deux nouveaux développements : le premier concerne la commande non linéaire couplée des mouvements longitudinal et latéral, le second l'estimation à la fois de l'angle de roulis, qui est un état interne du véhicule, de l'angle de dévers de la route et du moment de lacet correctif, qui agissent sur le véhicule comme des entrées inconnues. Ces développements utilisent à la fois la propriété de platitude différentielle des systèmes non linéaires (Fliess et al. (1995, 1999); Lévine (2009); Sira-Ramírez et al. (2004)), voir Fuchshumer et al. (2005) pour une approche similaire, et l'estimation basée sur l'approche algébrique (Barbot et al. (2007); Daafouz et al. (2006)). Les estimateurs algébriques sont également utilisés pour le filtrage et le calcul des dérivées numériques des mesures fortement bruitées (Fliess et al. (2008); Mboup et al. (2009)). En effet, les capteurs embarqués utilisés dans les applications de contrôle dans l'automobile sont de bas coût. Par conséquent, ils fournissent des mesures de mauvaise qualité et bruitées. Pour cette raison, l'utilisation d'estimateurs algébriques non linéaires est une solution très efficace pour le traitement de ces mesures et le calcul de dérivées.

Le § 2 est consacrée à la présentation des estimateurs algébriques non linéaires utilisés pour le filtrage et la dérivation des mesures bruitées. La méthodologie d'estimation des forces latérales, de l'angle de roulis du véhicule, de l'angle de dévers de la route, du moment de lacet correctif du véhicule ainsi que les modèles du véhicule utilisés sont présentés au § 3. Le § 4 détaille le modèle non linéaire du véhicule et la propriété de platitude. Une validation expérimentale de l'estimation des états du véhicule et des entrées inconnues ainsi que des résultats sur la commande non linéaire couplée sont présentés au § 5. Conclusions et perspectives sont développées au § 6.

2. ESTIMATEURS ALGÉBRIQUES NON LINÉAIRES

Pour les systèmes de contrôle, l'obtention des signaux de référence ainsi que de leurs dérivées est une étape très importante. Afin de traiter les problèmes liés aux bruits de mesure, on se propose d'utiliser la dérivation numérique basée sur les estimateurs non linéaires algébriques [1].

Cette technique d'estimation peut être mise en œuvre en utilisant les récents résultats présentés dans Fliess et al. (2008), Mboup et al. (2009), qui sont également efficaces pour des applications temps réel. Les expressions suivantes de deux estimateurs (voir aussi García Collado et al. (2009)) peuvent être utilisées :

– Dérivation numérique de la mesure bruitée $y(t)$:

$$\dot{\hat{y}}(t) = -\frac{3!}{T^3} \int_{t-T}^{t} (2T(t-\tau) - T) y(\tau) d\tau \tag{1}$$

– Filtrage de la mesure bruitée $y(t)$:

$$\hat{y}(t) = \frac{2!}{T^2} \int_{t-T}^{t} (3(t-\tau) - T) y(\tau) d\tau \tag{2}$$

À noter que la fenêtre temporelle glissante $[t-T,\, t]$ peut être assez courte. Ces méthodes d'estimation ne sont pas du type asymptotique et ne requièrent pas de connaissances statistiques sur les bruits affectant les signaux [2].

3. ESTIMATION NON LINÉAIRE DES ÉTATS DU VÉHICULE ET DES ENTRÉES INCONNUES

L'estimation des états du véhicule ainsi que des entrées inconnues utilise l'approche algébro-différentielle des systèmes non linéaires à entrées inconnues (Barbot et al. (2007), Daafouz et al. (2006)). Cette estimation utilise également les estimateurs algébriques non linéaires présentés au § 2. L'estimation est basée sur la propriété suivante :

Propriété 1. Un système entrée-sortie est observable avec des entrées inconnues si, et seulement si, sa dynamique de zéro est triviale. En d'autres termes, l'observabilité d'un système non linéaire avec entrées inconnues est équivalente à la propriété de pouvoir exprimer tous les états de la dynamique du système ainsi que ses entrées inconnues comme une combinaison des commandes, des sorties mesurées et de leurs dérivées jusqu'à un ordre fini.

3.1 Modèle du véhicule non linéaire

Pour la synthèse de l'observateur des états du véhicule et des entrées inconnues, nous allons utiliser un modèle du véhicule non linéaire à deux roues. Ce modèle est composé de trois degrés de liberté que sont les vitesses latérale V_y,

[1] Ces estimateurs ont été utilisés avec succès dans des développements précédents sur les systèmes de transport intelligents : Abouaïssa et al. (2011), Villagra et al. (2009), Villagra et al. (2011a,b).

[2] Consulter Fliess (2006) pour plus de détails.

de lacet $\dot{\psi}$ et de roulis $\dot{\phi}_v$. Les équations suivantes illustrent les différentes dynamiques de ce modèle :

$$\begin{aligned} & mV_x(\dot{\beta}+\dot{\psi}) + m_s h\ddot{\phi}_v = \sum_{i=1}^{2} F_{yi} - mg\phi_r \\ & I_z\ddot{\psi} - I_{xz}\ddot{\phi}_v = \sum_{i=1}^{2} M_{zi} + m_{zc} \\ & I_x\ddot{\phi}_v + m_s h V_x(\dot{\beta}+\dot{\psi}) - I_{xz}\ddot{\psi} - m_s gh\phi_v = \sum M_x \end{aligned} \tag{3}$$

avec :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{2} F_{yi} = F_{yf} + F_{yr},\ F_{bank} = mg\sin(\phi_r) \approx mg\phi_r \\ \sum_{i=1}^{2} M_{zi} = L_f F_{yf} - L_r F_{yr} \\ \sum M_x = [m_s gh - (K_{\phi f} + K_{\phi r})]\phi_v - (C_{\phi f} + C_{\phi r})\dot{\phi}_v \end{cases}$$

Notations : F_{yf} et F_{yr} forces latérales $[N]$. V_x vitesse longitudinale $[m/s]$. ϕ_v angle de roulis $[deg]$. m masse du véhicule $[kg]$. m_s masse suspendue du véhicule $[kg]$. I_x moment d'inertie du véhicule selon l'axe x $[kgm^2]$. I_z moment d'inertie du véhicule selon l'axe z $[kgm^2]$. L_f et L_r distance entre le CdG et les essieux avant et arrière du véhicule $[m]$. M_z moment de lacet $[Nm]$. h distance entre le CdG et le centre du roulis $[m]$. $C_{\phi f}$ et $C_{\phi r}$ coefficients d'amortissement de roulis avant et arrière $[Nm/rads]$. $K_{\phi f}$ et $K_{\phi r}$ raideurs de roulis avant et arrière $[Nm/rads]$. m_{zc} moment de lacet correctif $[Nm]$.

Les sorties plates choisies pour la mise en œuvre de l'estimation sont l'angle de dérive β, la vitesse de lacet $\dot{\psi}$ et la vitesse de roulis $\dot{\phi}$. L'angle de dérive peut être estimé par l'estimation des vitesses absolues V_x et V_y du CdG (voir Villagra et al. (2009)). $\dot{\psi}$ et $\dot{\phi}$ sont accessibles via les mesures gyrométriques.

$$z = [\, z_1,\, z_2,\, z_3 \,]^T = [\, \beta,\, \dot{\psi},\, \dot{\phi} \,]^T \tag{4}$$

Avec ces sorties, les degrés relatifs des l'entrées inconnues ϕ_r et m_{zc} sont égaux à 1. Pour le modèle (3), la vitesse longitudinale est considérée constante.

3.2 Estimation des forces latérales

Dans notre approche nous supposons que les forces latérales sont réparties sur deux essieux, une force sur l'essieu avant et l'autre sur l'essieu arrière. Pour estimer les forces latérales, nous considérons le modèle à deux roues suivant, modélisant les mouvements transversal et de lacet du véhicule :

$$\begin{cases} mV_x\dot{\beta} = F_{yf} + F_{yr} - mV_x\dot{\psi} \\ I_z\ddot{\psi} = L_f F_{yf} - L_r F_{yr} \end{cases} \tag{5}$$

Pour mettre en œuvre l'estimateur des forces latérales F_{yf} et F_{yr}, nous considérons les sorties plates z_1 et z_2 de l'équation (4). L'estimateur algébrique des forces latérales est basé sur le principe d'observabilité de la propriété 1. Cet estimateur est obtenu après quelques manipulations algébriques et en utilisant le modèle (5) et les sorties plates z_1 et z_2 de l'équation (4) :

$$\begin{cases} \hat{F}_{yf}(z_1,\, z_2,\, \hat{\dot{z}}_2) = \dfrac{L_f mV_x(\hat{\dot{z}}_1 + z_2) - I_z\hat{\dot{z}}_2}{L_f + L_r} \\ \hat{F}_{yr}(z_1,\, z_2,\, \hat{\dot{z}}_2) = \dfrac{L_r mV_x(\hat{\dot{z}}_1 + z_2) - I_z\hat{\dot{z}}_2}{L_f + L_r} \end{cases} \tag{6}$$

3.3 Estimation de l'angle de roulis, de l'angle de dévers de la route et du moment de lacet correctif du véhicule

L'estimateur suivant des états du véhicule et des entrées inconnues est obtenu en utilisant le principe de l'observabilité de la propriété 1, les sorties plates (4) et le modèle non linéaire (3) :

$$\begin{cases} \hat{\phi}_v = \dfrac{\begin{bmatrix} I_x\hat{\dot{z}}_3 + m_s hV_x(\hat{\dot{z}}_1 + z_2) \\ -I_{xz}\hat{\dot{z}}_2 + (C_{\phi f} + C_{\phi r})z_3 \end{bmatrix}}{m_s gh - (K_{\phi f} + K_{\phi r})} \\ \hat{\phi}_r = \dfrac{1}{mg}\begin{bmatrix} \hat{F}_{yf}(z_1,\, z_2,\, \hat{\dot{z}}_2) + \hat{F}_{yr}(z_1,\, z_2,\, \hat{\dot{z}}_2) \\ -mV_x(\hat{\dot{z}}_1 + z_2) - m_s h\hat{\dot{z}}_3 \end{bmatrix} \\ \hat{m}_{zc} = \begin{bmatrix} -\hat{F}_{yf}(z_1,\, z_2,\, \hat{\dot{z}}_2) + \hat{F}_{yr}(z_1,\, z_2,\, \hat{\dot{z}}_2) \\ I_z\hat{\dot{z}}_2 - I_{xz}\hat{\dot{z}}_3 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{7}$$

Les dérivées des sorties sont calculées avec les estimateurs algébriques du § 2 comme suit :

$$\hat{\dot{z}} = \begin{bmatrix} \hat{\dot{z}}_1 \\ \hat{\dot{z}}_2 \\ \hat{\dot{z}}_3 \end{bmatrix} = -\frac{3!}{T^3}\int_{t-T}^{t} (2T(t-\tau) - T)\begin{bmatrix} \beta(\tau) \\ \dot{\psi}(\tau) \\ \dot{\phi}(\tau) \end{bmatrix} d\tau$$

4. COMMANDE NON LINÉAIRE COUPLÉE

Pour la mise en œuvre de la commande non linéaire couplée, nous considérons le modèle non linéaire à trois degrés de liberté du véhicule décrivant la dynamique longitudinale, latérale et de lacet :

$$\begin{cases} m(\dot{V}_x - \dot{\psi}V_y) = F_{xf} - F_{yf}\delta + F_{xr} \\ m(\dot{V}_y + \dot{\psi}V_x) = F_{xf}\delta + F_{yf} + F_{yr} - mg\sin(\phi_r) \\ I_z\ddot{\psi} = L_f(F_{yf} + F_{xf}\delta) - L_r F_{yr} + m_{zc} \end{cases} \tag{8}$$

Pour ce modèle, les forces longitudinales sont calculées en utilisant les modèles dynamiques des roues suivants :

$$\begin{cases} F_{xf} = (1/R)(-I_r\dot{\omega}_f + T_m - T_{bf}) \\ F_{xr} = -(1/R)(T_{br} + I_r\dot{\omega}_r) \end{cases} \tag{9}$$

Les vitesses de rotation des roues ω_f et ω_r sont supposées mesurées par l'odométrie et sont considérées comme des entrées extérieures. Nous supposons que le couple freinage arrière T_{br} est égal à celui de l'avant T_{bf}. Les forces latérales sont modélisées par une relation de proportionnalité à l'angle de dérive latéral $(\alpha_f,\, \alpha_r)$ pour chaque essieu, $(C_f,\, C_r)$ désignant les coefficients de rigidité de dérive avant et arrière :

$$F_{yf} = C_f\left(\delta - \frac{V_y + \dot{\psi}L_f}{V_x}\right),\ F_{yr} = -C_r\left(\frac{V_y - \dot{\psi}L_r}{V_x}\right) \tag{10}$$

La vitesse longitudinale est considérée différente de zéro $(V_x > \epsilon)$. En remplaçant (9) et (10) dans (8) nous obtenons la représentation non linéaire :

$$\dot{x} = f(x,t) + g(x,t)u + g_1u_1u_2 + g_2u_2^2 \tag{11}$$

avec

$$f(x,t) = \begin{bmatrix} \dot{\psi}V_y - \dfrac{I_r}{mR}(\dot{\omega}_r + \dot{\omega}_f) \\ -\dot{\psi}V_x + \dfrac{1}{m}\left(\dfrac{-C_f\left(V_y + L_f\dot{\psi}\right) - C_r\left(V_y - L_r\dot{\psi}\right)}{V_x}\right) - g\phi_r \\ \dfrac{\left(-L_fC_f\left(V_y + L_f\dot{\psi}\right) + L_rC_r\left(V_y - L_r\dot{\psi}\right)\right)}{V_xI_z} + \dfrac{m_{zc}}{I_z} \end{bmatrix},$$

$$g(x,t) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{mR} & \dfrac{C_f}{m}\left(\dfrac{V_y + L_f\dot{\psi}}{V_x}\right) \\ 0 & (C_fR - I_r\dot{\omega}_f)/mR \\ 0 & (L_fC_fR - L_fI_r\dot{\omega}_f)/I_zR \end{bmatrix}, g_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{mR} \\ \dfrac{L_f}{I_zR} \end{bmatrix},$$

$$g_2 = \begin{bmatrix} \dfrac{-C_f}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \quad x = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}^T, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 = T_\omega \\ u_2 = \delta \end{bmatrix}^T$$

À noter que les mouvements longitudinal et latéral sont contrôlés respectivement par le couple de traction/freinage $T_\omega = T_m - T_b$ ($T_b = T_{bf} + T_{br}$), δ angle de braquage, R rayon de la roue et I_r moment d'inertie de la roue. L'angle de devers ϕ_r et le moment de lacet correctif m_{zc} de (11) sont reconstruits par l'estimateur algébrique (7).

4.1 Contrôle longitudinal et latéral par platitude

Dans le but de réduire la complexité du modèle non linéaire (11), les termes u_1u_2 et u_2^2 sont négligés [3]. L'équation (11) devient :

$$\dot{x} = f(x,t) + g(x,t)u \tag{12}$$

Propriété de platitude Considérons le système suivant :

$$\dot{x} = f(x,u) \tag{13}$$

avec $x = (x, \cdots, x_n) \in \Re^n$ et $u = (u, \cdots, u_m) \in \Re^m$. Il est dit *différentiellement plat* (voir Fliess et al. (1995, 1999); Sira-Ramírez et al. (2004); Lévine (2009)) si et seulement si

- il existe un vecteur de fonction h tel que

$$y = h(x, u, \dot{u}, \cdots, u^{(r)}) \tag{14}$$

  avec $y = (y, \cdots, y_m) \in \Re^m$, $r \in N$;
- les composantes de $x = (x, \cdots, x_n)$ et $u = (u, \cdots, u_m)$ peuvent être exprimées comme

$$x = A(y, \dot{y}, \cdots, y^{(r_x)}), \quad r_x \in N \tag{15}$$

$$u = B(y, \dot{y}, \cdots, y^{(r_u)}), \quad r_u \in N \tag{16}$$

À noter que le vecteur y de l'équation (14) est appelé vecteur des *sorties plates.*

Preuve de platitude Nous montrons que les sorties y_1 et y_2 données par :

$$\begin{cases} y_1 = V_x \\ y_2 = L_fmV_y - I_z\dot{\psi} \end{cases} \tag{17}$$

forment des sorties plates. Après certaines manipulations algébriques nous obtenons les résultats suivants :

[3] Les résultats du § 5 justifient entièrement cette simplification.

$$x = \begin{bmatrix} V_x & V_y & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T = A(y_1, y_2, \dot{y}_2) = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dfrac{1}{L_fm}\left(y_2 - \dfrac{I_zL_fmy_1\dot{y}_2 + I_zC_r(L_f + L_r)y_2}{C_r(L_f + L_r)(I_z - L_rL_fm) + (L_fmy_1)^2}\right) \\ -\left(\dfrac{L_fmy_1\dot{y}_2 + C_r(L_f + L_r)y_2}{C_r(L_f + L_r)(I_z - L_rL_fm) + (L_fmy_1)^2}\right) \end{bmatrix} \tag{18}$$

et

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} &= \Delta(y_1, y_2, \dot{y}_2)\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \Phi(y_1, y_2, \dot{y}_2) \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= \Delta^{-1}(y_1, y_2, \dot{y}_2)\left(\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} - \Phi(y_1, y_2, \dot{y}_2)\right) \end{aligned} \tag{19}$$

Les termes Δ_{11}, Δ_{12}, Δ_{21} et Δ_{22} de la matrice Δ sont présentés d'une façon détaillée par Menhour et al. (2011).

La propriété de platitude est vérifiée si la matrice $\Delta(y_1, y_2, \dot{y}_2)$ est inversible. On obtient le déterminant suivant :

$$\det(\Delta(y_1, y_2, \dot{y}_2)) = \Delta_{11}\Delta_{22} - \Delta_{21}\Delta_{12} = \frac{\left(I_\omega\dot{\omega}_f - C_fR\right)\left(L_f^2y_1^2m^2 - Cr(L_f + L_r)L_rL_fm + C_rI_zL\right)}{I_zR^2y_1m^2} \neq 0\,.$$

Ce déterminant, qui dépend uniquement de la vitesse longitudinale $y_1 = V_x$, est en effet non nul :

- L'accélération de rotation de la roue est inférieure à RC_f/I_ω : RC_f/I_ω qui est de l'ordre de 10^4, donc $I_\omega\dot{\omega}_f - C_fR \neq 0$.
- Comme $I_z > L_fm$, $C_r(L_r + L_f)(I_z - L_fm) + L_f^2m^2y_1^2 \neq 0$.

donc

$$\begin{aligned} u = \begin{bmatrix} T_\omega \\ \delta \end{bmatrix} &= B(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2) = \\ &\Delta^{-1}(y_1, y_2, \dot{y}_2)\left(\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} - \Phi(y_1, y_2, \dot{y}_2)\right) \end{aligned} \tag{20}$$

avec $r_x = 1$ et $r_u = 2$.

4.2 Retour de sortie pour le suivi des sorties de références

Pour assurer un bon suivi des sorties désirées y_1^{ref} et y_2^{ref}, nous mettons en œuvre les contrôles suivants :

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1^{ref} + K_1^1e_{y_1} + K_1^2\displaystyle\int e_{y_1}dt \\ \ddot{y}_2^{ref} + K_2^1\dot{e}_{y_2} + K_2^2e_{y_2} + K_2^3\displaystyle\int e_{y_2}dt \end{bmatrix} \tag{21}$$

avec, $e_{y_1} = y_1^{ref} - y_1 = V_x^{ref} - V_x$ et $e_{y_2} = y_2^{ref} - y_2$. Le choix des gains garantissant la stabilité K_1^1, K_1^2, K_2^1, K_2^2 et K_2^3 est alors immédiat.

5. VALIDATION AVEC DONNÉES EXPÉRIMENTALES

La validation expérimentale des estimateurs par l'approche algébrique est faite avec plusieurs jeux de mesures acquises par un véhicule expérimental sous de fortes sollicitations dynamiques (par exemple des accélérations latérales qui

atteignent $5\,m/s^2$). Durant ces tests, plusieurs variables dynamiques sont mesurées comme : les vitesses longitudinale et latérale, les accélérations longitudinale et latérale, la vitesse de lacet, l'angle de braquage, toutes les forces et les moments (selon les axes latéral, longitudinal et vertical). Pour ces mesures le système d'acquisition opère à une fréquence de $200\,Hz$. Parmi les mesures utilisées pour valider les estimateurs on peut citer :

– les angles de dérive au centre de gravité et de braquage,
– les vitesses longitudinale, de lacet et de roulis.

Les résultats de validation de l'estimateur des forces latérales avant et arrière sont représentés sur la figure 1. Les estimations sont en très bonne adéquation avec les mesures des roues dynamométriques.

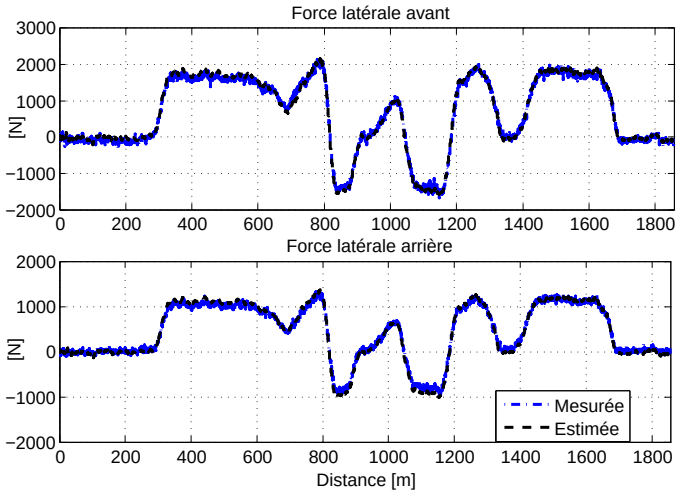

FIG. 1. Forces latérales mesurées et estimées

Les figures 1, 2 et 3 montrent la validation expérimentale des estimateurs des états du véhicule (forces latérales et angle de roulis) et des entrées inconnues (angle de dévers de la route et moment de lacet correctif du véhicule). Ces résultats illustrent également les performances de l'estimateur algébrique à entrées inconnues. À noter que les forces latérales estimées sont utilisées comme des entrées de l'estimateur (7).

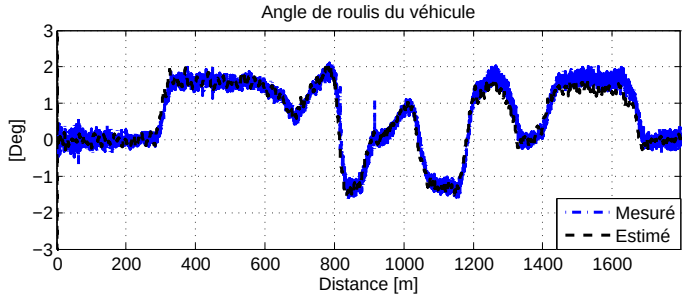

FIG. 2. Angle de roulis du véhicule mesuré et son estimé

Afin d'illustrer les performances des estimateurs algébriques, une comparaison entre les résultats d'estimation et les mesures est réalisée en utilisant l'erreur d'estimation normalisée moyenne e_z, laquelle, pour une variable z est donnée par l'équation suivante :

$$e_z(i) = 100\,|z(i) - z_{mes}(i)|/\max|z_{mes}| \qquad (22)$$

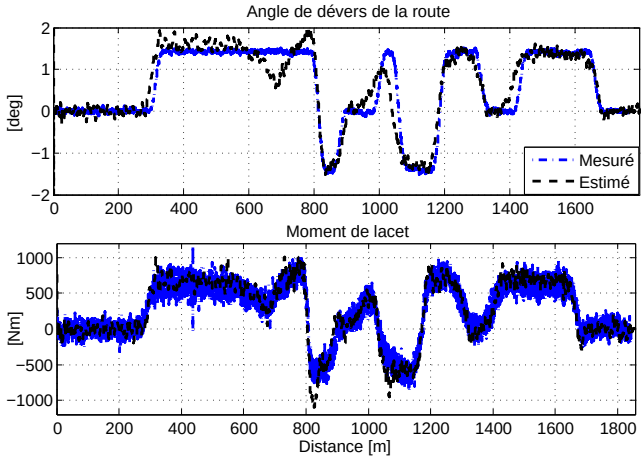

FIG. 3. Entrées inconnues mesurées et estimées

Cette quantité est calculée pour chaque échantillon. Les estimateurs produisent un comportement satisfaisant proche de celui observé lors des essais réalisés sur pistes. Par ailleurs, les valeurs maximales des erreurs normalisées sont de moins de 3.5 % pour les forces latérales, moins de 6.5 % pour les angles de roulis et de dévers et moins de 9.6 % pour le moment de lacet correctif. Ces résultats confirment que les estimateurs algébriques peuvent être utilisés avec succès pour la conception des capteurs virtuels.

Les résultats de cette approche, où les données expérimentales sont considérées comme trajectoires de référence, sont illustrés par la figure 4. Cette figure montre une comparaison entre le couple de freinage/traction et l'angle de braquage calculés par le contrôleur et ceux mesurés sur le véhicule expérimental. Notons que ces résultats sont obtenus en considérant le dévers de la route $\hat{\phi}_r$ et le moment de lacet correctif $\hat{m}_{zc}$ estimés par l'approche algébrique.

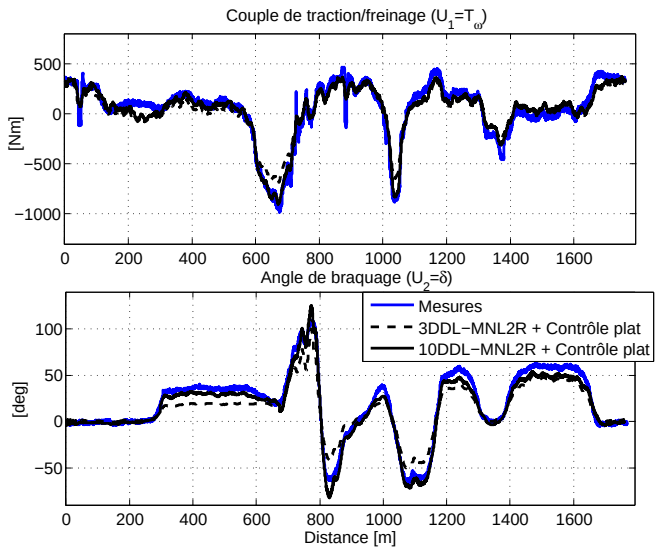

FIG. 4. Contrôle longitudinal et latéral par platitude différentielle couplé à l'estimateur du dévers de la route et du moment de lacet correctif du véhicule

6. CONCLUSION

La validation expérimentale démontre l'aptitude des estimateurs algébriques à reconstruire avec précision, à la fois les états dynamiques du véhicule (comme les forces latérales et l'angle de roulis) et les entrées inconnues agissant sur le véhicule (comme le dévers de la route et le moment de lacet correctif du véhicule). Ces estimateurs permettront la mise en œuvre des capteurs virtuels qui remplaceront avantageusement ceux, coûteux, tels les roues dynamométriques, mais aussi la prise en compte la géométrie de la route.

Les estimateurs sont utilisés dans l'expression de la commande non linéaire qui combine le contrôle des modes longitudinal et latéral du véhicule (Menhour et al. (2011)). Les tests fournissent des résultats prometteurs sur l'approche conjointe de l'estimation algébrique et de la commande par platitude.

RÉFÉRENCES

M. Plochl, J. Edelmann. Driver models in automobile dynamics application. *Vehicle Syst. Dynamics*, vol. 45, pp. 699-741, 2007.

J. Ackermann, J. Guldner, W. Sienel, R. Steinhauser, V. I. Utkin. Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering. *IEEE Trans. Control Syst. Techno.*, vol. 3, pp. 112-143, 1995.

V. Cerone, M. Milanese, D. Regruto. Combined automatic lane-keeping and driver's steering through a 2-DOF control strategy. *IEEE Trans. Control Syst. Techno.*, vol. 17, pp. 135-142, 2009.

J. Guldner, W. Sienel, H.-S. Tan, J. Ackermann, S. Patwardhan, T. Bunte. Robust automatic steering control for look-down reference systems with front and rear sensors. *IEEE Trans. Control Syst. Techno.*, vol. 7, pp. 2-11, 1999.

R. Marino, F. Cinili, Input-output decoupling control by measurement feedback in four wheel-steering-vehicles. *IEEE Trans. Control Syst. Techno.*, vol. 17, pp. 1163-1172, 2009.

J. Martinez, C. Canudas-de-Wit. A safe longitudinal control for adaptive cruise control and stop-and-go scenarios. *IEEE Trans. Control Syst. Techno.*, vol. 15, pp. 246-258, 2007.

L. Nouvelière. *Commandes robustes appliquées au contrôle assisté d'un véhicule à basse vitesse.* Thèse, Univ. Versailles–Saint-Quentin, 2002.

J. Villagra, B. d'Andréa-Novel, S. Choi, M. Fliess, H. Mounier. Robust stop-and-go control strategy : an algebraic approach for non-linear estimation and control *Int. J. Vehicle Auton. Syst.*, vol. 7, pp.270-291, 2009. (http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00419445/en/)

C. Poussot-Vassal, O. Sename, L. Dugard, P. Gaspar, S. Savaresic. Vehicle dynamic stability improvements through gain-scheduled steering and braking control. *Vehicle System Dynamics*, vol. 49, pp. 1597-1621, 2011.

B. d'Andréa-Novel, M. Ellouze. Tracking with stability for a vehicle braking in a corner. *40th IEEE Conf. Decision Control*, Orlando, 2001.

H. Chou, B. d'Andréa-Novel. Global vehicle control using differential braking torques and active suspension forces. *Vehicle Syst. Dynamics*, vol. 43, pp. 261-284, 2005.

L. Imsland, H. F. Grip, T. A. Johansen, T. I. Fossen, J. C. Kalkkuhl and A. Suissa. On non-linear unknown input observers : applied to lateral vehicle velocity estimation on banked roads. *Int. J. Control*, vol. 80, pp. 1741-1750, 2007.

Y. Sebsadji, S. Glaser, S. Mammar and M. Netto. Vehicle Roll and Road Bank Angles Estimation. *17th IFAC World Congress*, Seoul, 2008.

M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon. Flatness and defect of nonlinear systems : introductory theory and examples *Int. J. Control*, vol. 61, pp. 1327-1361, 1995.

M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon. A Lie-Bäcklund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 44, 1999, pp. 922-937.

S. Fuchshumer, K. Schlacher, T. Rittenschober. Nonlinear vehicle dynamics control - A flatness based approach. *44th IEEE Conf. Decision Control & Europ. Control Conf.*, Seville, 2005.

J. P. Barbot, M. Fliess, T. Floquet. An algebraic framework for the design of nonlinear observers with unknown inputs. *46th IEEE Conf. Decision Control*, New Orleans, 2007. (http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00172366/en/)

J. Daafouz, M. Fliess, G. Millérioux. Une approche intrinsèque des observateurs linéaires à entrées inconnues. *Conf. int. francoph. automatique*, Bordeaux, 2006. (http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00001150/en/)

M. Fliess, C. Join, H. Sira-Ramírez. Non-linear estimation is easy. *Int. J. Model. Identif. Control*, vol. 4, pp. 12-27, 2008. (http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00158855/en/)

M. Mboup, C. Join, M. Fliess. Numerical differentiation with annihilators in noisy environment. *Numer. Algor.*, vol. 50, pp. 439-467, 2009.

H. Abouaïssa, M. Fliess, V. Iordanova, C. Join. Vers une caractérisation non linéaire d'un réseau autoroutier. *3es J. Identif. Modélisation Expérimentale*, Douai, 2011. (http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00572818/en/)

J. Villagra, B. d'Andréa-Novel, M. Fliess, H. Mounier. A diagnosis-based approach for tire-road forces and maximum friction estimation. *Control Engin. Practice*, vol. 19, pp. 174-184, 2011a.

J. Villagra, B. d'Andréa-Novel, M. Fliess, H. Mounier, L. Menhour. Corrigendum to "A diagnosis-based approach for tire-road forces and maximum friction estimation". *Control Engin. Practice*, vol. 19, p. 1252, 2011b.

F.A. García Collado, B. d'Andréa-Novel, M. Fliess, H. Mounier. Analyse fréquentielle des dérivateurs algébriques. *XXIIe Coll. GRETSI*, Dijon, 2009. (http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00394972/en/)

M. Fliess. Analyse non standard du bruit *C.R. Acad. Sci. Paris*, vol. I-342, pp. 797-802, 2006.

J. Lévine. *Analysis and Control of Nonlinear Systems – A Flatness-based Approach.* Springer, 2009.

H. Sira-Ramírez, S. Agrawal. *Differentially Flat Systems.* Marcel Dekker, 2004.

L. Menhour, B. d'Andréa-Novel, C. Boussard, M. Fliess, H. Mounier. Algebraic nonlinear estimation and flatness-based lateral/longitudinal control for automotive vehicles. *14th Int. IEEE Conf. ITS*, Washington, 2011. (http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00611950/en/)