

Projet Tuteuré Véhicule intelligent

Objectifs : Modélisation, contrôle et observation d'un véhicule automobile.

Partie I : Modélisation d'un véhicule automobile

Lors de la conduite d'un véhicule automobile, le conducteur exerce des efforts sur le volant pour donner au véhicule la trajectoire souhaitée. Les efforts dus au contact pneu-chaussée et à la dynamique du véhicule remontent à travers la colonne de direction jusqu'au volant, où ils sont perçus par le conducteur. Les informations apportées au conducteur, au moyen de cet échange de flux (vitesses) et d'efforts (forces-couples), sont d'une grande utilité pour orienter le véhicule et ressentir les limites de son adhérence au sol.

L'objectif de cette première partie est de modéliser la dynamique du véhicule en prenant en compte la dynamique de positionnement sur la route. Afin d'établir un modèle représentant la dynamique longitudinale et latérale du véhicule en considérant un minimum de complexité, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été considérées :

- La route est considérée plane et uniforme (sans dévers ni pente).
- Le mouvement de translation se réduit à deux degrés de liberté : le mouvement vertical est négligé et on ne considère que les translations longitudinale et latérale.
- Les mouvements de roulis et de tangage sont négligés et le mouvement de rotation se résume au mouvement de lacet.
- Les forces des roues du même essieu sont identiques
- L'angle de braquage (δ) est petit.

Le véhicule est représenté comme un système dynamique non linéaire comme suit :

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \frac{T_c + T_r}{I_{eff}} - \frac{c_x v_x |v_x|}{m} + v_y \dot{\psi} \\ \dot{v}_y = \frac{F_{yf} + F_{yr} + f_w - c_y v_y |v_y|}{m} - v_x \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} = \frac{l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + l_w f_w}{I_z} \end{cases} \quad (1)$$

Où : $T_c = T_t - T_{frein}$ et T_r sont le couple de traction/freinage du moteur et le couple résistant, I_{eff} est l'inertie effective et les forces latérales équivalentes de chaque essieu sont données par :

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f = C_f \left(\delta - \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x} \right) \\ F_{yr} = C_r \alpha_r = -C_r \left(\frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \right) \end{cases}$$

Où C_f et C_r sont les coefficients de la raideur latérale des pneumatiques liées aux essieux avant et arrière respectivement.

Nous considérons dans la suite du projet que les deux modes longitudinal et latéral du véhicule sont découplés et peuvent être commandés séparément. Tous les paramètres et leurs significations sont donnés dans le tableau I.

Le mode longitudinal est asservi par le conducteur qui le pilote de manière à ce que sa vitesse v (ou sortie) suive une consigne donnée. Le conducteur est ici considéré comme le régulateur. Il sera modélisé par un régulateur de type PI. Ainsi :

$$\text{Consigne_couple_roue} = K_p(\text{Consigne_vitesse} - \text{mesure_vitesse}) + K_I \int_0^t (\text{Consigne_vitesse} - \text{mesure_vitesse}) dt$$

Travail demandé : *Modélisation du véhicule et du conducteur sous Simulink*

- Programmer les équations du système (1) sur Simulink.
- Régler les gains du correcteur de façon à avoir un bon suivi de la consigne de vitesse.

m : Masse du véhicule	1500
I_{eff} : Inertie moteur	$0.3 * m$
I_z : Inertie verticale	2454
C_f : Coefficient de raideur du pneu avant	57500
C_r : Coefficient de raideur du pneu arrière	57500
l_f : distance entre le CG et l'essieu avant	1.0065
l_r : distance entre le CG et l'essieu arrière	1.4625
C_x : coefficient de la traînée aérodynamique en longitudinal	0.35
C_y : coefficient de la traînée aérodynamique en latéral	0.45
T_r : couple de roulement	0
L_w : distance entre le CG et le point d'impact force du vent	0.4
T_c : couple moteur (traction + freinage)	A piloter

Partie II : Commande de la direction pour le véhicule automatisé

Lorsque l'objectif est de développer un système de contrôle de direction pour le maintien automatique de la voie, il est utile d'utiliser un modèle dynamique dans lequel les variables d'état sont en termes d'erreur de position et d'orientation par rapport à la route.

Par conséquent, le modèle latéral présenté dans (1) sera redéfini en fonction des variables d'erreur suivantes :

e_1 : la distance du c.g. du véhicule par rapport au centre de la voie

e_2 : l'erreur d'orientation du véhicule par rapport au cap de la route.

Considérons un véhicule se déplaçant à vitesse longitudinale constante sur une section de route circulaire de rayon de courbure R constant. Supposons aussi que le rayon R est grand afin que les mêmes hypothèses des petits angles (braquage δ) que dans la partie précédente (dynamique latérale) puissent être faites.

La vitesse de lacet désirée du véhicule relative à la route peut être décrite comme :

$$\dot{\psi}_{des} = \frac{V_x}{R}$$

L'accélération désirée du véhicule relative à la route peut alors être écrite comme :

$$a_{y des} = v_x \dot{\psi}_{des} = \frac{v_x^2}{R}$$

L'accélération latérale du véhicule est exprimée par :

$$a_y = \ddot{y} + v_x \dot{\psi}$$

Travail demandé : contrôle latéral du véhicule pour le maintien de voie

- En posant l'expression en termes d'erreur d'accélération $\ddot{e}_1 = a_y - a_{y des}$ et d'erreur d'orientation de lacet $e_2 = \psi - \psi_{des}$, écrire la dynamique du modèle latéral du véhicule en termes d'erreurs de position et d'orientation. Donner la représentation d'état du système sous la forme :

$$\dot{X} = AX + B_1 \delta + B_2 \dot{\psi}_{des}$$

Avec le vecteur d'état : $X = [e_1 \quad \dot{e}_1 \quad e_2 \quad \dot{e}_2]^T$.

- L'objectif de cette partie est de concevoir un contrôleur permettant d'assurer le maintien de voie du véhicule. Proposer une commande par retour d'état en utilisant la méthode de placement des pôles de boucle fermée du système (utiliser la fonction « place » de Matlab). Pour cela, un signal d'entrée de la vitesse de lacet désirée relative à la route doit être généré à partir d'une courbure désirée de la route (utiliser le block « signal Builder » sur Simulink).

Commande non linéaire par mode glissant

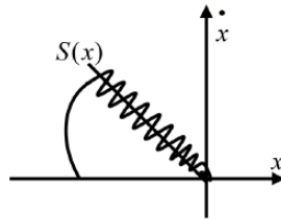
Introduction :

Le principe de la commande par modes glissants (SMC) est de forcer les trajectoires du système à atteindre en un temps fini, et d'y rester sur une surface de glissement. La commande comprend, en général, deux termes $u = u_{eq} + u_{dis}$: un terme continu ou de basse fréquence appelée commande équivalente u_{eq} correspondant au régime glissant idéal (pour lequel non seulement le point de fonctionnement reste sur la surface mais aussi **pour lequel la dérivée de la fonction**

de surface reste nulle) et un terme discontinu ($u_{dis} = -K \text{sign}(s)$) qui impose au point de fonctionnement de rester au voisinage de la surface.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales : choix de la surface garantissant la performance désirée, établissement des conditions d'existence, et détermination de la loi de commande.

L'algorithme du super-twisting a été développé pour contrôler les systèmes avec un degré relatif égal à 1, et permet d'assurer la stabilité tout en réduisant le phénomène de « réticence » (*chattering en anglais*).



Principe de base du SMC

Considérons un système de la forme : $\dot{x} = f(t, x) + g(t, x)u(t)$

où u est l'entrée de commande, $x \in \mathbb{R}^n$ le vecteur d'état, et f, g des fonctions continues. Nous définissons une variable de glissement s de degré relatif égal à 1, dont la dérivée peut être exprimée comme suit :

$$\dot{s}(t, s) = \Phi(t, s) + \Omega(t, s)u(t)$$

L'objectif du contrôleur est d'assurer la convergence vers la surface de glissement définie par $s = 0$. Seule la mesure de s en temps réel est nécessaire.

Supposons qu'il existe des constantes positives $S_0, b_{\min}, b_{\max}, C_0, U_{\max}$ tel que $\forall x \in \mathbb{R}^n$, et $|s(t, x)| < S_0$ tel que le système remplit les conditions suivantes :

$$\begin{cases} |u(t)| \leq U_{\max} \\ 0 < b_{\min} \leq |\Omega(t, s)| \leq b_{\max} \\ |\Phi(t, s)| < C_0 \end{cases}$$

La commande par mode glissant basée sur l'algorithme du super-twisting est donnée par :

$$u(t) = -\rho \sqrt{|s|} \text{sign}(s) + u_1(t) \quad \text{avec : } \dot{u}_1 = -W \text{sign}(s)$$

avec α et β sont des constantes positives et doivent remplir les conditions suivantes de convergence en temps fini du contrôleur :

$$\begin{cases} W > \frac{C_0}{b_{\min}} \\ \rho^2 \geq \frac{4C_0 b_{\max} (W + C_0)}{b_{\min}^3 (W - C_0)} \end{cases}$$

Application au contrôle latérale du véhicule

On se basant sur le modèle bicyclette, dérivé du modèle complet (1), il est possible de stabiliser le véhicule en considérant comme sortie la vitesse latérale et la vitesse de lacet. L'objectif est de contrôler l'angle de braquage à partir de ces deux sorties.

Cette commande est basée sur l'algorithme suivant :

- En posant l'expression en termes d'erreur d'accélération $\ddot{e} = a_y - a_{y\ des}$, qui sont respectivement l'accélération latérale du véhicule et l'accélération latérale désirée :

$$\ddot{e} = (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) - \frac{v_x^2}{R}$$

- Définir et calculer la surface de glissement s , à partir de l'erreur dynamique :
 $s = \dot{e} + \lambda e$
- Puis, calculer la commande équivalente permettant de ramener le système dans la surface du glissement donnée par : $\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e}$
- En remplaçant les expressions de la dynamique latérale dans l'expression de \ddot{e} , montrer que celle-ci s'écrit comme :

$$\ddot{e} = -\frac{C_f + C_r}{mv_x} v_y - \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} \dot{\psi} + \frac{C_f}{m} \delta - \frac{v_x^2}{R}$$

- En remplaçant l'expression de \ddot{e} dans la dynamique de la surface de glissement, montrer qu'on obtient :

$$\dot{s} = -\frac{C_f + C_r}{mv_x} v_y - \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} \dot{\psi} + \frac{C_f}{m} \delta - \frac{v_x^2}{R} + \lambda \dot{e}$$

La variable s à un degré relatif de 1, elle peut être exprimée sous la forme :

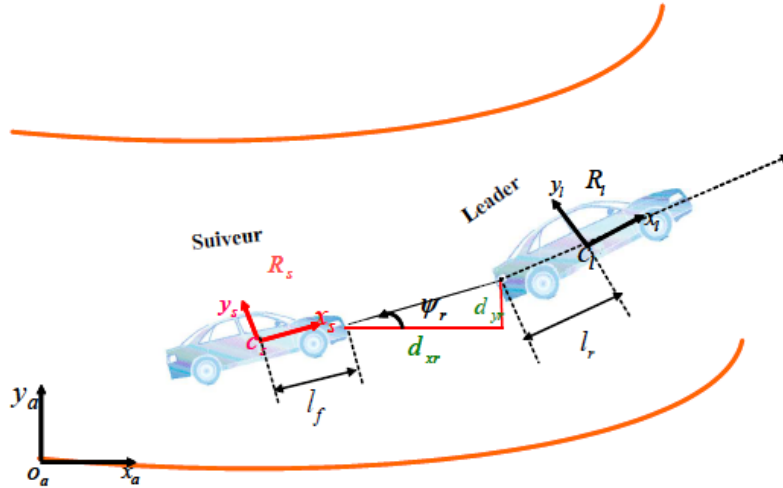
$\dot{s}(t) = \Phi(t) + \Omega(t)u(t)$, avec :

$$\begin{cases} \Phi(t) = -\frac{C_f + C_r}{mv_x} v_y - \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} \dot{\psi} - \frac{v_x^2}{R} + \lambda \dot{e} \\ \Omega(t) = \frac{C_f}{m} \delta \end{cases}$$

- Calculer la commande δ_{eq} équivalente en résolvant l'équation : $\dot{s} = 0$:
- En appliquant le théorème du super-twisting, et en approximant la fonction « sign(s) » par la fonction « tanh(s) » afin de réduire les oscillations, donner l'entrée de commande de l'angle de braquage final permettant d'assurer la convergence vers la surface de glissement $s = 0$ et d'y rester, donnée par $\delta = \delta_{dis} + \delta_{eq}$.
- Programmer ce contrôleur et vérifier sa capacité à stabiliser la dynamique du véhicule même en présence de perturbations.
- Evaluer l'impact de la variation de la vitesse longitudinale sur la qualité de suivi de trajectoire.

Partie III : Commande longitudinale pour le suivi de véhicule

Dans cette partie, nous nous intéresserons au contrôle longitudinal d'un véhicule pour le suivi de véhicule (système ACC). Chacun des véhicules leader et suiveur seront représentés par le modèle de la première partie. Les trois variables d'intérêt dans le suivi d'un véhicule sont l'erreur d'orientation, l'interdistance et l'écart latéral relatif (figure ci-dessous).



Positionnement relatif du véhicule suiveur par rapport au véhicule leader

L'angle du cap relatif ψ_r est défini comme étant la différence entre le cap du véhicule leader et ψ_l l'angle de cap du véhicule suiveur ψ_s . L'expression des variations du positionnement longitudinal et latéral (entre le véhicule leader et suiveur) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{d}_{xr} = -v_{x_l} + d_{yr}\dot{\psi}_l + v_{x_s} \cos \psi_r + (v_{y_s} + \dot{\psi}_s l_f) \sin \psi_r \\ \dot{d}_{yr} = -v_{y_l} + (l_r - d_{xr})\dot{\psi}_l - v_{x_s} \sin \psi_r + (v_{y_s} + \dot{\psi}_s l_f) \cos \psi_r \end{cases}$$

En dérivant encore une fois les expressions de l'équation précédente on lie facilement la dynamique des erreurs au modèle du véhicule développé dans la première partie.

$$\begin{cases} \ddot{d}_{xr} = a_0 + b_0 T_c + c_0 \delta_f \\ \ddot{d}_{yr} = a_1 + b_1 T_c + c_1 \delta_f \end{cases}$$

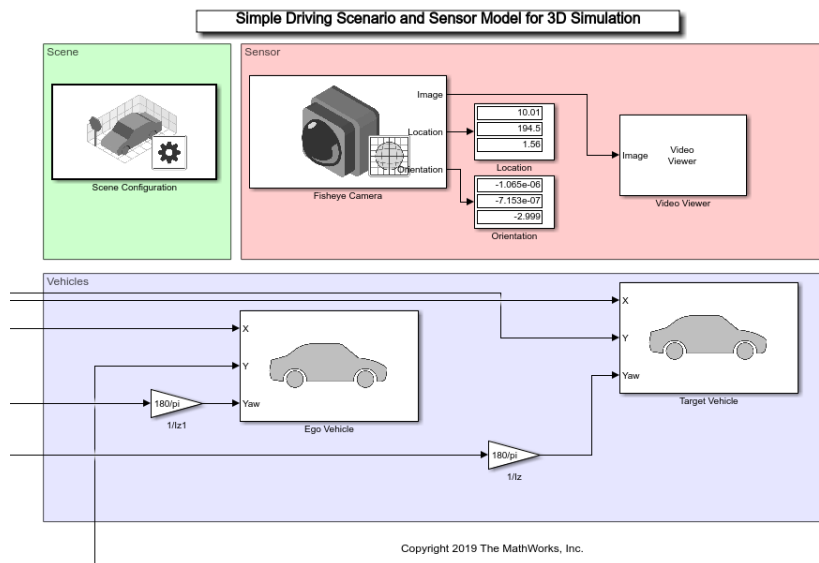
Avec :

$$\begin{cases} \dot{v}_x = f_0 + g_0 T_c \\ \dot{v}_y = f_1 + g_1 \delta \\ \ddot{\psi} = f_2 + g_2 \delta \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_0 = -\dot{v}_{x_l} + d_{yr}\ddot{\psi}_l + \dot{d}_{yr}\dot{\psi}_l + f_0 \cos \psi_r - v_{x_s} \sin \psi_r \dot{\psi}_r + (v_{ys} + l_f \dot{\psi}_s) \cos \psi_r \dot{\psi}_r + (f_1 + f_2 l_f) \sin \psi_r \\ b_0 = g_0 \cos \psi_r \\ c_0 = (g_1 + l_f g_2) \sin \psi_r \\ a_1 = -\dot{d}_{xr}\dot{\psi}_l + d_{xr}\ddot{\psi}_l - (\dot{v}_{y_l} - l_r \ddot{\psi}_l) - f_0 \sin \psi_r - (v_{ys} + l_f \dot{\psi}_s) \sin \psi_r \dot{\psi}_r + (f_1 + l_f f_2 - v_{x_s} \dot{\psi}_r) \cos \psi_r \\ b_1 = -g_0 \sin \psi_r \\ c_1 = (g_1 + l_f g_2) \cos \psi_r \\ f_0 = \frac{T_r}{I_{eff}} - \frac{C_x v_x^2}{m} + v_y \dot{\psi} \\ f_1 = \frac{-2C_f}{m} \left(\frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x} \right) - \frac{2C_r}{m} \left(\frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \right) - \frac{C_y v_y^2}{m} - v_x \dot{\psi} \\ f_2 = -\frac{2l_f C_f}{I_z} \left(\frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{v_x} \right) + \frac{2l_r C_r}{I_z} \left(\frac{v_y - l_r \dot{\psi}}{v_x} \right) \\ g_0 = \frac{1}{I_{eff}} \\ g_1 = \frac{2C_f}{m} \\ g_2 = \frac{2l_f C_f}{I_z} \end{cases}$$

Proposer un contrôleur permettant d'assurer le suivi de véhicule.

Afin de visualiser le résultat de suivi de véhicule, utiliser la toolbox « autonomous driving » avec les blocs « scene configuration » « sensor » et « vehicle » pour visualiser la réponse de l'ego véhicule et le véhicule cible (voir figure ci-dessous).



Le passage du repère lié au centre de gravité du véhicule vers le repère global lié à la route doit se faire en utilisant la matrice de transformation suivante :

```
function y=matrice(u)

Vxa=u(1)*cos(u(3))-u(2)*sin(u(3));
Vya=u(1)*sin(u(3))+u(2)*cos(u(3));

y=[Vxa,Vya];
```

Où $u(1)$ représente v_x , $u(2)$ est la vitesse latérale v_y et $u(3)$ est la vitesse de lacet $\dot{\psi}$.