

Dynamiques latérale et longitudinale découplées pour la commande d'un convoi urbain avec des distances inter-véhicules variables et minimisées

Alan ALI¹, Gaëtan GARCIA² and Philippe MARTINET³

Abstract— Les problèmes de congestion de trafic peuvent être considérablement améliorés par l'optimisation de la distance inter-véhicules. La conduite de véhicules automatisés en convoi, sur autoroute comme en milieu urbain, est une voie prometteuse car elle permet d'améliorer la sécurité des transports.

La commande d'un convoi en milieu urbain comprend une commande longitudinale et une commande latérale couplées. Les stratégies les plus répandues pour la commande longitudinale en convoi sont l'espacement variable et l'espacement constant. La stratégie d'espacement variable ne requiert pas beaucoup d'informations (position, vitesse...) en provenance des autres véhicules, et la stabilité du convoi peut être assurée en utilisant des capteurs embarqués simples, mais les distances inter véhicules peuvent devenir très grandes à vitesse élevée. La stratégie d'espacement constant entre les véhicules peut assurer la stabilité du convoi avec une densité de trafic élevée, mais elle requiert que chaque véhicule reçoive des informations, au minimum en provenance du leader.

Dans cet article, les modèles dynamique et cinématique du véhicule ne prenant pas en compte le glissement des roues, sont établis. La linéarisation exacte est utilisée pour découpler les dynamiques latérale et longitudinale. La stabilité et la précision de la commande sont vérifiées. La commande par modes glissants a été utilisée pour la commande latérale. Pour la commande longitudinale, une nouvelle loi a été proposée. Cette loi dérive de la stratégie d'espacement variable entre les véhicules. Elle minimise les distances entre véhicules, qui deviennent quasiment égales aux distances désirées (comme dans l'espacement constant). Elle permet d'augmenter la stabilité et la robustesse tout en évitant la saturation de couple de la commande, sans grand effet sur les distances entre véhicules. La communication entre les véhicules. La communication entre véhicules n'est pas lourde, et n'est pas critique non plus, car le convoi peut basculer en mode totalement autonome et stable en l'absence de toute communication.

Le logiciel Torcs est utilisé pour montrer l'efficacité de la modification proposée et son effet potentiel sur la densité du trafic.

I. INTRODUCTION

La densité du trafic, la pollution qui en découle et la sécurité des personnes deviennent des problèmes de plus en plus importants avec l'explosion du nombre de voitures. Le traitement de ces problèmes diffère selon qu'il s'agit de circulation autoroutière ou urbaine. En effet, sur autoroute, les vitesses sont plus élevées, les rayons de courbure plus

grands et le nombre d'obstacles plus faible qu'en zone urbaine.

Certaines des idées proposées pour le milieu urbain s'appuient sur un changement de l'infrastructure (voies spéciales, feux rouges automatiques...). D'autres utilisent des logiciels qui guident les conducteurs afin d'éviter la congestion. D'autres encore proposent des systèmes de transport alternatifs, qui cumulent certains avantages des transports public et privé, comme le covoiturage et l'autopartage. Dans l'autopartage, des véhicules sont distribués dans de nombreuses stations pour un usage public. Ces systèmes ont été développés dans le milieu des années 90, par exemple Liselec en France, CarLink aux Etats-Unis, Crayon au Japon. La distribution des voitures et le nombre limité de stations sont les principaux problèmes de cette approche.

L'utilisation de véhicules automatisés en convoi dans les zones urbaines est efficace pour transporter de nombreux passagers et pour reconduire les véhicules libres à la station de base. De plus, elle présente de nombreux avantages tels que l'augmentation de la densité et de la sécurité du trafic, la réduction de la consommation de carburant et la réduction de la fatigue du conducteur [17]. Citons le projet V2I du LASMEA, visant à contrôler de manière autonome de nombreux véhicules se déplaçant en convoi à faible vitesse pour des applications en milieu urbain, en utilisant le GPS cinématique [2] ou une caméra [1].

Pour commander un convoi, les dynamiques couplées latérale et longitudinale de chaque véhicule doivent être analysées. Le découplage des deux dynamiques est simple dans le cas d'une utilisation à basse vitesse [2], [4]. Lorsque la vitesse augmente, il est plus difficile de dissocier les deux dynamiques. Toutefois, dans les applications sur autoroute, la faible courbure permet de supposer que les deux dynamiques sont découplées. Il en découle que les lois de commande longitudinale et latérale sont établies de façon indépendante [23]. Pour les applications dans des zones urbaines, [5] a proposé un modèle latéral en supposant qu'il est suffisamment indépendant du modèle longitudinal. D'autres chercheurs ont construit des contrôleurs latéral et longitudinal de manière indépendante, et les paramètres du contrôleur latéral ont été calculés pour chaque vitesse, formant ainsi une table de correspondance [16], [12].

La complexité du modèle longitudinal du convoi augmente selon les interactions entre les véhicules. Ces interactions peuvent aider à assurer la sécurité et la stabilité, mais elles augmentent également la complexité de la commande

¹ A. ALI est à l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCYN), Ecole Centrale de Nantes (ECN), Nantes, France

² G. GARCIA est à l'Ecole Centrale de Nantes (ECN), Nantes, France

³ P. MARTINET est à l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCYN), Ecole Centrale de Nantes (ECN), Nantes, France

et exigent des communications entre véhicules. Dans [23], on trouve de nombreux modèles longitudinaux de convois, allant du convoi sans aucune communication jusqu'à des convois utilisant des services complets de communication entre tous les véhicules. Une autre approche consiste à considérer le convoi comme un ensemble d'agents, dont chacun répond à un modèle physique [7] ou à des comportements d'interaction entre animaux. Dans [8], l'interaction entre les véhicules est un ressort virtuel, alors que [28] et [30] utilisent un modèle ressort-amortisseur, et [11] des forces de Newton.

La commande peut être globale ou locale, selon les communications inter-véhicules. Une commande locale repose sur des données provenant des véhicules adjacents, tandis que la commande globale utilise des données en provenance, au minimum, du leader. En commande locale, chaque véhicule est totalement autonome et ne nécessite pas de capteurs sophistiqués. Elle peut être utilisée dans tous les environnements, mais les performances de suivi de trajectoire et de respect de l'inter-distance ne sont pas aussi bonnes. La commande globale au contraire est plus précise, mais elle requiert des capteurs plus sophistiqués, et parfois des adaptations d'infrastructure. Enfin, elle nécessite des systèmes de communication très fiables.

De plus, la commande globale peut être centralisée ou décentralisée. Dans le contrôle centralisé, les véhicules obtiennent leur commande à partir d'unités centrales. Ils ne sont donc pas autonomes et la communication est fondamentale: toute perte ou retard de communication est critique. Alors que dans un contrôle décentralisé, chaque véhicule reçoit des données provenant d'autres véhicules, mais calcule sa propre commande de manière autonome, de sorte que la communication est très importante, mais que sa perte n'est pas aussi critique que dans le cas centralisé.

La stabilité du convoi est appelée "string stability", et on trouve sa définition dans [23] et [15]. On dit que le convoi est stable si l'amplitude des erreurs n'augmente pas lors de la propagation d'un véhicule à son suiveur, et si les erreurs sont de même signe, pour éviter les collisions.

Les distances désirées entre véhicules diffèrent selon la stratégie de commande. Dans la commande globale, la distance désirée entre les véhicules est constante. Dans la commande locale, la distance est fonction de la vitesse du véhicule ou de sa dynamique. L'espacement variable ne nécessite pas beaucoup des données provenant d'autres véhicules, la stabilité du convoi peut être assurée en utilisant simplement des informations obtenues avec des capteurs embarqués [10], mais dans ce cas les distances entre les véhicules demeurent grandes, et par conséquent la densité du trafic n'est pas très élevée. L'espacement constant permet quant à lui, au prix de communications entre les véhicules, d'assurer la stabilité du convoi avec une densité de trafic très élevée.

Bien que l'espacement variable se traduise par de grandes distances d'espacement, les avantages qu'il présente par ailleurs ont poussé des chercheurs à tenter de réduire l'espacement pour rendre cette commande plus attractive. La commande qui garde une distance entre les véhicules propor-

tionnelle à la vitesse du véhicule est considérée comme une référence dans la stratégie d'espacement variable.

Dans la stratégie d'inter-distance proportionnelle à la vitesse, on trouve plusieurs manières de définir le coefficient de proportionnalité. Il peut être constant, comme dans la CTI (Constante de Temps Inter-vehicule, pour l'anglais CTH Constant Time Headway) qui est la méthode la plus simple et la plus courante [25], [20], [28], [23], tandis que d'autres utilisent un coefficient de proportionnalité variable, qui peut varier linéairement avec la vitesse ou la vitesse relative [32], ou avec la dynamique du véhicule et les conditions routières [9]...

Dans [23], il est prouvé que la stabilité du convoi diminue lorsque le coefficient de proportionnalité diminue. Par ailleurs, [24] montre que les couples de commande sont inversement proportionnels à ce coefficient. Cela peut conduire à des saturations de couple en cas de choix d'un coefficient faible. Il a été conclu que pour commander un convoi avec une faible inter-distance, il convient d'utiliser la stratégie de distance constante et d'avoir une communication entre les véhicules. À notre connaissance, toutes les recherches antérieures se sont concentrées sur l'optimisation du coefficient de proportionnalité pour un bon compromis entre la stabilité et la distance inter-véhicules.

Dans cet article, nous abordons les commandes latérale et longitudinale du convoi en milieu urbain. Un modèle dynamique est proposé pour le mouvement longitudinal, et un modèle cinématique pour le mouvement latéral. Dans le modèle longitudinal, toutes les forces extérieures appliquées au véhicule, ainsi que l'effet du mouvement latéral sont pris en compte. Dans le modèle latéral, la dynamique de direction est considérée en négligeant les glissements des roues (car les véhicules se déplacent sur des routes asphaltées, de bonne adhérence, et la vitesse maximale est de 50 km/h). Les deux dynamiques sont totalement découplées en utilisant la méthode de linéarisation exacte. La loi de commande longitudinale utilise la stratégie de distance proportionnelle à la vitesse, avec coefficient de proportionnalité constant, avec une modification qui rend la distance entre véhicules proportionnelle à la *vitesse relative du véhicule* au lieu d'être proportionnelle simplement à la vitesse. Cette nouvelle loi de commande est un mélange de commande décentralisée locale et de commande globale. La stabilité et la robustesse de cette loi de commande longitudinale pour le convoi est vérifiée. La loi de commande latérale utilise une commande par modes glissants afin d'assurer la stabilité.

Cet article est organisé comme suit: la section II présente les modèles du véhicule et du convoi. Les commandes latérale et longitudinale sont exposées dans la section III, la stabilité du convoi et la robustesse de la commande sont démontrées dans la section IV. La section V est consacrée aux résultats de simulation. Discussion et conclusion sont présentées sections VI et VII.

II. MODÉLISATION

A. Modèle cinématique du véhicule

On va utiliser le modèle classique d'Akerman [3]. Ce modèle ne prend pas en compte les glissements, et il considère le véhicule comme une bicyclette (figure 1). Ce modèle est généralement utilisé pour des véhicules légers se déplaçant à faible vitesse, car les véhicules lourds induisent une déformation de la roue en tournant, qui à son tour produit un glissement latéral. Cependant, un sol peu adhérent peut toujours engendrer des glissements latéral et longitudinal.

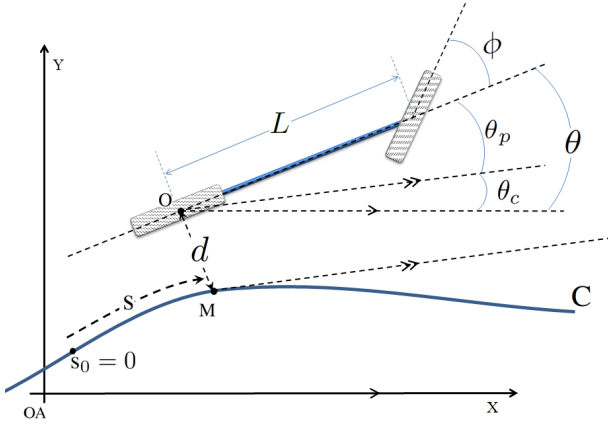


Fig. 1. Le modèle bicyclette

Sur ce schéma :

- $[OA, X, Y]$ est le repère absolu.
- C est la trajectoire de référence, définie dans le repère absolu.
- O est le centre de la roue arrière du véhicule.
- M est le point de la trajectoire C le plus proche de O .
- s est l'abscisse curviligne du point M , $cs = c(s)$ est la courbure de la trajectoire au point M et $\theta_{ac}(s)$ représente l'orientation de la tangente à la trajectoire, au même point, par rapport au repère absolu.
- θ est l'orientation du véhicule par rapport au repère $[OA, X, Y]$.
- $\theta_p = \theta - \theta_c(s)$ désigne la déviation angulaire du véhicule par rapport à la trajectoire C .
- d est la déviation latérale du véhicule par rapport à C .
- ϕ est l'angle de braquage, qui est l'angle entre la roue avant et l'axe du véhicule.
- L est l'empattement du véhicule.
- v_u est la vitesse longitudinale du véhicule.
- N est le nombre de véhicules dans le convoi.

Le modèle est donné par les formules suivantes:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \frac{\cos\theta_p}{1-d.cs} v_u \\ \dot{d} &= \sin\theta_p v_u \\ \dot{\theta}_p &= \left(\frac{\tan\phi}{L} - \frac{cs \cdot \cos\theta_p}{1-d.cs} \right) v_u \end{aligned} \quad (1)$$

Ce modèle a une singularité quand $d = \frac{1}{cs}$ (le véhicule est au centre du cercle osculateur de la trajectoire de référence en M). Dans la pratique il est facile d'éviter cette singularité si le véhicule a été bien initialisé.

Le modèle du système de direction est un système du premier ordre [21]:

$$\dot{\phi} = -\frac{1}{\tau_s} \phi + c_2 u_2$$

Où τ_s est la constante de temps de direction, c_2 le coefficient d'amplification et u_2 l'entrée de la commande de direction.

Par dérivation de $\dot{\theta}_p$, il vient :

$$\ddot{\theta}_{pi} = \alpha_{5i} \dot{\phi}_i + \alpha_{6i} v_{ui} + \alpha_{7i} \quad (2)$$

où :

$$\alpha_5 = \frac{v_u}{L \cos^2\theta_p}, \quad \alpha_6 = \frac{\tan\phi}{L} - \frac{cs \cos\theta_p}{1-d.cs}$$

$$\alpha_7 = -\left(\frac{\dot{cs} \cdot \cos\theta_p}{1-d.cs} - \frac{cs \cdot \sin\theta_p \dot{\theta}_p}{1-d.cs} \right)$$

$$+ \frac{cs \cdot \cos\theta_p}{(1-d.cs)^2} (\dot{d} \cdot cs + d \cdot \dot{cs}) v_u$$

avec la condition $\theta_p \neq \frac{\pi}{2} + \pi k, k = 1, 2, \dots$

B. Modèle dynamique du véhicule

Les modèles des véhicules à une et deux roues directrices sont donnés dans [6]. Nous utilisons le modèle à une roue directrice sans glissement (figure 2).

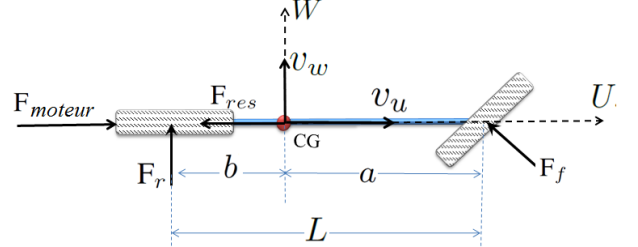


Fig. 2. Les forces appliquées

- CG : Centre de gravité du véhicule.
- $[CG, U, W]$: Repère du véhicule.
- v_w Vitesse du véhicule au point CG sur l'axe W .
- F_{moteur} : Force motrice appliquée à l'essieu arrière (première entrée du système u_1).
- F_g : Force gravitationnelle.
- F_{Aero} : Forces aérodynamiques.
- F_{drag} : Forces de résistance au roulement.
- d_m : Module des forces de résistance au roulement.
- g : Accélération de la pesanteur.
- ξ : Pente de la route.
- ρ : Masse spécifique de l'air.
- A : Section transversale du véhicule.
- C_d : Coefficient de traînée du véhicule.
- F_f, F_r : Forces latérales sur les pneus avant et arrière respectivement.

- $F_{res} = F_{drag} + F_{aero} + F_g$ est la somme des forces de résistance, de trainage aérodynamiques et de gravité.
- m : Masse du véhicule.
- J : Moment d'inertie du véhicule autour du centre de gravité.
- b : Distance entre le centre de la roue arrière et CG .
- a : Distance entre le centre de la roue avant et CG .

Les équations dynamiques suivantes sont tirées de [6], avec quelques modifications pour prendre en compte les forces aérodynamiques, de résistance et de gravitation représentées par F_{res} :

$$\begin{aligned}\dot{v}_u &= v_w \dot{\theta} - \frac{F_f \sin\phi}{m} + \frac{F_{motor} + F_{res}}{m} \\ \dot{v}_w &= -v_u \dot{\theta} - \frac{F_f \cos\phi}{m} + \frac{F_r}{m} \\ \ddot{\theta} &= \frac{a F_f \cos\phi}{J} - \frac{b F_r}{J}\end{aligned}\quad (3)$$

F_{res} est donnée par :

$$F_{res} = -m g \sin\xi - \frac{\rho A C_d}{2} \dot{v}_u^2 \operatorname{sgn}(\dot{v}_u) - d_m \quad (4)$$

Les contraintes non holonomes sont :

$$\begin{aligned}v_w &= \dot{\theta} b \\ \dot{\theta} &= \frac{\tan\phi}{L} v_u\end{aligned}\quad (5)$$

Les dérivées des contraintes sont :

$$\begin{aligned}\dot{v}_w &= \ddot{\theta} b \\ \ddot{\theta} &= \frac{\tan\phi}{L} \dot{v}_u + \frac{v_u}{L \cos^2\phi} \dot{\phi}\end{aligned}\quad (6)$$

Le développement de l'équation dynamique (3) avec les contraintes non holonomes (5) et leurs dérivées (6) donne l'équation dynamique avec l'effet du mouvement latéral.

$$\dot{v}_u = \alpha_1 \dot{\phi} + \alpha_2 (u_1 + F_{res}) \quad (7)$$

Où :

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= v_u \frac{(b^2 m + J) \tan\phi}{\beta}, \quad \alpha_2 = \frac{L^2 \cos^2\phi}{\beta} \\ \beta &= \cos^2\phi (L^2 m + (b^2 m + J) \tan^2\phi)\end{aligned}$$

Avec la condition $\phi_i \neq \frac{\pi}{2} + \pi k$, $k = 1, 2, \dots$. Cette condition est toujours satisfaite parce que l'angle maximum de braquage est toujours inférieur à $\frac{\pi}{2}$:

C. Modèle du convoi

Le convoi se compose de plusieurs véhicules qui se suivent. Le premier véhicule est le leader, qui peut être conduit manuellement ou automatiquement. Les autres véhicules se suivent, se déplaçant à la même vitesse et en gardant une distance désirée entre deux véhicules successifs, comme dans la figure (3). En supposant un modèle de type masse ponctuelle pour tous les véhicules, les paramètres curvilignes suivants sont définis :

- l_i : Distance curviligne désirée entre véhicules.
- s_i : Abscisse curviligne du véhicule i .
- \dot{s}_i : Vitesse linéaire du véhicule i .
- $es_i = s_{i-1} - s_i - l_i$: Erreur curviligne d'espacement entre le véhicule i et le véhicule $i-1$.

On verra dans la section sur la commande qu'on décomposera la dynamique du véhicule en deux dynamiques découplées. La loi de commande pour chaque dynamique sera représentée au moyen du modèle ressort-amortisseurs.

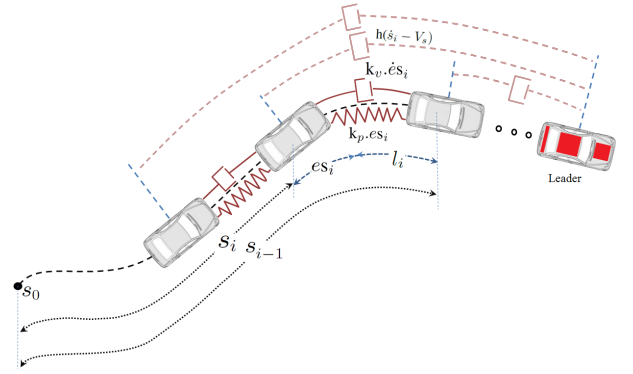


Fig. 3. Modèle longitudinal du convoi

Le modèle longitudinal indiqué sur la figure (3) se compose d'un ressort et deux amortisseurs. L'allongement du ressort dépend des distances curvilignes entre véhicules, et génère une force d'attraction lorsque la distance intervéhicules est plus grande que la distance désirée, et une force de répulsion si elle est plus petite. La force générée par le premier amortisseur (représenté en traits pleins) dépend de la différence de vitesse linéaire entre deux véhicules consécutifs. La force générée par le deuxième amortisseur (représenté en traits pointillés) dépend de la différence entre la vitesse linéaire du véhicule et une vitesse de référence (ex. la vitesse du leader du convoi). Cet amortisseur assurera la stabilité du convoi. Il est représenté en traits pointillés pour indiquer que la vitesse de référence est mise à jour à une fréquence plus faible que les autres variables.

En ce qui concerne le modèle latéral, il est représenté par deux amortisseurs et deux ressorts. L'allongement du premier ressort dépend de l'erreur angulaire θ_{pi} ; il agit comme un moment attractif vers zéro. Le moment généré par le premier amortisseur dépend de la dérivée de cette erreur ($\dot{\theta}_{pi}$). Finalement, l'action du deuxième ensemble ressort-amortisseur est fonction de l'erreur latérale d et de sa dérivée \dot{d} respectivement.

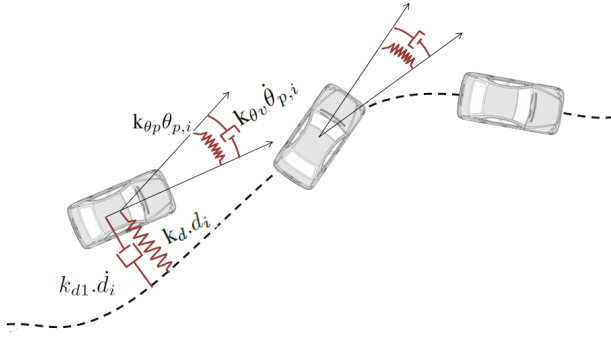


Fig. 4. Modèle latéral du convoi

III. COMMANDE

A. Les objectifs de la commande

Les objectifs principaux de la commande sont:

- 1) Garder la distance entre véhicules égale à l , et faire en sorte que tous les véhicules aient la même vitesse, donc que $\dot{e}s_i = 0$.
- 2) Suivre la trajectoire souhaitée en assurant $\theta_p = 0$ et $d = 0$ pour chaque véhicule.
- 3) Assurer la stabilité du convoi (les erreurs ne doivent pas croître quand elles se propagent le long du convoi).
- 4) Augmenter la densité du trafic.
- 5) Garder la stabilité même en cas de perte totale de la communication entre véhicules.
- 6) Garder la stabilité même s'il y a des retards d'actionnement et de capteurs.

B. Linéarisation exacte et découplage

Le modèle du véhicule i est le suivant :

$$\dot{X}_i = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{pi} \\ \dot{\theta}_{pi} \\ \dot{v}_{ui} \\ \dot{v}_{ui} \\ \dot{d}_i \end{pmatrix} = f(X_i) + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha_{2i} & \alpha_{1i}.c_2 \\ 0 & 0 \\ \alpha_{6i}.\alpha_{2i} & c_2(\alpha_{5i} + \alpha_{1i}.\alpha_{2i}) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{1i} \\ u_{2i} \end{pmatrix}$$

$$Y_i = \begin{pmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_i \\ \theta_{pi} \end{pmatrix}$$

Ce système peut être découplé en utilisant la linéarisation statique par retour d'état car il satisfait la condition suivante:

$$\text{rang} \frac{\partial(y_{1i}^{(r_1)}, y_{2i}^{(r_2)} \dots y_{pi}^{(r_p)})}{\partial(u_{1i}, u_{2i} \dots u_{mi})} = p$$

Où r_1, r_2 sont les degrés relatifs de y_{1i}, y_{2i} .

Dans notre cas, on a $p = 2, m = 2, r_1 = 2, r_2 = 2$. On peut linéariser le système en utilisant les nouvelles entrées w_{1i}, w_{2i} telles que :

$$y_{1i}^{(r_1)} = \dot{v}_{ui} = w_{1i}, \quad y_{2i}^{(r_2)} = \ddot{\theta}_{pi} = w_{2i}$$

Dont on peut déduire les entrées u_{1i}, u_{2i} .

Par changement de coordonnées, on obtient le système linéaire suivant:

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_{pi} \\ \dot{\theta}_{pi} \\ \dot{v}_{ui} \\ \dot{v}_{ui} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \\ \dot{Z}_3 \\ \dot{Z}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{1i} \\ w_{2i} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Il vient une partie non linéaire qui représente la dynamique interne:

$$\dot{Z}_5 = \dot{d}_i = \sin(Z_1).Z_3$$

La dynamique des zéros de ce système est stable.

C. Commande longitudinale

L'objectif principal de la commande longitudinale est de garder la distance curviligne entre véhicules égale à l , et d'imposer à tous les véhicules la même vitesse, c'est-à-dire obtenir la condition $\dot{e}s_i = 0$.

On prend une loi classique de commande longitudinale (CTI) et on applique notre proposition de modification, afin d'améliorer la réponse. La modification a été représentée par la flèche pointillée dans le diagramme bloc (5).

On propose une nouvelle définition pour l'erreur curvilinéaire d'espacement entre véhicules:

$$\delta_i = e s_i - h (\dot{s}_i - V_s) \quad (9)$$

Où V_s représente une vitesse partagée entre tous les véhicules (on verra plus tard comment on la choisit).

La loi de commande est:

$$w_{1i} = \frac{\dot{e}s_i + \lambda \delta_i}{h} \quad (10)$$

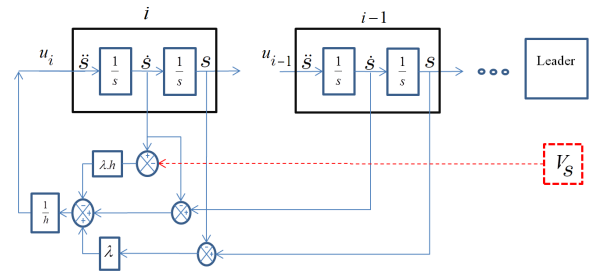


Fig. 5. Schéma de contrôle longitudinal

D. Commande latérale

L'objectif principal de la commande latérale est de faire suivre au véhicule la trajectoire souhaitée, en imposant que d_i et θ_{pi} convergent vers 0.

Le système latéral est:

$$X_i = \begin{pmatrix} d_i \\ \theta_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix}$$

La commande par modes glissants (donnant un système stable et robuste) utilise la surface de glissement suivante :

$$\psi = \dot{\theta}_{pi} + k_{\theta p} \theta_{pi} + k_d di \quad (11)$$

$k_{\theta p}, k_d$ coefficients de pondération.

Le contrôleur doit imposer au système de satisfaire l'équation suivante :

$$\dot{\psi} = -K \psi \quad (12)$$

K est une constante positive.

A partir des équations (12), (11) et (8), on obtient la commande suivante:

$$w_{2i} = -K \psi - k_{\theta p} \dot{\theta}_{pi} - k_d \dot{d}_i \quad (13)$$

qui donne un système stable.

IV. STABILITE ET ROBUSTESSE

A. Stabilité longitudinale du convoi

Rappelons que la stabilité longitudinale du convoi signifie que les erreurs ne doivent pas croître quand elles se propagent le long du convoi [15]:

$$\|es_i\|_{\infty} \leq \|es_{i-1}\|_{\infty} \quad (14)$$

Pour vérifier cette condition, on définit la fonction de propagation de l'erreur d'inter-distance $G_i(p) = \frac{es_i(p)}{es_{i-1}(p)}$.

Une condition suffisante pour la stabilité du convoi est:

$$\|G_i(p)\|_{\infty} \leq 1 \quad \text{et} \quad g_i(t) > 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

Où $g_i(t)$ est la réponse impulsionnelle de propagation de l'erreur de distance entre le véhicule $i - 1$ et le véhicule i .

Dans notre cas, la fonction de transfert de l'erreur d'espacement $G_i(p)$ est:

$$G_i(p) = \frac{es_i(p)}{es_{i-1}(p)} = \frac{p + \lambda}{h p^2 + (1 + \lambda h) p + \lambda} \quad (16)$$

Par le calcul, on peut montrer que:

$$|G_i(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{h^2 \omega^2 + 1}} \leq 1, \quad g_i(t) = \frac{e^{-\frac{t}{h}}}{h} > 0 \quad (17)$$

Donc le convoi est stable puisque les erreurs d'espacement, pour toutes les fréquences, diminuent quand elles se propagent le long du convoi. Il est clair que la stabilité du convoi est indépendante de V_s , et que la seule condition sur V_s est d'avoir la même valeur pour tous les véhicules au même échantillon. Donc, on peut choisir n'importe quelle valeur pour V_s : ce peut être la vitesse du leader, la vitesse moyenne du convoi, la vitesse minimale...

B. Robustesse de la commande vis-à-vis des erreurs de modélisation du moteur et des retards de détection

En général, les modèles proposés pour les moteurs sont des approximations de la réalité. Les dynamiques qui ne sont pas prises en compte dans le modèle sont en général représentées par un retard dans la réponse des actionneurs. De plus, le filtrage des données des capteurs peut aussi engendrer un retard additionnel. Il faut donc étudier la stabilité de notre commande en présence d'un retard pour vérifier sa robustesse. Les retards des actionneurs et de filtrage peuvent être exprimés comme suit [25]:

$$\ddot{x}_i = u_{ci}$$

$$\tau \dot{u}_{ci} + u_{ci} = u_i \quad (18)$$

où : τ représente le retard, u_{ci} est l'accélération du i^e véhicule et u_i l'entrée de commande.

On obtient une nouvelle fonction de transfert de l'erreur d'espacement:

$$H_p(p) = \frac{es_i(p)}{es_{i-1}(p)}$$

$$H_p(p) = \frac{p + \lambda}{\tau h p^3 + h p^2 + (1 + \lambda h) p + \lambda} \quad (19)$$

On a utilisé l'indice p dans H_p pour indiquer qu'il représente la fonction de transfert de l'erreur d'espacement du système avec retards.

La condition de stabilité dans ce cas est $|H_p(j.\omega)| \leq 1$ pour tout ω . Donc on obtient :

$$\omega^2 + \lambda^2 \leq (\lambda - h \omega^2)^2 + (1 + \lambda h - \tau h \omega^2)^2 \omega^2$$

Qui est équivalent à :

$$\tau^2 h^2 \omega^4 + (h^2 - 2 \tau h (1 + \lambda h)) \omega^2 + \lambda^2 h^2 \geq 0$$

Ces conditions sont satisfaites si et seulement si les coefficients de ω^2 sont positifs ou le discriminant est négatif. Une condition suffisante qui satisfait les deux conditions :

$$\tau \leq \frac{h}{2} \quad (20)$$

C. Supervision de V_s

On a vu que la condition unique sur V_s pour garder la stabilité du convoi est d'avoir la même valeur pour tous les véhicules dans le même échantillon, et qu'on peut par conséquent utiliser n'importe quel vitesse pour V_s (vitesse du leader, vitesse minimale du convoi, vitesse moyenne ...).

Pour augmenter la sécurité et éviter les collisions, on peut choisir $V_s = \min(v_{Leader}, v_1, v_2, \dots, v_N)$, dans ce cas $h.(v_i - V_s)$ est toujours positive et donc $\Delta X_i = L + h(v_i - V_s) > L$ ce qui peut augmenter la distance entre véhicules pendant les phases transitoires, mais augmente la sécurité.

V_s est mis à jour à une fréquence faible, donc les valeurs de V_s peuvent varier de manière sensible lors des mises à jour, ce qui peut avoir un effet négatif sur la commande. Dans un tel cas, on peut interpoler les valeurs de V_s pour éviter les changements rapides.

V. SIMULATIONS

On a utilisé Matlab et TORCS pour les simulations. TORCS (The Open Racing Car Simulator [14]) est un jeu et un simulateur avancé utilisé dans les milieux académiques. Il a un moteur physique sophistiqué (aérodynamique, traction, consommation de carburant...), et possède en outre un moteur 3D pour la visualisation (figure 6).



Fig. 6. TORCS

La simulation dans Torcs a été faite en utilisant une trajectoire courbe (figure 7) pour vérifier la stabilité des commandes latérale et longitudinale. On a simulé un convoi de 10 véhicules identiques. La trajectoire consiste en quatre tronçons. Le premier tronçon est une partie quasiment droite (A) ; dans cette partie on vérifie la stabilité de la commande longitudinale en changeant la vitesse de 10 km/h à 50 km/h. Puis le convoi passe le deuxième tronçon, qui est courbe (B) avec une vitesse constante pour vérifier la stabilité de la commande latérale. Dans les tronçons C et D on va vérifier la stabilité des deux commandes ensemble. On diminue la vitesse du convoi de 50 km/h à 25 km/h dans le tronçon C, puis on augmente la vitesse à 60 km/h quand le convoi arrive au virage au début du tronçon D.

Nous allons d'abord comparer notre commande longitudinale avec la commande classique (CTI). La figure (8) représente la distance entre véhicules en utilisant la commande CTI et la figure (9) représente la distance entre véhicules en utilisant notre commande avec les mêmes paramètres utilisés pour CTI. On constate que les distances entre véhicules en utilisant notre commande sont plus faibles que les distances obtenues avec la commande CTI. Ces distances deviennent égales à la distance désirée dans l'état stationnaire, et proportionnelles à la différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse partagée pendant la phase transitoire. On peut voir aussi que le système devient plus rapide.

Dans un second temps, on va vérifier la stabilité du convoi et l'efficacité du découplage des deux commandes. On peut voir figure (9) que, dans le tronçon A, le convoi est stable,

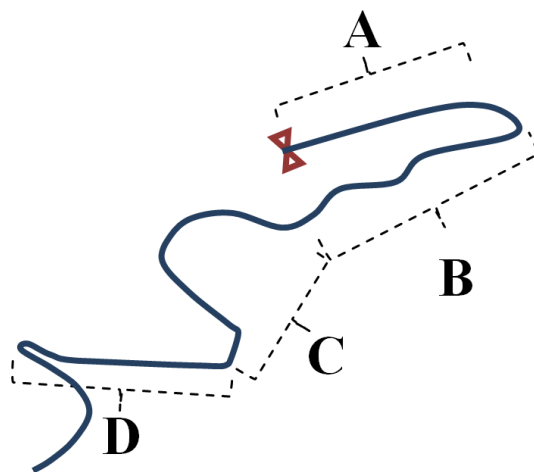


Fig. 7. La trajectoire

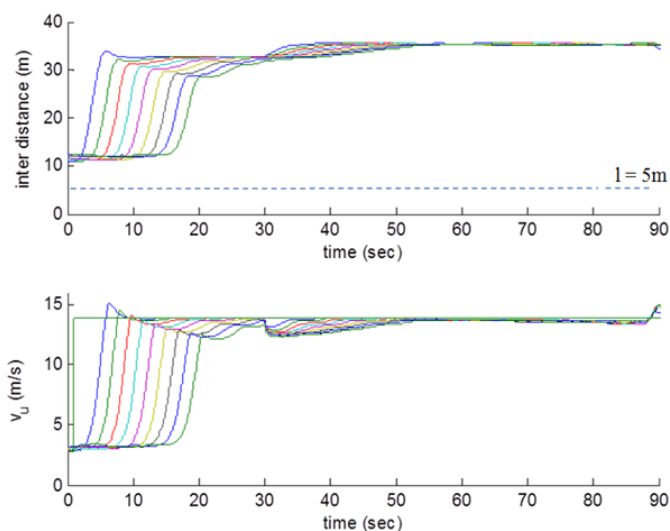


Fig. 8. Les distances entre les véhicules et leurs vitesses en utilisant CTI

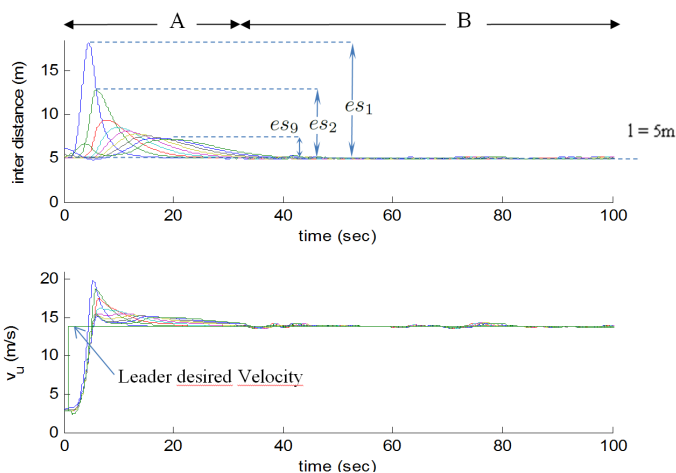


Fig. 9. Les distances entre les véhicules et leurs vitesses (tronçons A et B)

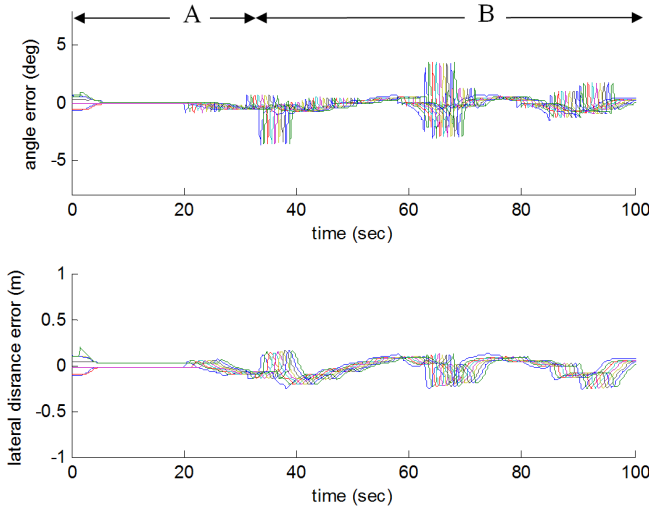


Fig. 10. Les erreurs latérales, angles et distances (tronçons A et B)

car l'erreur d'espacement diminue quand elle se propage le long du convoi. De plus, on constate que la distance entre les véhicules pendant l'état stationnaire est égale à la distance désirée l .

Dans la figure (10), tronçon B, on peut voir que la commande latérale est stable (les erreurs latérales tendent vers zéro), et que les valeurs maximales de l'erreur angulaire sont inférieures à 3 deg, et à 25 cm pour l'écart latéral. On peut voir aussi figure (9), tronçon B, que la commande latérale a un faible effet sur l'espacement entre les véhicules (commande longitudinale).

Finalement, on examine les deux commandes ensemble dans les tronçons C et D, où on diminue la vitesse du convoi pendant le tronçon C, puis on change la vitesse du convoi alors que celui-ci arrive dans le virage du tronçon D. Figure (11), on constate que le convoi est stable longitudinalement, alors que la figure (12) indique clairement qu'il est stable latéralement.

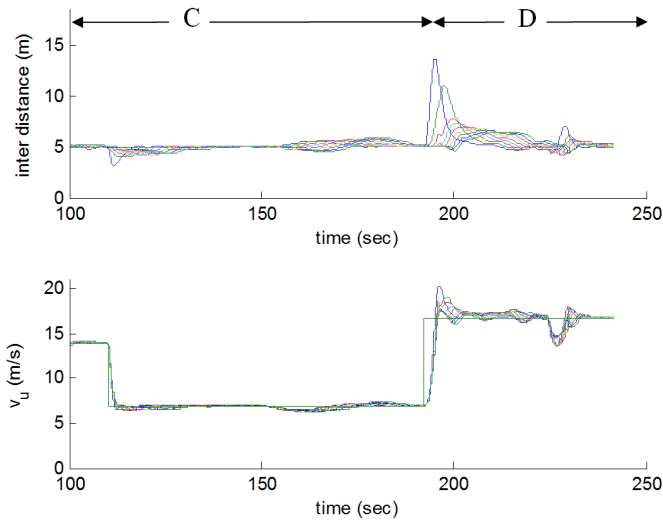


Fig. 11. Les distances entre les véhicules et leurs vitesses (tronçon D).

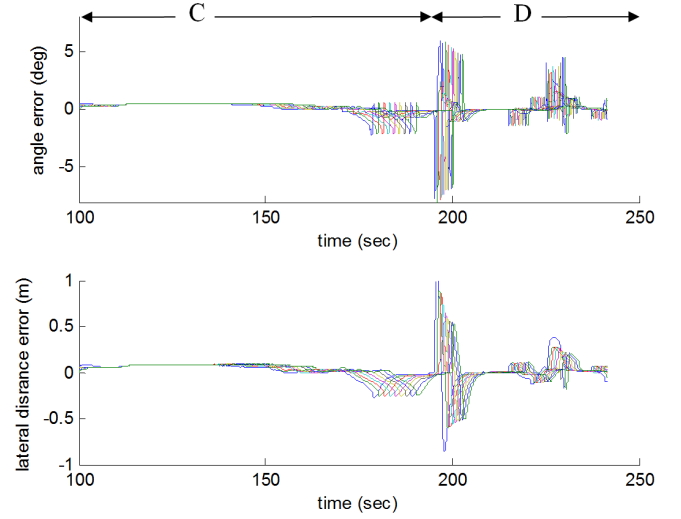


Fig. 12. Les erreurs latérales, angles et distances (tronçon D).

VI. DISCUSSION

La nouvelle loi de la commande réduit les distances entre les véhicules en conservant la stabilité du convoi. La nouvelle loi utilise une distance proportionnelle à la différence entre la vitesse du véhicule et une vitesse partagée par tous les véhicules du convoi, au lieu d'être proportionnelle à la vitesse du véhicule comme dans la commande CTI.

A. Avantages et comparaison

La nouvelle loi de la commande présente de nombreux avantages par rapport à la commande CTI et à la stratégie de distance constante entre véhicules sur les points suivants :

Stabilité du convoi: Dans l'équation (16) on a vu que la fonction de propagation de l'erreur n'est pas une fonction de la vitesse partagée V_s , donc V_s n'a pas d'effet sur la stabilité. De plus, on montre que la fonction de transfert $G(s)$ est égale à la fonction de transfert de l'erreur de la loi CTI [25], [28], donc les deux lois présentent les mêmes caractéristiques de stabilité pour des paramètres identiques, mais avec des distances entre véhicules plus faibles en utilisant notre loi.

Distances entre les véhicules: Dans la loi CTI, la distance entre les véhicules est proportionnelle à la vitesse du véhicule et égale à $\Delta X_i = l + h v_i$. Ces distances peuvent être très grandes à vitesse élevée [25], [13]. Mais dans notre loi la distance devient proportionnelle à la différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse partagée $\Delta X_i = l + h (v_i - V_s)$. Dans l'état stationnaire, on a $v_i = v_L$ donc $X_{i-1} - X_i = l + h (v_L - V_s)$ et la distance entre les véhicules devient égale à l . On peut par exemple choisir $V_s = v_L$.

Collisions: Le risque de collision augmente quand la distance entre véhicules diminue. Dans cet article, on a étudié le problème de la stabilité, et on a diminué les inter-distances tout en assurant la stabilité du convoi, sans discuter la sécurité et les collisions. Le risque de collision peut être étudié et pris en compte en ajoutant un terme nouveau qui assure la sécurité.

Communication: L'utilisation de V_s dans la nouvelle loi implique une communication entre les véhicules. Mais il n'est pas important de mettre à jour la valeur de V_s à chaque échantillon, et il est suffisant de la mettre à jour à une fréquence plus faible, ce qui limite les besoins de communication.

Stabilité sans communication: Dans notre loi, la stabilité du convoi reste assurée même si la communication a été totalement perdue. On peut garder la stabilité en faisant $V_s = 0$ au moment de la perte de communication. Dans ce cas, les véhicules deviennent totalement autonomes, et il n'est pas important de communiquer avec le leader. Au contraire, il a été prouvé dans [22] que, pour un loi de commande qui garde une distance constante entre les véhicules dans un convoi homogène avec une commande homogène (mêmes paramètres pour tous les véhicules), il n'est pas possible d'obtenir un convoi stable sans communication au moins avec le leader.

La décision de basculer en mode autonome est envoyée par le leader vers tous les véhicules qui ont une communication fonctionnelle, au moment où le leader détecte une perte de communication avec l'un des véhicules. Pour les autres véhicules, qui perdent la communication avec le leader, ils doivent basculer automatiquement en mode autonome.

Robustesse: On a vu dans l'équation (20), la condition de stabilité en présence de retard, qui indique qu'il est préférable d'augmenter h pour assurer la stabilité. Dans la loi CTI, cette augmentation de h a un effet négatif sur la distance entre les véhicules. Mais dans notre loi, l'augmentation de h a une faible incidence sur la distance. De leur côté, les commandes les plus simples correspondant à la stratégie de distance constante entre véhicules ne sont pas toujours robustes vis-à-vis d'un retard, ou parfois seulement robustes à de faibles retards ([23]).

Saturation du couple de commande: [25] a prouvé que le couple de commande est inversement proportionnel à h . Dans la loi CTI, on ne peut pas augmenter h parce que la distance entre véhicules augmente, mais dans notre loi on peut augmenter h avec une faible incidence sur la distance entre véhicules, et en conséquence éviter la saturation.

Simplicité de la commande et des informations utilisées: La nouvelle loi de commande est du même niveau de complexité que la loi CTI. Elle utilise les mêmes paramètres que CTI, auxquels s'ajoute la vitesse partagée, mise à jour à une fréquence faible. Les stratégies de distance constante sont, elles, plus complexes et utilisent des informations plus difficiles à obtenir (accélération), au moins en provenance du leader.

VII. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons abordé la commande des convois en milieu urbain. Un modèle dynamique longitudinal et un modèle cinématique latéral sont utilisés. On a découplé et linéarisé les deux dynamiques, et on a vérifié l'efficacité du découplage. La dynamique latérale est contrôlée par une commande par modes glissants qui a permis d'obtenir de bonnes performances.

La dynamique longitudinale est contrôlée en utilisant une loi de commande CTI modifiée. Cette nouvelle commande présente des avantages qu'on peut résumer comme suit: elle diminue la distance inter-véhicules, distance qui peut devenir très grande avec la loi CTI classique et en constitue l'inconvénient principal. La nouvelle loi permet également d'augmenter la stabilité et la robustesse de la commande, et permet d'éviter la saturation du couple. Tous ces avantages sont obtenus sans la nécessité de communications à haut débit entre les véhicules. De plus, le convoi peut être stable même si la communication entre les véhicules est totalement perdue. Cette modification facilite le transfert de la politique CTI de la recherche vers des applications réelles, car les distances inter véhicules deviennent presque égales à celles observées dans la stratégie d'espacement constant.

REFERENCES

- [1] Avanzini, P., Thuilot, B., and Martinet, P. Accurate platoon control of urban vehicles, based solely on monocular vision. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE/RSJ International Conference, pages 6077-6082, 2010.
- [2] Bom, J., Thuilot, B., Marmouton, F., and Martinet, P. Nonlinear control for urban vehicles platooning, relying upon a unique kinematic gps. In *Robotics and Automation. ICRA. Proceedings of IEEE International Conference*, pages 4138- 4143, 2005.
- [3] Canudas de Wit, C., Siciliano, B., Bastin, G., *Theory of Robot Control, Series: Communications and Control Engineering*, 1st ed. 392p, 1996.
- [4] Courbon, J., Mezouar, Y., Martinet, P., Autonomous Navigation of Vehicles from a Visual Memory Using a Generic Camera Model, *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Transactions, vol.10, no.3, pp.392,402, Sept. 2009.
- [5] Daviet, P., Parent, M. Longitudinal and lateral servoing of vehicles in a platoon, *Intelligent Vehicles Symposium*, Proceedings of the 1996 IEEE, pp.41,46, 19-20 Sep. 1996.
- [6] DeSantis, R.M. Path-tracking for car-like robots with single and double steering, *Vehicular Technology*, IEEE Transactions, vol.44, no.2, pp.366,377, May 1995.
- [7] Franck, G., Vincent, C., and Francois, C. A reactive multi-agent system for localization and tracking in mobile robotics. In *Tools with Artificial Intelligence*, 2004. ICTAI 2004. 16th IEEE International Conference, pages 431 - 435, 2004.
- [8] Gehrig, S. and Stein, F. Elastic bands to enhance vehicle following. In *Intelligent Transportation Systems*, 2001. Proceedings. 2001 IEEE, pages 597 -602, 2001.
- [9] Huppe, X., de Lafontaine, J., Beauregard, M., and Michaud, F. Guidance and control of a platoon of vehicles adapted to changing environment conditions. In *Systems, Man and Cybernetics*. IEEE International Conference, volume 4, pages 3091 - 3096 vol.4, 2003.
- [10] Ioannou, P. and Chien, C. Autonomous intelligent cruise control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4):657 -672, 1993.
- [11] Khatir, M. and Davison, E. Decentralized control of a large platoon of vehicles using non-identical controllers. In *American Control Conference*, Conference Proceedings, vol.3, pages 2769 -2776, 2004.
- [12] Lee, G. D., Kim, S.W., Yim, Y. U., Jung, J. H., Oh, S.Y., Kim, B. S. Longitudinal and lateral control system development for a platoon of vehicles, *Intelligent Transportation Systems*, Proceedings. IEEE/IEEJ/JSAI International Conference, pp.605,610, 1999.
- [13] Xiao, L. and Gao, F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4):1184 -1194, 2011.
- [14] Onieva, E., Pelta, D., Alonso, J., Milanés, V., and Perez, J. A modular parametric architecture for the torcs racing engine. In *Computational Intelligence and Games CIG*, IEEE Symposium, pages 256 -262, 2009.
- [15] Rajamani, R. *Vehicle dynamics and control*. Springer Science, 1 edition, 2006.
- [16] Rajamani, R., Han-Shue Tan, Boon Kait Law, Wei-Bin Zhang, Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons, *Control Systems Technology*, IEEE Transactions, vol.8, no.4, pp.695,708, Jul 2000

- [17] Ricardo. Cars that drive themselves can become reality within ten years. <http://www.ricardo.com/en-GB/News-Media/Press-releases/News-releases1/2009/Cars-that-drive-themselves-can-become-reality-within-ten-years/>, 2009.
- [18] Shladover, S.E., Desoer, C.A., Hedrick, J.K., Tomizuka, M., Walrand, J., Wei-Bin Zhang, McMahon, D.H., Peng, Hui, Sheikholeslam, S., McKeown, N. Automated vehicle control developments in the PATH program, *Vehicular Technology, IEEE Transactions*, vol.40, no.1, pp.114,130, Feb. 1991.
- [19] Sheikholeslam, Shahab; Desoer, C. A. Longitudinal control of a platoon of vehicles. ii, first and second order time derivatives of distance deviations. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 1989.
- [20] Sheikholeslam, S. and Desoer, C. A. Longitudinal control of a platoon of vehicles i: Linear model. Technical Report UCB/ERL M89/106, EECS Department, University of California, Berkeley, 1989.
- [21] Sheikholeslam, S., Desoer, C.A., Combined Longitudinal and Lateral Control of a Platoon of Vehicles, *American Control Conference*, pp.1763,1767, 24-26 June. 1992.
- [22] Seiler, P., Pant, A., and Hedrick, K. Disturbance propagation in vehicle strings. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(10):1835 – 1842, 2004.
- [23] Swaroop, D. String stability of interconnected systems: An application to platooning in automated highway systems. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 1997.
- [24] Swaroop, D., Hedrick, J., Chien, c., and Ioannou, P. A comparison of spacing and headway control laws for automatically controlled vehicles I. *Vehicle System Dynamics*, 23(1):597-625, 1994.
- [25] Swaroop, D. and Rajagopal, K. A review of constant time headway policy for automatic vehicle following. In *Intelligent Transportation Systems. Proceedings IEEE*, pages 65 -69, 2001.
- [26] Woods, A. N. R. L. A new approach to effective and sustainable urban transport. *Transportation Research Board*, pages 42-49, 2003.
- [27] Xiao, L. and Gao, F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions*, 12(4):1184 -1194, 2011.
- [28] Yanakiev, D. and Kanellakopoulos, I. Variable time headway for string stability of automated heavy-duty vehicles. In *Proc. 34th IEEE CDC*, pages 4077-4081, 1996.
- [29] Yanakiev, D. and Kanellakopoulos, I. A simplified framework for string stability analysis in ahs. In *Proceedings Of The 13th IFAC World Congress*, pages 177-182, 1996.
- [30] Yi, S.-Y. and Chong, K.-T. Impedance control for a vehicle platoon system. *Mechatronics*, 15(5):627 -638, 2005.
- [31] Lenain, R., Thuilot, B., Hach, Oliver, Martinet, P., High-speed mobile robot control in off-road conditions: A multi-model based adaptive approach, *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference, pp.6143,6149, 9-13 May, 2011.
- [32] Yanakiev, D., Kanellakopoulos, I. Variable Time Headway for String Stability of Automated Heavy-Duty Vehicles, *Proc. 34th IEEE CDC* 1995,4077-4081, 1995.