

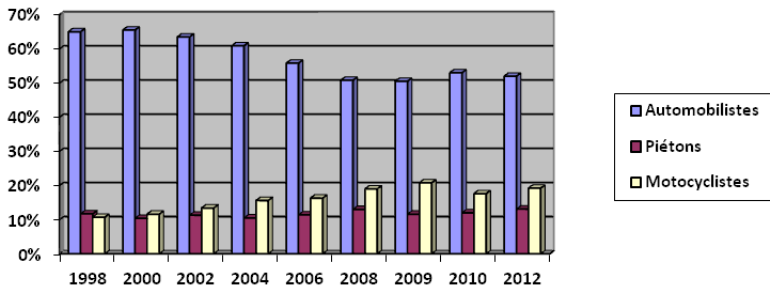
Observation non linéaire de la dynamique latérale du véhicule et Détection de situations critiques

Z. Yacine, D. Ichalal , N. Ait-Oufroukh, S. Mammar

Université d'Evry Val d'Esonne
Laboratoire IBISC



Groupe de Travail : Sûreté, Surveillance, Supervision, ENSAM
Paris, 25 Juin 2014



- ▶ Statistiques de l'accidentologie routière
- ▶ Les sorties de voie, perte d'adhérence,...
- ▶ Pertes d'attention des conducteurs

Solutions proposées

- ▶ **Systèmes d'alerte et assistance active ou passive**
 - ▶ Quantifier le risque, alerter et agir, éviter les obstacles, éviter les sorties de voie, ...
 - ▶ Systèmes basés sur la **détection** de situations limites ou critiques

Travaux existants

- ▶ Systèmes établis sur des modèles linéaires obtenus à partir d'hypothèses simplificatrices
 - ▶ Efforts latéraux linéaires
 - ▶ Vitesse longitudinale constante, . . .
- ▶ **Mais**, le véhicule en situation limite est décrit par un modèle **non linéaire** traduisant la saturation des efforts

L'élaboration des systèmes d'aide à la conduite nécessite la disponibilité de certaines mesures

- ▶ **Mesures difficilement obtenues** pour des raisons techniques ou économiques
 - ▶ L'angle de dérive et la vitesse latérale
 - ▶ Les efforts de contact roue-sol, les efforts verticaux
 - ▶ Les attributs de la route : dévers, pente, coefficient d'adhérence, courbure, . . .

L'alternative

Utiliser des capteurs logiciels : **observateurs** pour reconstruire les variables non disponibles à la mesure (estimation)

Les techniques d'observation → une convergence **asymptotique** de l'erreur d'estimation

Une meilleure convergence → exponentielle ou en temps fini

Ces estimations : à utiliser par les systèmes d'aides à la conduite (contrôle)

- ▶ Détecter les situations critiques (observation et diagnostic)
- ▶ Action sur la dynamique du véhicule
 - ▶ Eviter la situation dangereuse
 - ▶ Importance du **temps** et de la **précision**
 - ▶ Vies en jeu

1ère partie

- ▶ Représentation non linéaire des dynamiques latérales du véhicule
 - ▶ Prise en compte des **non-linéarités** dans les efforts
 - ▶ Vitesse longitudinale variable

Modélisation **polytopique par le formalisme Takagui-Sugeno (TS)**

- ▶ Synthèse d'un estimateur polytopique TS assurant une convergence exponentielle
- ▶ Résultats de tests avec données expérimentales

2e partie

- ▶ Représentation des dynamiques latérales du véhicule par un système LPV en cascade
 - ▶ **Modèle des efforts non requis**
- ▶ Synthèse d'un estimateur assurant une **convergence en temps fini**
- ▶ Résultats de tests de simulations
- ▶ Diagnostic : détection des situations à risques

Travaux déjà réalisés

- ▶ Estimation de la dynamique latérale (IEEE CDC'12, MED'12, MSC14)
- ▶ Estimation simultanée de la dynamique latérale et de la courbure (IEEE ICNSC'13, papier de journal IEEE-TCST2014, Journal of Intelligent Systems2014)
- ▶ Estimation simultanée de la dynamique latérale et du coefficient d'adhérence (IEEE ITSC'13)

1ère partie : Représentation des dynamiques latérales

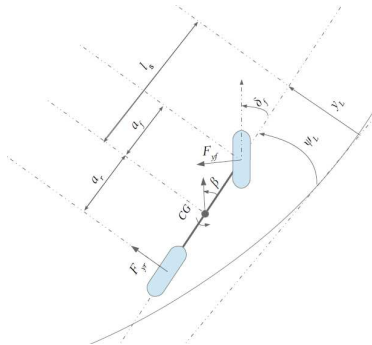


FIGURE: Modèle bicyclette avec positionnement sur la voie

$$m\dot{v}_y = (F_f + F_r) - mv_x\dot{\psi}$$

$$I_z\ddot{\psi} = a_f F_f - a_r F_r$$

$$\dot{y}_L = v_x(\beta + \psi_L) + l_s(\dot{\psi} - v_x\rho)$$

$$\dot{\psi}_L = \dot{\psi} - v_x\rho$$

1ère partie : Représentation des dynamiques latérales

Les efforts latéraux F_f et F_r

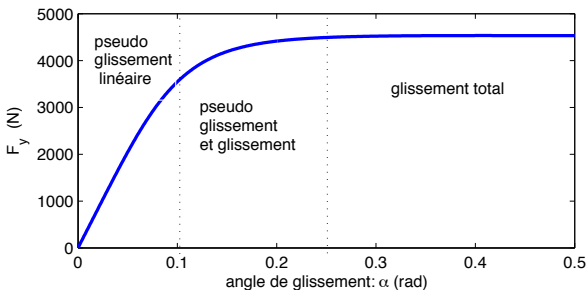


FIGURE: Efforts latéraux

- Linéaire : $F_i = C_i \alpha_i$
- Non linéaire : formule magique de Pacejka

$$F_i = D_i \sin \left(C_i \tan^{-1} \left(B_i (1 - E_i) \alpha_i + \tan^{-1} (B_i \alpha_i) \right) \right)$$

$$i = f, r$$

Expressions des angles de glissement avant et arrière

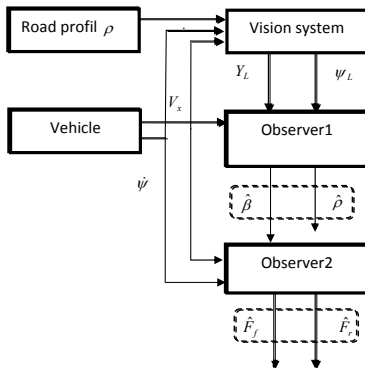
$$\begin{cases} \alpha_f \approx \delta_f - \frac{v_y}{v_x} - \frac{a_f}{v_x} \dot{\psi} \\ \alpha_r \approx -\frac{v_y}{v_x} + \frac{a_r}{v_x} \dot{\psi} \end{cases}$$

Equations de relaxation décrivant le régime transitoire des pneumatiques

$$\begin{cases} \tau_f \dot{F}_f + F_f = F_f^S \\ \tau_r \dot{F}_r + F_r = F_r^S \end{cases}$$

F_i^S : entrées, représentées par la formule de Pajecka

1ère partie : Représentation des dynamiques latérales



Modèle latéral en cascade

$$S_1 : \begin{cases} \dot{y}_y = \frac{1}{m} (F_f + F_r) - v_x \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} (a_f F_f - a_r F_r) \\ \dot{F}_f = -\frac{v_x}{r_f} F_f + \frac{v_x}{r_f} F_f^S \\ \dot{F}_r = -\frac{v_x}{r_r} F_r + \frac{v_x}{r_r} F_r^S \end{cases}$$

$$S_2 : \begin{cases} \psi_L = \psi - v_x \rho \\ \dot{y}_L = (v_y + v_x \psi_L) + l_s (\dot{\psi} - v_x \dot{\rho}) \end{cases}$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Estimation de la courbure de la route : Système de vision S_2

- ▶ Mesures disponibles : $\dot{\psi}, \psi_L, y_L$
- ▶ $\dot{\psi}_L = \dot{\psi} - v_x \rho \rightarrow \hat{\rho} = \frac{\dot{\psi} - \dot{\psi}_{Le}}{v_x}$
 - ▶ Utilisation d'un différentiateur à modes glissants (HOSMD)
 - ▶ $v_x \neq 0$

Estimation de la vitesse latérale et des efforts : Transformation de S_1 avec

$$\begin{cases} x_1(t) = v_y \\ x_2(t) = \dot{\psi} \\ x_3(t) = \frac{1}{m} (F_f + F_r) \\ x_4(t) = \frac{1}{I_z} (a_f F_f - a_r F_r) \end{cases}$$

↓

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -v_x x_2(t) + x_3(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_4(t) \\ \dot{x}_3(t) = -\frac{v_x}{r} x_3(t) + \frac{v_x}{mr} (F_f^S + F_r^S) \\ \dot{x}_4(t) = -\frac{v_x}{r} x_4(t) + \frac{v_x}{I_z r} (a_f F_f^S - a_r F_r^S) \end{cases}$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Estimation de la courbure de la route : Système de vision S_2

- ▶ Mesures disponibles : $\dot{\psi}, \psi_L, y_L$
- ▶ $\dot{\psi}_L = \dot{\psi} - v_x \rho \rightarrow \hat{\rho} = \frac{\dot{\psi} - \dot{\psi}_{Le}}{v_x}$
 - ▶ Utilisation d'un differentiateur à modes glissants (HOSMD)
 - ▶ $v_x \neq 0$

Estimation de la vitesse latérale et des efforts : Transformation de S_1 avec

$$\begin{cases} x_1(t) = v_y \\ x_2(t) = \dot{\psi} \\ x_3(t) = \frac{1}{m} (F_f + F_r) \\ x_4(t) = \frac{1}{I_z} (a_f F_f - a_r F_r) \end{cases}$$

↓

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -v_x x_2(t) + x_3(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_4(t) \\ \dot{x}_3(t) = -\frac{v_x}{r} x_3(t) + \frac{v_x}{mr} (F_f^S + F_r^S) \\ \dot{x}_4(t) = -\frac{v_x}{r} x_4(t) + \frac{v_x}{I_z r} (a_f F_f^S - a_r F_r^S) \end{cases}$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Transformation polytopique TS avec les secteurs non linéaires

$$F_i = D_i \sin \left(C_i \tan^{-1} \left(B_i (1 - E_i) \alpha_i + \tan^{-1} (B_i \alpha_i) \right) \right)$$

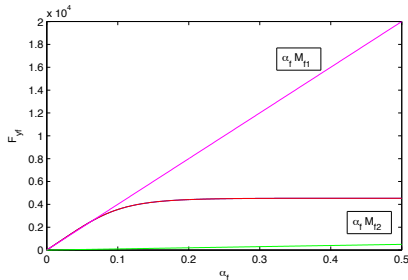


FIGURE: Délimitation de l'effort latéral F_f par un secteur global

Objectif : Réécriture des expressions des efforts latéraux sous forme polytopique

$$F_f^S = \sum_{i=1}^2 \mu_{fi}(\alpha_f) M_{fi} \alpha_f$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Après quelques manipulations : $F_f^S = f(\alpha_f)\alpha_f$

$$f(\alpha_f) = \mathcal{A}_f \frac{\sin(S_3)}{S_3} \frac{\tan^{-1}(S_2)}{S_2} + \mathcal{B}_f \frac{\sin(S_3)}{S_3} \frac{\tan^{-1}(S_2)}{S_2} \frac{\tan^{-1}(S_1)}{S_{1f}}$$

$$S_1 = B\alpha_f, \quad S_2 = B(1-E)\alpha_f + E \tan^{-1}(S_1)$$

$$S_3 = C \tan^{-1}(S_2), \quad \mathcal{A}_f = BCD(1-E), \quad \mathcal{B}_f = BCDE$$

$\frac{\sin(x)}{x}$ est définie sur $\mathbb{R}$ quand $x \rightarrow 0$ $\frac{\sin(x)}{x} \rightarrow 1$

$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\tan^{-1}(x)}{x} \right) = 1$ sachant que α_f est un angle borné, $\frac{\tan^{-1}(x)}{x}$ est bornée.

$$f(\alpha_f) \text{ bornée } \forall \alpha_f : f_{\min} \leq f(\alpha_f) \leq f_{\max}$$

$f(\alpha_f)$: variable de prémisse

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Les expressions TS des efforts

$$\begin{cases} F_f^S = \sum_{i=1}^2 \mu_{fi} \left(\begin{pmatrix} \frac{-M_{fi}}{v_x} & \frac{-a_f M_{fi}}{v_x} & 0 & 0 \end{pmatrix} x(t) + M_{fi} \delta_f \right) \\ F_r^S = \sum_{j=1}^2 \mu_{rj} \left(\begin{pmatrix} \frac{-M_{rji}}{v_x} & \frac{a_r M_{rji}}{v_x} & 0 & 0 \end{pmatrix} x(t) \right) \end{cases}$$

$$x^T(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T$$

Le modèle polytopique TS

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 \mu_i(\mathbf{x}(t)) (A_i x(t) + B_i u(t))$$

avec

$$\sum_{i=1}^4 \mu_i(\mathbf{x}(t)) = 1 \text{ et } \mu_i(\mathbf{x}(t)) \geq 0, \forall t$$

$$A_{jk} = \begin{pmatrix} 0 & -v_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{1jk} & a_{2jk} & -\frac{v_x}{r} & 0 \\ a_{3jk} & a_{4jk} & 0 & -\frac{v_x}{r} \end{pmatrix}, \quad B_{jk} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{1jk} \\ b_{2jk} \end{pmatrix}$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Prise en compte de la variation de la vitesse longitudinale

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 \mu_i(z(t)) (A_i(v_x(t))x(t) + B_i(v_x(t))u(t))$$

où $v_x^{\min} \leq v_x(t) \leq v_x^{\max}$, $\forall t$

Le modèle polytopique global :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^8 h_i(z(t)) (\mathcal{A}_i x(t) + \mathcal{B}_i u(t)) \\ y(t) = \mathcal{C} x(t) \end{cases}$$

$$\mathcal{C} = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)$$

Vecteur de variables de prémisse : $z^T(t) = (v_x(t) \quad v_y(t) \quad \dot{\psi}(t) \quad \delta_f(t))^T$

Pas complètement mesurable

- Modèle polytopique TS à **variable de décision non mesurables** (VDNM)

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Transformation du modèle TS à VDNM en VDM

- Utilisation du système de vision avec des approches algébriques et les modes glissants

$$z(t) = (v_x(t) \quad v_y(t) \quad \psi(t) \quad \delta_f(t))^T$$

- Variables mesurables : $v_x(t)$ $\psi(t)$ $\delta_f(t)$
- Variables non mesurables : $v_y(t)$

A partir de l'équation de y_L

$$v_y = \dot{y}_L - v_x \psi_L - l_s \dot{\psi}_L$$

$$z(t) \rightarrow s(t) = (v_x \quad \dot{\psi} \quad \psi_L \quad \dot{y}_L \quad \dot{\psi}_L \quad \delta_f)^T$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^8 h_i(s(t)) (\mathcal{A}_i x(t) + \mathcal{B}_i u(t)) \\ y(t) = \mathcal{C} x(t) \end{cases}$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

- Equivalence des deux systèmes assurée quand les dérivées $\dot{y}_L$ et $\dot{\psi}_L$ sont exactes
 - Dérivées obtenues à partir de differentiateurs à modes glissants (HOSMD)
- L'exactitude est assurée après un temps fini T (Régime transitoire du differentiateur)

Prise en considération du régime transitoire

$$s_e(t) = \begin{pmatrix} v_x & \dot{\psi} & \psi_L & \dot{y}_{Le} & \dot{\psi}_{Le} & \delta_f \end{pmatrix}^T$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^8 h_i(s_e(t)) (\mathcal{A}_i x(t) + \mathcal{B}_i u(t)) + \Gamma \delta(t) \\ y(t) = \mathcal{C} x(t) \end{cases}$$

avec

$$\delta(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^8 (h_i(s(t)) - h_i(s_e(t))) (\mathcal{A}_i x(t) + \mathcal{B}_i u(t)) & t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases}$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

L'observateur proposé

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^8 h_i(s_e(t)) (\mathcal{A}_i \hat{x}(t) + \mathcal{B}_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t))) \\ \hat{y}(t) = \mathcal{C} \hat{x}(t) \end{cases}$$

L'erreur d'estimation : $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^8 h_i(s_e(t)) ((\mathcal{A}_i - L_i \mathcal{C}) e(t) + \Gamma \delta(t))$$

Objectif : déterminer les gains L_i de l'observateur pour assurer la stabilité exponentielle du système générant la dynamique de l'erreur d'estimation

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Théorème

Soit un scalaire positif α . S'il existe une matrice définie positive $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matrices-gain $M_i \in \mathbb{R}^{n \times n_y}$ et un scalaire positif c solutions des contraintes LMI suivantes

$$\begin{pmatrix} \mathcal{A}_i^T P + P \mathcal{A}_i - M_i \mathcal{C} - \mathcal{C}^T M_i^T + \alpha P & P \Gamma \\ \Gamma^T P & -c I_2 \end{pmatrix} < 0, \quad i = 1, \dots, 8$$

L'erreur d'estimation d'état converge exponentiellement vers zéro suivant l'inégalité

$$\|e(t)\|_2 = \begin{cases} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \|e(0)\|_2 e^{-\frac{\alpha}{2}t} + \sqrt{\frac{c}{\alpha\alpha_1}} \max_{\tau \in [0, T[} \|\delta(\tau)\|_2 & t \in [0, T[\\ \sqrt{\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \|e(0)\|_2^2 + \frac{c}{\alpha\alpha_1} \max_{\tau \in [0, T[} \|\delta(\tau)\|_2^2 e^{\alpha T} \right)} e^{-\frac{\alpha}{2}t} & t \in [T, \infty) \end{cases}$$

α_1, α_2 valeurs propres min et max de P Les gains de l'observateur déterminés par : $L_i = P^{-1}M_i$ et le taux de décroissance de la convergence exponentielle par : $\frac{\alpha}{2}$.

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

1- Preuve de convergence exponentielle

$$V(e(t)) = e^T(t)Pe(t), \quad P = P^T > 0$$

Sa dérivée :

$$\dot{V}(e(t)) = \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= e^T(t) \left(\sum_{i=1}^8 \mu_i(s_e(t)) \left(\Phi_i^T P + P \Phi_i \right) \right) e(t) \\ &\quad + e^T(t) P \Gamma \delta(t) + \delta^T(t) \Gamma^T P e(t) \end{aligned}$$

$\Phi_i = A_i - L_i C$. α et c sont des scalaires positifs

$$\dot{V}(e(t)) = \sum_{i=1}^8 \mu_i(s_e(t)) \zeta^T(t) \Xi_i \zeta(t) - \alpha e^T(t) P e(t) + c \delta^T(t) \delta(t)$$

$$\Xi_i = \begin{pmatrix} \Phi_i^T P + P \Phi_i + \alpha P & P \Gamma \\ \Gamma^T P & -c I_2 \end{pmatrix}, \quad \zeta(t) = [e^T(t) \quad \delta^T(t)]^T$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(s_e(t)) \xi^T(t) \Xi_i \xi(t) < 0$$

$$\dot{V}(e(t)) < -\alpha e^T(t) P e(t) + c \delta^T(t) \delta(t)$$

Solution

$$V(e(t)) < V(e(0))e^{-\alpha t} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [0, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2$$

$\max_{\tau \in [0, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2$ borné dans $[0, t] \rightarrow$ ISS assurée

Analyse sur deux intervalles de temps $t \in [0, T[$ et $t \in [T, \infty)$

Convergence **exponentielle** vers zéro de l'erreur d'estimation d'état

► $t \in [0, T[$:

$$V(e(T)) < V(e(0))e^{-\alpha T} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [0, T]} \|\delta(\tau)\|_2^2$$

► $t \in [T, \infty)$:

$$V(e(t)) < V(e(T))e^{-\alpha(t-T)} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [T, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(s_e(t)) \xi^T(t) \Xi_i \xi(t) < 0$$

$$\dot{V}(e(t)) < -\alpha e^T(t) P e(t) + c \delta^T(t) \delta(t)$$

Solution

$$V(e(t)) < V(e(0))e^{-\alpha t} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [0, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2$$

$\max_{\tau \in [0, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2$ borné dans $[0, t] \rightarrow$ ISS assurée

Analyse sur deux intervalles de temps $t \in [0, T[$ et $t \in [T, \infty)$

Convergence **exponentielle** vers zéro de l'erreur d'estimation d'état

► $t \in [0, T[$:

$$V(e(T)) < V(e(0))e^{-\alpha T} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [0, T]} \|\delta(\tau)\|_2^2$$

► $t \in [T, \infty)$:

$$V(e(t)) < V(e(T))e^{-\alpha(t-T)} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [T, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

Après $t = T$, $\delta(t) = 0 \rightarrow \max_{\tau \in [T, t]} \|\delta(\tau)\|_2^2 = 0$

$$\begin{aligned} V(e(t)) &< \left(V(e(0))e^{-\alpha T} + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [0, T[} \|\delta(\tau)\|_2^2 \right) e^{-\alpha(t-T)} \\ &< \left(V(e(0)) + \frac{c}{\alpha} \max_{\tau \in [0, T[} \|\delta(\tau)\|_2^2 e^{\alpha T} \right) e^{-\alpha t} \end{aligned}$$

Après un temps T :

$$\|e(t)\|_2 = \sqrt{\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \|e(0)\|_2^2 + \frac{c}{\alpha\alpha_1} \max_{\tau \in [0, T[} \|\delta(\tau)\|_2^2 e^{\alpha T} \right) e^{-\frac{\alpha}{2}t}}, \quad t \in [T, \infty)$$

1ère partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales et de la courbure de la route

2- Conditions LMI

- Convergence exponentielle

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(s_e(t)) \xi^T(t) \Xi_i \xi(t) < 0$$

- Propriété de somme convexe des fonctions de pondération

$$\Xi_i < 0, \quad i = 1, \dots, 8$$

- Changement de variables $M_i = PL_i$

$$\begin{pmatrix} \mathcal{A}_i^T P + P \mathcal{A}_i - M_i \mathcal{C} - \mathcal{C}^T M_i^T + \alpha P & P \Gamma \\ \Gamma^T P & -c l_2 \end{pmatrix} < 0$$
$$i = 1, \dots, 8$$

- En utilisant la formulation algébrique et les estimées des états obtenus

$$\begin{cases} \hat{F}_f = \frac{ma_r \hat{x}_3(t) + l_z \hat{x}_4(t)}{a_f + a_r} \\ \hat{F}_r = \frac{ma_f \hat{x}_3(t) - l_z \hat{x}_4(t)}{a_f + a_r} \end{cases}$$

Implémentation avec données réelles à partir d'essais réalisés sur la piste de Versailles Satory

- ▶ Système de vision : caméra à l'avant et algorithmes de vision
 - ▶ écart latéral et angle de cap (y_L, ψ_L)
- ▶ Centrale inertielle : vitesse de lacet ($\dot{\psi}$)
- ▶ Codeur optique : angle de braquage (δ_f)
- ▶ Odometre : vitesse longitudinale

1ère partie : Résultats des tests de simulations

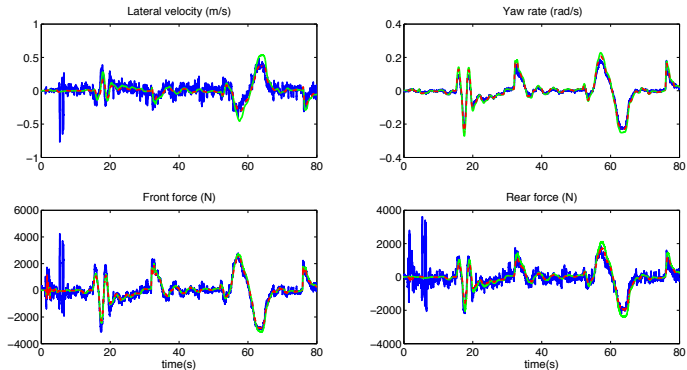


FIGURE: Comparaison des variables réelles et TS avec et sans relaxation

Courbes bleues : réelles, rouges : TS avec relaxation et vertes : TS sans relaxation

Résultats des tests avec des données réelles

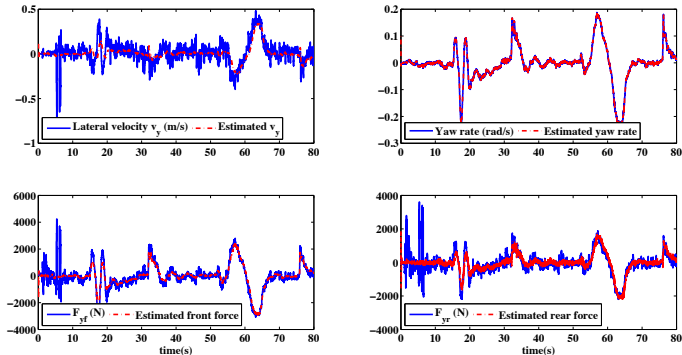


FIGURE: Estimations de la vitesse latérale et des efforts comparées aux données réelles

1ère partie : Résultats des tests de simulations

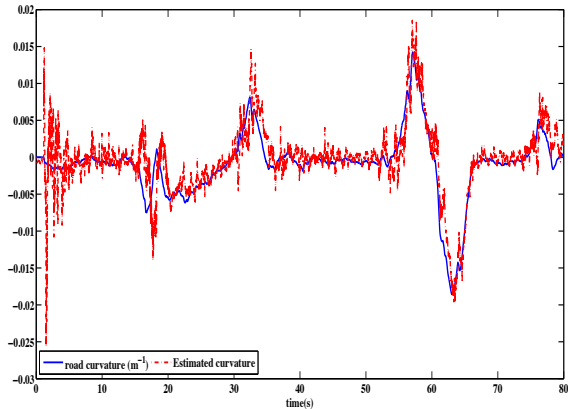


FIGURE: Estimation de la courbure de la route

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

2e partie

- ▶ Représentation LPV des dynamiques latérales du véhicule
 - ▶ Modèle des efforts **non nécessaire**
 - ▶ Vitesse longitudinale variable

Efforts considérés comme **entrées inconnues**

- ▶ Synthèse d'un estimateur assurant une **convergence en temps fini** de l'erreur d'estimation
- ▶ Résultats de tests de simulations

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

$$S_1 : \begin{cases} \dot{\psi}_L = \dot{\psi} - v_x \rho \\ \dot{y}_L = (v_y + v_x \psi_L) + l_s (\dot{\psi} - v_x \rho) \end{cases}$$

$$S_2 : \begin{cases} \dot{v}_y = \frac{1}{m} (F_f + F_r) - v_x \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{l_z} (a_f F_f - a_r F_r) \end{cases}$$

- ▶ Représentation non linéaire à paramètres variants ($v_x(t)$)
- ▶ Expressions des efforts non nécessaires
- ▶ Estimation en temps fini
- ▶ A partir du système S_1 : Estimation de la vitesse latérale et de la courbure de la route en temps fini
- ▶ Estimation S_1 utilisées par S_2 pour l'estimation des efforts latéraux

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Représentation du système S_1

$$S_1 : \begin{cases} \dot{x}^1(t) = A(v_x(t))x^1(t) + Bu(t) + E(v_x(t))d(t) \\ y(t) = Cx^1(t) \end{cases}$$

avec

$$A(v_x(t)) = A_\mu = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ v_x(t) & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 \\ l_s \end{pmatrix},$$

$$E(v_x(t)) = E_\mu = \begin{pmatrix} -v_x(t) & 0 \\ -l_s v_x(t) & 1 \end{pmatrix}, C = I_{2 \times 2}$$

► Degré relatif est 1

Observateur proposé pour estimer la vitesse latéral et la courbure de la route

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}^1(t) = (P_\mu A_\mu - L_\mu C) \hat{x}^1(t) + Q_\mu \dot{y}(t) + L_\mu y(t) + S_\mu u(t) \\ \hat{d}(t) = (CE_\mu)^{-1} (\dot{y}(t) - CA_\mu \hat{x}^1(t) - Bu(t)) \end{cases}$$

avec

$$Q_\mu = E_\mu (CE_\mu)^{-1}, P_\mu = I_{2 \times 2} - Q_\mu C, S_\mu = B - Q_\mu CB$$

CE_μ existe si $v_x(t) \neq 0$.

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

En déterminant les quantités

$$Q_\mu = I_{2 \times 2}, P_\mu = 0_{2 \times 2}, S_\mu = 0_{2 \times 1}$$

L'observateur

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = -L\hat{x}(t) + \dot{y}(t) + Ly(t) \\ \hat{d}(t) = (E_\mu)^{-1} (\dot{y}(t) - CA_\mu\hat{x}(t) - Bu(t)) \end{cases}$$

Un gain constant est suffisant dans ce cas

Erreur d'estimation

$$\begin{cases} \dot{e}^1(t) = -L_\mu e^1(t) \\ e_d(t) = (E_\mu)^{-1} e^1(t) \end{cases}$$

Convergence asymptotique ou exponentielle

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Estimation en temps fini

Définition (Stabilité en temps fini) Moulay2000, Bhat2005

^a

Soit le système $\dot{x}(t) = f(x(t))$, où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $f(x(t))$ est une fonction non linéaire satisfaisant $f(0) = 0$.

Ce système est stable en temps fini, s'il existe une fonction de Lyapunov $V(x(t))$ tel que

$$\dot{V}(x(t)) < -cV^\alpha$$

avec c et α des scalaires positifs et $0 < \alpha < 1$. Le temps fini maximal $T_{\max}$ nécessaire à $x(t)$ pour atteindre l'origine est évalué à : $T_{\max} = \frac{2V(x(0))^{1-\alpha}}{c(1-\alpha)}$

a. E. Moulay and W. Perruquetti. Lyapunov-based approach for finite time stability and stabilization. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conf

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

En particulier, pour les systèmes sous forme triangulaire

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t), & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n(t) = u(t) \end{cases}$$

Une approche basée sur l'homogénéité géométrique

Théorème (Stabilisation en temps fini)

Si la loi de commande $u(t)$ est choisie comme suit ^a

$$u = -k_1 |x_1|^{\alpha_1} \text{sign}(x_1) - \dots - k_n |x_n(t)|^{\alpha_n} \text{sign}(x_n)$$

avec $k_1, \dots, k_n$ choisis tel que le polynôme $s^n + k_n s^{n-1} + \dots + k_1$ soit Hurwitz et les paramètres α_i , $i = 1, \dots, n$ sont $\alpha_{i-1} = \frac{\alpha_i \alpha_{i+1}}{2\alpha_{i+1} - \alpha_i}$ où $\alpha_{n+1} = 1$ et $\alpha_n = \alpha$ et $\alpha \in [1 - \varepsilon, 1]$ for $\varepsilon \in (0, 1)$, alors l'origine du système est un point d'équilibre globalement stable en temps fini.

a. S. P. Bhat and D. S. Bernstein. Geometric homogeneity with applications to finite-time stability. Mathematics of Control, Signals and Systems, 101127, 2005.

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = -L\hat{x}(t) + \dot{y}(t) + Ly(t) + \xi(t) \\ \hat{d}(t) = (E_\mu)^{-1} (\dot{y}(t) - CA_\mu\hat{x}(t) - Bu(t)) \end{cases}$$

avec

$$\xi(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ k_1 |e_1^1(t)|^{\alpha_1} \text{sign}(e_1^1(t)) + k_1 |e_2^1(t)|^{\alpha_2} \text{sign}(e_2^1(t)) \end{pmatrix}$$

Après détermination de l'erreur d'estimation d'état et en choisissant une matrice L

$$L = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ l_1 & l_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{e}_1^1(t) = e_2^1(t) \\ \dot{e}_2^1(t) = -l_1 e_1^1(t) - l_2 e_2^1(t) - k_1 |e_1^1(t)|^{\alpha_1} \text{sign}(e_1^1(t)) - k_1 |e_2^1(t)|^{\alpha_2} \text{sign}(e_2^1(t)) \end{cases}$$

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Si $l_1 = l_2 = 0$

$$\begin{cases} \dot{e}_1^1(t) = e_2^1(t) \\ \dot{e}_2^1(t) = -k_1 |e_1^1(t)|^{\alpha_1} \text{sign}(e_1^1(t)) - k_2 |e_2^1(t)|^{\alpha_2} \text{sign}(e_2^1(t)) \end{cases}$$

La stabilité en temps fini est assurée en choisissant $k_1 > 0$ et $k_2 > 0$ tel que le polynôme

$$s^2 + k_2 s + k_1 = 0$$

soit Hurwitz et les paramètres α_1 et α_2 tel que $\alpha_1 \in [1 - \varepsilon, 1]$ pour $\varepsilon \in [0, 1]$ et

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{2 - \alpha_1}$$

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Elements de preuve de convergence

Cas général

$$\dot{e}^1(t) = - \begin{pmatrix} l_1 & l_2 \\ l_3 & l_4 \end{pmatrix} e^1(t) - \xi(t)$$

avec

$$\xi(t) = \begin{pmatrix} k_1 |e_1^1(t)|^{\alpha_1} \text{sign}(e_1^1(t)) + k_2 |e_2^1(t)|^{\alpha_2} \text{sign}(e_2^1(t)) \\ k_3 |e_1^1(t)|^{\alpha_3} \text{sign}(e_1^1(t)) + k_4 |e_2^1(t)|^{\alpha_4} \text{sign}(e_2^1(t)) \end{pmatrix}$$

Hypothèses

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$$

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0$$

$$\dot{e}_1^1(t) = -k_1 |e_1^1(t)|^\alpha \text{sign}(e_1^1(t)) - k_2 |e_2^1(t)|^\alpha \text{sign}(e_2^1(t))$$

$$\dot{e}_2^1(t) = -k_3 |e_1^1(t)|^\alpha \text{sign}(e_1^1(t)) - k_4 |e_2^1(t)|^\alpha \text{sign}(e_2^1(t))$$

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Fonction de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} \|e^1(t)\|^2$$

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -k_1 |e_1^1(t)|^{1+\alpha} - k_4 |e_2^1(t)|^{1+\alpha} \\ &\quad - k_2 e_1^1(t) |e_2^1(t)|^\alpha \operatorname{sign}(e_2^1(t)) \\ &\quad - k_3 e_2^1(t) |e_1^1(t)|^\alpha \operatorname{sign}(e_1^1(t))\end{aligned}$$

Choix de $k_2 = k_3 = 0$ et $k_1 = k_4 = k > 0$

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -k \left(|e_1^1(t)|^{1+\alpha} + |e_2^1(t)|^{1+\alpha} \right) \\ &= -k \left(|(e_1^1(t))^2|^{\frac{1+\alpha}{2}} + |(e_2^1(t))^2|^{\frac{1+\alpha}{2}} \right)\end{aligned}$$

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

En utilisant le lemme cité dans Hong2002¹

$$\dot{V} < -k \left((e_1^1(t))^2 + (e_2^1(t))^2 \right)^{\frac{1+\alpha}{2}}$$

$$\dot{V} < -cV^\gamma$$

où

$$c = 2^{\frac{1+\alpha}{2}} k, \gamma = \frac{1+\alpha}{2}$$

- Choix de gain k positif et $\alpha \in]0, 1[$ tel que $\gamma \in]\frac{1}{2}, 1[$
- Erreur d'estimation d'état $\rightarrow 0$ en un temps fini

$$T_{\max} = \frac{2V(e^1(0))^{1-\gamma}}{c(1-\gamma)}$$

1. Y. Hong. Finite-time stabilization and stabilizability of a class of controllable systems. Systems & Control Letters, 46(4) :231–236, 2002.

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

2– Estimation des efforts latéraux

$$S_2 : \begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2(V_x(t))x_2(t) + D_2(V_x(t))d_2(t) \\ y_2(t) = C_2^*x_2(t) \end{cases}$$

$$C_2 = [0 \ 1] \rightarrow C_2^* = I_2$$

Observateur proposé :

$$\begin{cases} \hat{\dot{x}}_2(t) = A_2(V_x(t))\hat{x}_2(t) + D_2(V_x(t))d_2(t) + \xi(t) \\ \hat{y}_2(t) = C_2^*\hat{x}_2(t) \end{cases}$$

- Représentation de S_2 sous la même forme que S_1
- Même procédure suivie pour le système S_1 pour l'estimation

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Résultats de simulation

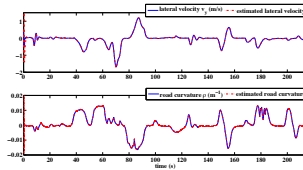


FIGURE: Estimations de la vitesse latérale et de la courbure avec le 1er observateur

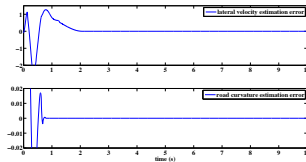


FIGURE: Lateral velocity and road curvature state estimation errors

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Résultats de simulation

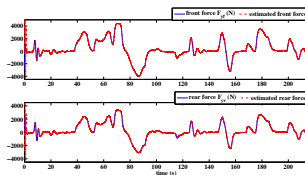


FIGURE: Estimations des forces avec le 2ème observateur

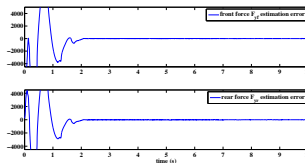


FIGURE: Forces estimation errors

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Principe de détection de situations limites

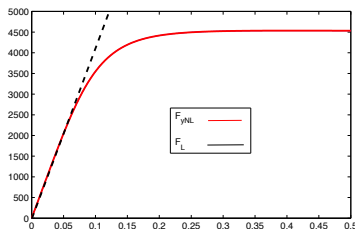


FIGURE: Effort latéral NL et linéaire

- Génération des résidus : différence entre l'effort non linéaire et linéaire
- Evaluation par rapport à un seuil

$$\begin{cases} r_1(t) = \Delta F_{yf} = \hat{F}_{yf} - C_f \left(\delta_f - \frac{\hat{v}_y}{v_x} - \frac{a_f}{v_x} \psi \right) \\ r_2(t) = \Delta F_{yr} = \hat{F}_{yr} - C_r \left(-\frac{\hat{v}_y}{v_x} + \frac{a_f}{v_x} \psi \right) \end{cases}$$

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

$$\begin{cases} r_1(t) = \Delta F_{yf} = \hat{F}_{yf} - C_f \left(\delta_f - \frac{\hat{v}_y}{v_x} - \frac{a_f}{v_x} \psi \right) \\ r_2(t) = \Delta F_{yr} = \hat{F}_{yr} - C_r \left(-\frac{\hat{v}_y}{v_x} + \frac{a_f}{v_x} \psi \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \left(\delta_f - \frac{v_y}{v_x} - \frac{a_f}{v_x} \psi \right) + \Delta F_{yf} \\ F_{yr} = C_r \left(-\frac{v_y}{v_x} + \frac{a_f}{v_x} \psi \right) + \Delta F_{yr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} |r_1(t)| \leq J_{th}^f & \text{pas de situation critique} \\ |r_1(t)| > J_{th}^f & \text{situation critique} \end{cases}$$

$$\begin{cases} |r_2(t)| \leq J_{th}^r & \text{pas de situation critique} \\ |r_2(t)| > J_{th}^r & \text{situation critique} \end{cases}$$

2ème partie : Stratégie d'estimation des dynamiques latérales en temps fini et détection de situations critiques

Résultat de test de simulation

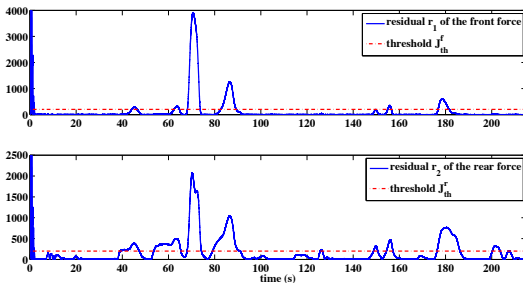


FIGURE: Détection de situations limites

Conclusion

- ▶ Représentation des dynamiques latérales du véhicule
 - ▶ Caractère non linéaire des efforts
 - ▶ Variation de la vitesse longitudinale
- ▶ Estimation des variables non disponibles à la mesures
 - ▶ Convergence exponentielle
 - ▶ Convergence en temps fini
- ▶ Détection de situations limites basée sur des estimations en temps fini

Perspectives

- ▶ Prise en considération de la dynamique longitudinale (modèle couplé)
- ▶ Action sur la dynamique latérale du véhicule (contrôle et assistance)

Merci pour votre attention