

Méthodes de l'automatique pour l'assistance et l'automatisation de la conduite automobile

S. Mammam^{1,3} P. Martinet² S. Glaser³ M. Netto³ L. Nouvelière¹ B. Thuilot²

¹ LSC, CNRS-FRE 2494

² LASMEA

³ LIVIC, LCPC-INRETS

¹ Université d'Évry val d'Essonne

40 rue du Pelvoux CE1455, 91025, Evry, Cedex, France. mammam@iup.univ-evry.fr

Résumé

Cet article a pour but de donner un aperçu des recherches et développement autour de l'automatique pour l'automobile. Après un état des lieux des programmes de recherche au niveau mondial et des fonctions répandues sur les véhicules, le propos se concentre sur les recherches au niveau national. Deux volets sont particulièrement développés. Un premier volet sera consacré à la revue des méthodes de commande robuste appliquées au développement d'assistance au contrôle latéral et longitudinal des véhicules. Différents modes de partage des actions permettent une bonne gestion des interactions avec le conducteur. Le deuxième volet portera sur l'automatisation complète de la conduite en mode autonome ou en peloton.

Mots Clef

Assistance à la conduite, Automatisation, Contrôle longitudinal, Contrôle latéral, Indicateur de risque.

1 Introduction

L'automatique est omniprésente dans les véhicules d'aujourd'hui même si ce terme n'apparaît pas toujours de manière explicite et que l'on parle plus souvent de fonctions électroniques. Ces fonctions ont investi aussi bien les systèmes qui assurent le bon fonctionnement du véhicule et son intégrité que les systèmes de confort et sont en passe d'atteindre 30% de la valeur d'une voiture.

A ce titre, les systèmes de contrôle du châssis ont fait une avancée significative ces vingt dernières années. Ils assurent de manière efficace la tenue de route, la stabilité, la manœuvrabilité et le freinage du véhicule. Les systèmes ABS sont maintenant obligatoires pour tout nouveau véhicule en Europe, les systèmes ESP se démocratisent et un pourcentage grandissant de véhicules en est équipé. D'autres systèmes encore trop onéreux tels que les barres d'anti-roulis pilotées, la direction active ou les suspensions pilotées ont démontré leur efficacité, mais sont réservés aux véhicules des gammes supérieures.

Enrichis de moyens de perception de l'environnement, de localisation ou de communication, l'utilisation des organes

de contrôle actuels peut être élargie à des applications d'assistance active au conducteur non seulement en situation limite, mais aussi en prévention d'un danger grâce à une perception anticipée de celui-ci. La fiabilité des moyens de perception et de commande ainsi que l'introduction de la coopération entre l'infrastructure et les véhicules, permettrait de voir évoluer l'aide apportée au conducteur vers l'automatisation de certaines tâches de conduite, voir même de l'intégralité du processus de conduite. On s'oriente donc vers la définition d'une entité en charge de la conduite qui reçoit les informations à la fois des capteurs véhicule, du conducteur et de l'infrastructure et qui aurait pour but de réaliser l'évolution en sécurité du véhicule.

Cet article est organisé de la manière suivante : les sections 2 et 3 donnent un panorama des systèmes commerciaux existants et des projets de recherche sur le domaine. La section 4 considère l'application d'assistance à la conduite sous ses deux aspects de contrôle latéral et longitudinal. Enfin dans la section 5, on examine, sous différents aspects, le problème de l'automatisation de la conduite d'un véhicule autonome et de la conduite en file associant contrôle longitudinal et contrôle latéral.

L'essentiel des résultats présentés dans cet article ont été obtenus par plusieurs équipes de recherche dans le cadre des projets PREDIT et CNRS. Pour la partie assistance à la conduite on retrouve : le LIVIC, le LSC, le LASMEA, SUPELEC, le LAG, l'UTC et l'INRIA. Pour la partie conduite automatisée, le LASMEA, l'IRISA, et l'INRIA-Sophia-Antipolis.

2 L'automatique et l'automobile

Les systèmes électroniques ont révolutionné les véhicules d'aujourd'hui. L'équipement de sécurité et de confort est devenu un argument de vente fort pour l'ensemble des gammes. Ainsi des véhicules vendus à moins de 10K€ sont équipés d'ABS avec répartiteur électronique de freinage, de l'aide au freinage d'urgence avec allumage automatique des feux de détresse, d'ordinateur de bord et de climatisation automatique. Ces systèmes mis en avant par les constructeurs ne doivent pas non plus faire oublier toute l'automatique enfouie qui a en charge la gestion de

la combustion, du moteur, de l'échappement et de la transmission. Les systèmes de régulation de vitesse ou d'aide à la stabilité latérale (ESP, ASR,...) se démocratisent rapidement alors que d'autres systèmes restent l'apanage de modèles hauts de gammes ou d'une catégorie restreinte de véhicules. A ce titre, nous pouvons citer :

- La répartition des forces motrices (4WD)
- Le contrôle des efforts verticaux, par le pilotage des suspensions ou des barres d'anti-roulis (SAS)
- Le contrôle actif du braquage des roues avant (AFS) ou les quatre roues directrices (4WS)

Un véhicule haut de gamme dispose aujourd'hui d'une quarantaine de capteurs, une centaine de moteurs électriques, et une soixantaine d'unités de contrôle. Le coût total de ces systèmes mécatroniques représente 25% du prix total d'un véhicule.

L'ensemble de ces dispositifs est tiré par la généralisation des technologies "X-by-wire" qui consistent à remplacer les commandes électromécaniques par des commandes purement électriques.

Le développement de la localisation et de la cartographie numérique permet de disposer de systèmes de contrôle de navigation intelligents. Ils associent à la navigation classique des dispositifs qui alertent le conducteur ou limitent automatiquement la vitesse selon la signalisation embarquée.

A l'opposé, des systèmes actifs associant perception de l'environnement peinent à sortir à cause du manque de fiabilité, de performance et de disponibilité des capteurs. A titre d'exemple, le régulateur de vitesse et d'interdistance est annoncé depuis plus d'une décennie, certains modèles de véhicules peuvent en être équipés, mais le domaine d'exploitation en terme de vitesse et de décélération en réduit l'usage à un système de confort en environnement autoroutier. Dans le même esprit, des systèmes de maintien de voie à base de capteur vidéo sont actuellement sur le marché au Japon.

L'enjeu de la recherche est donc le développement de fonction d'assistance active ayant une réelle incidence sur l'amélioration de la sécurité. On voit alors que la fiabilité des systèmes de perception et de commande en est un élément essentiel. A ce prix, il sera même possible d'envisager l'automatisation de tâches de la conduite.

3 Les recherches dans le monde

Durant les années 90, la recherche aux États-unis était centrée sur l'automatisation de la conduite avec un objectif annoncé d'amélioration des performances des réseaux. Ceci s'est traduit en l'occurrence par l'émergence de la conduite automatisée en file de véhicules communicants. Les laboratoires des universités de Californie (Berkeley, Stanford, Santa Barbara) et Carnegie Mellon sont les plus actifs dans ce domaine. Depuis, les projets de route automatisée ont été mis en veille, les recherches se sont recentrées sur la sécurité avec le projet IVI et des applications plus ciblées comme le guidage des chasse-neige [4]. Les situations critiques abordées sont

- La prévention des accidents consécutifs aux changements de voie.
- La prévention des collisions aux intersections.
- La prévention des sorties de route.
- La détection de la baisse de vigilance.

Les recherches sur les transports intelligents au Japon font l'objet d'une coordination forte entre cinq ministères (construction, industrie, transport, intérieur et télécommunications) et d'associations de constructeurs (JARI) et de partenaires du secteur privé (AHSRA). Le projet ASV s'emploie à la sécurisation de 7 situations de conduites jugées les plus accidentogènes. Par ailleurs des services reposant sur d'importants équipements de l'infrastructure sont développés, le but ultime étant l'automatisation de la conduite [28].

Bien que bénéficiant d'une réelle avance à la fin des années quatre vingt, l'Europe a accusé un certain retard après l'arrêt du projet PROMETHEUS. Le Sixième PCRD fait maintenant la part belle aux systèmes d'aide à la conduite avec plus particulièrement le projet intégré PREVENT qui réunit 56 partenaires sur les aspects de sécurité préventive, sous l'égide d'ERTICO [1].

Au niveau national, le PREDIT joue le rôle de source d'incitation et de regroupement des financements pour la recherche sur les transports et la sécurité avec l'implication de trois ministères : transports, recherche et industrie. L'action fédératrice ARCOS2004, en est un bel exemple de coordination de la recherche. Cinquante huit partenaires ont pris part au projet avec pour objectif de faire progresser 4 fonctions de sécurité : la gestion des interdistances, l'évitement des sorties de route, l'anticollision et l'alerte en amont d'un accident.

4 L'assistance à la conduite

L'objet de cette section est de couvrir les possibilités offertes en terme d'assistances actives aux conducteurs en utilisant des moyens de perception, de localisation ou de communication entre les véhicules ou avec l'infrastructure. A titre d'exemple, une caméra frontale détectant les lignes blanches permet de développer une fonction d'assistance au maintien de voie, un lidar fournit une mesure d'interdistance et de vitesse relative et permet d'envisager le développement d'un système de gestion des inter-distances et d'anti-collision. De même, une localisation à l'aide d'un GPS peu précis associée à une cartographie suffit pour limiter la vitesse à l'approche d'un virage [8], [7].

Ces moyens de perception dit extéroceptifs offrent aussi l'avantage de pouvoir anticiper la difficulté, on parle alors de sécurité active préventive. L'anticipation de la difficulté nécessite une bonne quantification du risque encouru, mais aussi une bonne connaissance des possibilités de partage avec les conducteurs. Car en effet, à la différence des systèmes de sécurité dite interactive (ABS, ESP), la durée d'intervention du système est bien au delà du temps de réaction du conducteur, les interactions avec les actions de celui-ci doivent donc être prises en compte au niveau de la conception de l'aide.

4.1 Le modes de partage en sécurité préventive

L'analyse de la coopération Homme-Machine dans le cadre du projet ARCOS a abouti à la définition de plusieurs modes de coopération de plus en plus intrusifs allant de la simple information jusqu'à l'automatisation complète d'une fonction de conduite. Six modes ont été définis

- Mode instrumenté : des informations sont fournies au conducteur; elles peuvent être issues directement des capteurs et affichées après traitement, ou reconstruites à partir d'observateurs.
- Mode avertissement : le traitement de l'information est plus élaboré, le diagnostic de la situation permet l'émission d'une alerte lors de l'occurrence d'un événement risqué.
- Mode limite : Les actions du conducteur sont limitées afin d'éviter la transition vers la zone à risque.
- Mode médiatisé : Les actions du conducteur ne sont pas directement transmises aux organes, elles subissent un traitement préalable.
- Mode régulé : Certaines tâches de conduite sont complètement déléguées au contrôleur.
- Mode automatisé : Dans ce cas, le conducteur est complètement déchargé du processus de conduite.

4.2 Les indicateurs du risque

Nous présentons ci-après les variables les plus usuelles utilisées pour le développement d'assistances. Ces variables, pour certaines d'entre elles, constituent aussi des grandeurs de régulation possibles pour l'automatisation de la conduite. D'autres sont directement issues de la modélisation du processus de conduite. L'exposé ci-après est limité au cas d'un véhicule qui reste dans sa voie de circulation, on exclut donc les risques liés à la présence de véhicules sur les voies adjacentes. De même le type d'accotement, bien que très important dans la perception du risque par le conducteur, ne sera pris en compte.

Les indicateurs pour le mode latéral. Un premier groupe d'indicateurs est directement lié à la dynamique proprioceptive du véhicule :

- L'accélération latérale, directement obtenue à partir d'un accéléromètre
- La vitesse de lacet, combinée à la vitesse longitudinale et à l'angle de roues est révélatrice d'un effet de survirage ou de sous-virage. Ces éléments, tout comme l'accélération latérale sont disponibles en standard sur un véhicule muni d'un ESP.
- La vitesse latérale. Cette vitesse n'est pas directement mesurable, son estimation est possible à partir de la vitesse de lacet, de l'accélération latérale mais aussi de la vitesse GPS.

Un deuxième groupe d'indicateurs nécessite la présence de capteurs extéroceptifs :

- Le déplacement latéral du véhicule par rapport l'axe de la voie de circulation. Celui-ci peut être pris à une certaine distance en avant du centre de gravité afin d'introduire un effet d'anticipation sur la trajectoire du véhi-

cule.

- Le cap relatif, qui donne l'erreur de cap du véhicule par rapport à celui de la route. Cet indicateur, tout comme le déplacement latéral peuvent être facilement obtenus par un capteur vidéo monté en vision frontale.
- Le temps à sortie de voie (TLC), qui représente le temps nécessaire, étant donnée la vitesse du véhicule, pour franchir un des bords de la voie. Cet indicateur qui combine à la fois dynamique du véhicule, localisation sur la voie et géométrie de la route est très utile, mais pas facile à calculer. Il a été prouvé que les sorties de voie sont souvent précédées par une période pendant laquelle le TLC est déjà faible. Un minimum pour le TLC se produit si une correction dans l'angle de braquage a été initiée, il est donc révélateur de l'activité du conducteur et de l'adéquation de ses actions.

Les indicateurs pour le mode longitudinal. Dans le cas d'un véhicule isolé, donc en mode "régulation de vitesse", les deux indicateurs primaires sont : la vitesse en régime permanent et l'accélération longitudinale. En mode suivi de véhicule, le conducteur gère simultanément la vitesse du véhicule et l'interdistance. Plusieurs indicateurs entrent en jeu

- L'interdistance, à comparer à l'interdistance minimale dite de sécurité.
- Le temps intervéhiculaire obtenu en divisant l'interdistance par la vitesse. Un temps intervéhiculaire minimal de 2sec est actuellement imposé sur les voies rapides par la législation.
- La vitesse relative, normalement nulle.
- Le temps à collision (TTC) obtenu en divisant l'interdistance par la vitesse relative. Cet indicateur est à rapprocher du TLC dans le cas du latéral.

4.3 Assistance pour le mode latéral : vers un ESP perceptif

La modification de la dynamique latérale d'un véhicule se fait principalement par l'intermédiaire de la commande de l'angle aux roues ou du couple sur la commande de direction. Dans [17], l'ensemble des modes de coopération décrit précédemment ont été mis en oeuvre sur un véhicule prototype. Le positionnement du véhicule se fait par détection des lignes en vision frontale. La loi d'assistance agit alors sur le couple au volant. Les aspects de coopération entre l'automate et le conducteur ont été étudiés par l'équipe Psycotec de l'IRCCyN. La figure 1 donne un aperçu de l'interface visuelle en mode instrumenté.

De même, en collaboration avec le LIVIC, le laboratoire d'automatique de SUPELEC a développé une approche d'assistance en maintien de voie qui admet une "coopération" permanente entre le conducteur et le correcteur [19]. Cette approche a démontré une réelle amélioration des performances en maintien de voie particulièrement en situation de rejet de forces de vent latéral.

Dans la suite de cette partie, nous nous intéressons au problème de l'amélioration de la directibilité du véhicule couplé à une assistance de maintien de voie [13]. Ce travail a été mené dans le cadre du projet de recherche ARCOS.

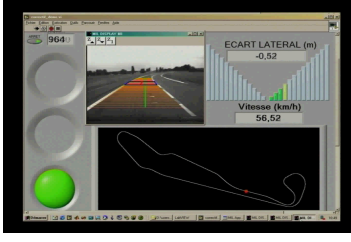


FIG. 1 – Interface d'assistance au maintien de voie par vision frontale.

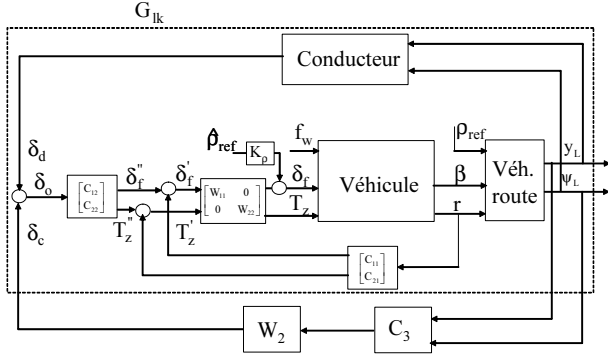


FIG. 2 – Architecture de contrôle.

Le système véhicule admet comme entrées de commande l'angle de braquage des pneumatiques δ_f et le couple de lacet T_z qui peut être produit par un freinage différentiel. Les entrées de perturbations sont représentées par les forces de vent f_w et la courbure de la route ρ_{ref} . Les mesures sont la vitesse de lacet r , le déplacement latéral par rapport à l'axe de la voie y_L ainsi que le cap relatif avec la route ψ_L .

Concepts de l'assistance. La méthode utilise un schéma de commande en deux boucles de régulation. Une boucle interne assure l'amélioration de la manoeuvrabilité du véhicule et la boucle externe assure le maintien de voie. L'approche utilise une combinaison d'angle de braquage actif et de freinage différentiel des roues. On suppose que l'angle de braquage des roues est la résultante de l'angle de braquage imposé par le conducteur δ_d et de celui calculé par le correcteur δ_c (Figure 2). Cette opération est facilement réalisable sur un dispositif de direction du type steer-by-wire mais peut être aussi réalisée sur une direction conventionnelle munie d'un moteur électrique et d'un différentiel.

Le correcteur de la boucle interne combine à la fois une composante boucle fermée C_1 par bouclage de la vitesse de lacet r et une composante de feedforward (préfiltrage) C_2 sur l'angle de braquage $\delta_0 = \delta_d + \delta_c$. A la sortie du correcteur $\begin{bmatrix} C_1 & C_2 \end{bmatrix}$, nous obtenons l'angle de braquage des pneumatiques et le couple de lacet $\begin{bmatrix} \delta'_f & T'_z \end{bmatrix}^T$ tel que

$\begin{bmatrix} \delta_f & T_z \end{bmatrix}^T = W_1 \begin{bmatrix} \delta'_f & T'_z \end{bmatrix}^T$, où W_1 est un pré-filtre dynamique de l'entrée. L'angle de braquage δ_0 , sera calculé par la boucle externe.

Étant donné que la tâche de maintien de voie est un pro-

blème de rejet de perturbation, le correcteur C_3 de la boucle externe assure le bouclage du déplacement latéral et du cap relatif. Il produit un angle de braquage $\delta_c = W_3 C_3 [y_L, \psi_L]^T$ qui sera additionné à l'action du conducteur.

L'effet désiré de chaque composante de correction est comme suit :

- Le correcteur en boucle fermée C_1 doit assurer la stabilité de celle-ci avec une amélioration garantie de l'amortissement des réponse en lacet du véhicule. Ce correcteur a aussi en charge le rejet des perturbations dans l'intervalle de temps du temps de réaction du conducteur.
- Le correcteur C_2 agit en préfiltrage du signal de référence δ_0 . Son objectif lors de la synthèse est d'assurer le suivi robuste du modèle de référence préalablement choisi. Le modèle de référence T_0 est choisi comme un filtre du premier ordre de gain statique $G_{r\delta_f}(0, v)$ et $T_0 = \frac{G_{r\delta_f}(0, v)}{0.15s+1}$. Le temps de réponse est de l'ordre de 0.5 sec. Le choix d'un modèle du premier ordre permet d'éviter les dépassements sur les réponses du véhicule.
- Du point de vue véhicule, le problème de maintien de voie requiert que le correcteur rejette l'accélération latérale et la vitesse de lacet engendrées par des changement du rayon de courbure de la route. C'est le rôle du correcteur C_3 .
- Finalement, un gain constant K_ρ est ajouté de manière à compenser l'effet de la courbure à travers une estimation $\hat{\rho}_{ref}$ de celle-ci.

Une procédure de synthèse en deux étapes est adoptée. Dans la première étape, on calcule le correcteur C_1 en utilisant une optimisation H_∞ basée sur les facteurs premiers. Par la suite, le nouveau modèle de véhicule qui inclut le correcteur C_1 est calculé et le correcteur de pré-filtrage C_2 est calculé à partir d'une deuxième optimisation H_∞ . La procédure utilisée pour C_1 est aussi utilisée pour le calcul de C_3 . La boucle interne est calculée en premier. Ceci assure que le système de manoeuvrabilité est toujours optimal même si le système de maintien de voie n'est plus opérationnel suite à une dégradation de la précision de la localisation relative par vidéo par exemple.

Estimation et compensation de la courbure. La connaissance de la courbure permet d'améliorer les performances du maintien de voie en introduisant un facteur d'anticipation. Dans notre cas, les deux mesures y_L et ψ_L , sont normalement suffisantes pour obtenir une estimation de ρ_{ref} , sous l'hypothèse que celle-ci est constante. Un observateur proportionnel integral (PI) [9] permet d'obtenir simultanément une bonne estimation de l'état et de ρ_{ref} . L'estimée de la courbure $\hat{\rho}_{ref}$ est utilisée pour ajouter un terme de compensation de la courbure ($K_\rho \hat{\rho}_{ref}$). Le gain K_ρ est ajusté de manière à garantir le rejet total de la perturbation dans le cas nominal.

Amélioration de la manoeuvrabilité.

Rejet de perturbation Une rafale de vent apparaît à $t_1 = 1$ sec et disparaît à $t_2 = 2$ sec. Le conducteur n'a pas le temps de réagir, le correcteur C_1 est en action, on remarque alors une forte réduction de la vitesse de lacet

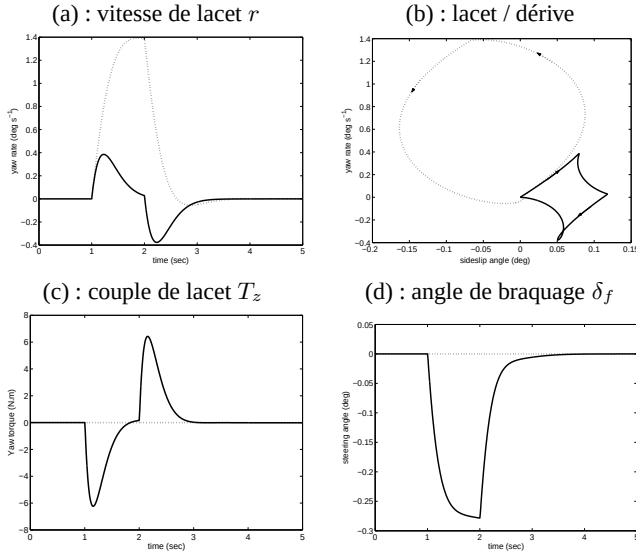


FIG. 3 – Rejet d'un échelon de force de vent (trait plein : contrôlé, pointillés : conventionnel).

du véhicule contrôlé (figure 3). Le freinage différentiel est lui rapidement désactivé grâce à l'effet de limitation de la pondération W_{22} .

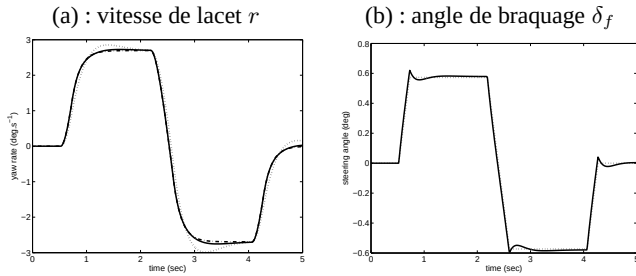


FIG. 4 – Changement de voie (trait plein : contrôlé, pointillés : conventionnel, interrompus : modèle de référence).

Changement de voie Le conducteur initie un changement de voie par application d'un angle de braquage (Figure 4-b, en pointillés), dans ce cas, les deux correcteurs C_1 et C_2 sont en action. La figure 4, démontre que le véhicule contrôlé suit fidèlement le modèle de référence choisi.

Maintien de voie. Au début de la simulation, le véhicule est sur une section rectiligne avec un déplacement latéral de 0.5m. Sans aucune assistance, le conducteur donne un angle de braquage pour ramener le véhicule au centre de la voie (figure 5). Le dépassement est de -0.2m et le déplacement latéral pratiquement nul 3sec plus tard. A $t = 5$ sec, le véhicule aborde un virage de courbure $1/500m^{-1}$. Le déplacement latéral devient de -0.3m mais est réduit à 0.1m, 2sec plus tard par le conducteur. Sur la même figure, nous distinguons aussi les réponses du véhicule (traits interrompus) quand le correcteur de manoeuvrabilité est activé. Ces réponses sont très similaires à celles du véhicule conventionnel, même si on observe une réduction des maxima. De même, les réponses en trait plein correspondent au cas

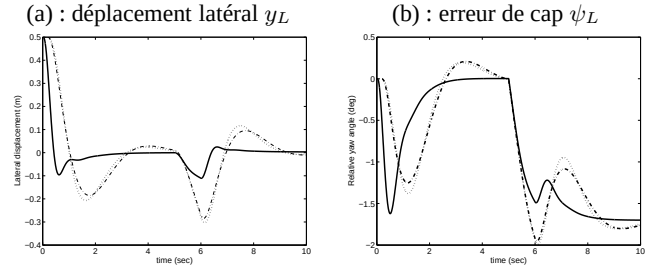


FIG. 5 – Maintien de voie (trait plein : contrôlé avec contrôleur de maintien de voie, pointillés : conventionnel, interrompus : contrôlé avec contrôleur de manoeuvrabilité).

où les deux correcteurs de manoeuvrabilité et de maintien de voie sont activés. Cette fois ci, le temps de réponse subit une nette amélioration, puisqu'il est inférieur à la seconde, et les déplacements par rapport à l'axe de la voie ne dépassent pas 0.1m. Finalement, les figures 6-a and 6-b donnent les valeurs de temps à sortie de voie pour chaque véhicule. On remarque une nette amélioration des TLC pour les deux véhicules contrôlés et plus particulièrement dans les courbes.

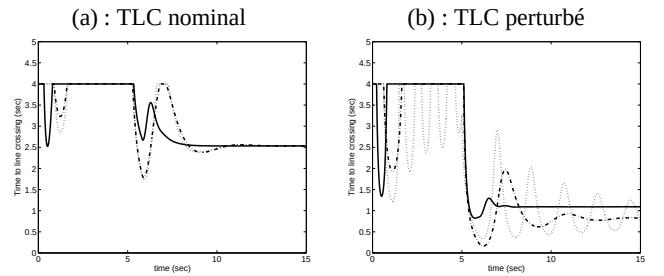


FIG. 6 – Temps à sortie de voie, cas nominal et perturbé (trait plein : contrôlé avec contrôleur de maintien de voie, pointillés : conventionnel, interrompus : contrôlé avec contrôleur de manoeuvrabilité).

Essai sur la piste de Satory. Cette section présente une courte évaluation sur le site de Satory en utilisant le véhicule d'essai du LIVIC (figure 7).

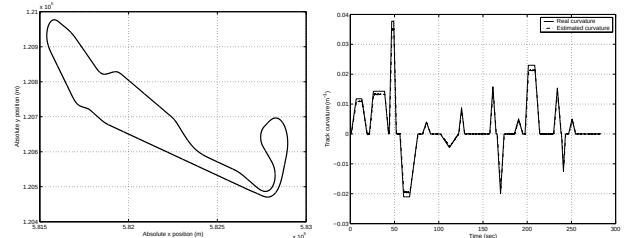


FIG. 7 – Piste de Satory digitalisée. Courbure de la piste et son estimée.

La figure 7 montre la courbure de la piste et son estimée obtenue par l'observateur PI. On remarque une bonne estimation de la courbure y compris dans les zones de transition clothoïdes. La figure 8-a donne les trajectoires du

véhicule conventionnel et du véhicule avec assistance au maintien de voie, on remarque que la trajectoire du véhicule contrôlé est toujours plus proche de l'axe de la voie et plus particulièrement dans les chicanes.

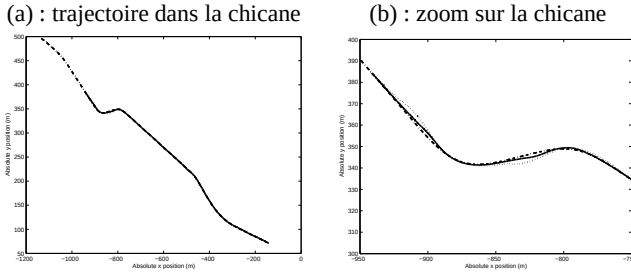


FIG. 8 – Maintien de voie sur la piste d'essai (trait plein : contrôlé, trait pointillé : conventionnel, interrompus : axe de la voie).

4.4 Assistance au contrôle longitudinal

Le véhicule isolé. Dans le cas d'un véhicule isolé, la vitesse limite donnée par la signalisation passive actuelle est souvent inadaptée aux conditions réelles de la chaussée et du trafic. Une assistance peut fournir au conducteur une indication quant à sa prise de risque par rapport aux difficultés de l'infrastructure qu'il va rencontrer dans un horizon temporel proche (adhérence, dévers, courbure,...). Pour être efficace, l'information concernant le risque devra être donnée au conducteur suffisamment à l'avance pour que celui-ci ait le temps de réagir. Pour cela, le système d'alerte pour la vitesse excessive en approche de virage calcule la vitesse prévisible du véhicule à un horizon temporel donné (variant de 1 à 3 s), en se basant sur l'hypothèse d'une accélération constante. Cette vitesse est ensuite comparée à différents profils de vitesses générés à partir de l'horizon électronique renvoyé par une base de données cartographiques. En fonction du résultat, une alerte sonore et visuelle est émise (ou non) en direction du conducteur. Dans un deuxième temps, si nécessaire, un algorithme basé sur des modes glissants d'ordre 2 entreprend le pilotage de la vitesse vers la vitesse limite adaptée à la situation [18].

Définition de la vitesse limite De l'étude du comportement du conducteur en approche de virage et dans le virage, nous avons pu définir une vitesse limite en prenant comme hypothèse que dans une condition normale de circulation, les valeurs des accélérations longitudinales et latérales que le conducteur s'autorisait, sont presque constantes. Sur une chaussée sèche et avec de bonne condition d'adhérence, cela revient à dire que l'adhérence que le conducteur mobilise en longitudinale et en latérale est constante. En fait, les forces générées par le contact pneumatique chaussée restent à l'intérieur d'une ellipse d'adhérence. Nous pouvons traduire cela par la formulation suivante :

$$\frac{F_{lon}^2 + F_{lat}^2}{F_{vert}^2} \leq \mu_{max}^2$$

où F_{lon} , F_{lat} et F_{vert} sont respectivement les forces longitudinales, latérales et verticales au contact pneumatique

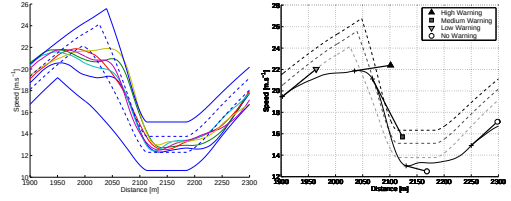


FIG. 9 – Profils de vitesses réelles et simulées. Génération d'alerte utilisant les profils de vitesses.

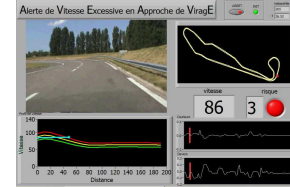


FIG. 10 – Interface d'affichage de vitesse excessive.

chaussée.

De plus, nous faisons l'hypothèse que la trajectoire suivie par le véhicule correspond au milieu de la voie. En recherchant la mobilisation maximale d'adhérence, exprimée dans l'équation précédente, nous pouvons obtenir (voir [8] pour le détail des calculs) l'expression de la vitesse critique dans la portion circulaire du virage, ainsi qu'une équation différentielle définissant la vitesse limite dans les phases d'accélération et de décélération avant et après cette portion. Elle est aussi fonction de φ , θ et ρ qui représentent les dévers, pente et courbure de la route. Cette vitesse est aussi fonction de λ_{lon} et λ_{lat} qui correspondent à la portion d'accélération, respectivement longitudinale et latérale, que le conducteur s'autorise à mobiliser. Par extension, et pour un bon contact pneumatique chaussée, c'est la portion d'adhérence que le conducteur s'autorise à mobiliser. La figure 9 montre des profils de vitesses obtenus en enregistrant des passages sur la piste de Satory pour différents conducteurs ainsi que des profils simulés, générés à partir des équations précédentes. Ces derniers sont représentés en traits épais et pointillés et correspondent à des coefficients λ_{lon} et λ_{lat} variant de 0.2 à 0.5. Les profils de vitesses réelles sont représentés en traits fins.

Les profils, ainsi générés, encadrent bien les profils réels dans les différentes phase du virage : tout d'abord la décélération en amont du virage, puis la partie vitesse constante, et pour finir l'accélération en sortie de virage.

Génération d'une alerte au conducteur A partir des profils générés précédemment, une assistance peut prévenir le conducteur en cas de vitesse excessive. Pour cela, le système calcule à chaque instant la vitesse prédite à un horizon temporel donnée, variant de 1s à 3s selon les conducteurs. Pour prédire la vitesse, nous faisons l'hypothèse que l'accélération est constante sur cette plage de temps. Ainsi, comme le présente la figure 9, lorsque la vitesse prédite franchit un profil de vitesse, une alerte faible, moyenne ou importante est émise.

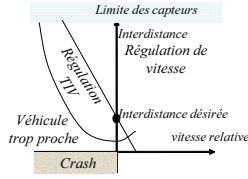


FIG. 11 – Régulation de temps intervéhiculaire (TIV). Limites du contrôle longitudinal

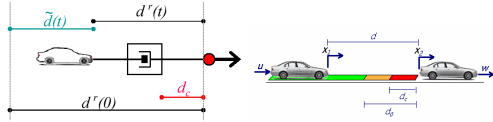


FIG. 12 – Modèle des interdistances et zones d'alerte.

Le suivi de véhicule. Dans le cas du suivi de véhicule, les deux variables importantes sont l'inter-distance et la vitesse relative.

Dans le cas de l'automatisation du mode longitudinal, l'objectif de la loi de commande est d'asservir la vitesse du véhicule suiveur sur celle du véhicule leader tout en maintenant l'interdistance à la valeur désirée qui peut être choisie proportionnelle à la vitesse du véhicule ou fonction de la différence des distances d'arrêt. Les méthodes de commande seront détaillées dans la partie 5.

Dans le cas de l'assistance au contrôle longitudinal, l'objectif de la commande en partage avec le conducteur est de maintenir la trajectoire dans le plan de phase (vitesse relative, interdistance) au dessus de la courbe correspondant à la capacité de freinage maximale (figure 11). Dans [15] un modèle de référence des inter-distances a été développé, il associe un ressort de raideur non linéaire qui interdit au véhicule de franchir une zone de collision pré-établie (figure 12).

La prédiction des positions des véhicules leader et suiveur permet d'avoir une quantification du risque encouru associé à un système d'alerte [16].

De même dans [18], une commande par modes glissants d'ordre 2, en partage avec le conducteur permet de gérer l'ensemble des situations : d'insertion des véhicule, d'arrêt sur un obstacle et de stop-&-go.

5 La conduite automatisée

De manière similaire à la section 4, cette section présente différents moyens pour réaliser une conduite autonome que cela soit en configuration véhicule seul, ou véhicules en convoi. Les outils et méthodes de localisation utilisés pour l'assistance à la conduite, le sont, bien sur, pour la conduite automatisée. Néanmoins, comme nous le verrons dans cette section, des approches originales peuvent être apportées dès lors que l'on considère le problème complet de localisation/commande.

Sur le plan applicatif, les véhicules autonomes peuvent être utilisés comme un moyen pour assurer une inter-modalité dans les systèmes de transports urbains et/ou routiers, tout en prenant en compte les nuisances sonores et de pollu-

tion, et les pertes de temps. Dans cette section, nous nous concentrerons plus sur les véhicules urbains. Les services de mise à disposition ainsi réalisés concernent :

- la desserte : des centres villes (liaisons maison-Tramway, Tramway-zone commerciale, Tramway-zone culturelle (théâtre, cinéma, ...)), des centres universitaires ou d'exposition), des zones d'activités artisanales ou industrielles, des aéroports ...
- la visite : des centres historiques, des parcs d'attraction, des parcs animaliers ...

Selon l'application de suivi de trajectoire, il peut être utile ou pas, de laisser libre la commande longitudinale à l'utilisateur ou à un superviseur. Cet aspect pratique, milite pour les techniques de modélisation permettant d'assurer un découplage entre la commande latérale et la commande longitudinale (i.e. système chaîné).

Les résultats qui sont présentés dans les paragraphes qui suivent, sont en relation avec les projets ROBEA-BODEGA du CNRS et PREDIT3-MOBIVIP. Ces deux projets regroupent entre autre, l'IRISA, L'INRIA-Sophia-Antipolis et le LASMEA.

5.1 Le contrôle latéral

Dans les projets précédemment cités, le contrôle latéral résulte d'une mesure d'erreur de localisation relativement à une trajectoire de référence apprise (principalement dans l'espace capteur). Ainsi, lors d'une séquence d'apprentissage (conduite manuelle) une série d'informations capteurs (notion de cartes locales constituées d'images clés) est mémorisée afin de définir une référence (mémoire sensorielle). Parmi les méthodes d'apprentissage (cf. Fig. 13), nous pouvons citer :

- trajectoire de référence par RTK-GPS (LASMEA)
- séquence d'images clés et de primitives visuelles associées (Points 3D) (LASMEA) [24], [23]
- séquence de primitives visuelles des plans principaux reconstruits (INRIA Sophia-Antipolis) [25], [26]
- séquence de primitives visuelles (Points de Harris) (IRISA) [21], [20]

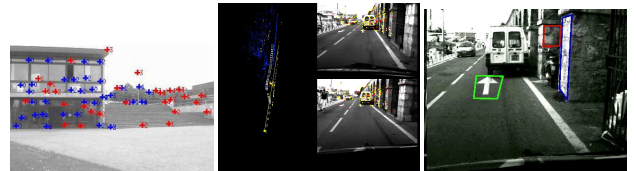


FIG. 13 – IRISA - LASMEA - INRIA-SOPHIA.

Les deux premières approches ont déjà été mises en œuvre pour la navigation autonome [27], [22]. L'erreur de localisation consiste à extraire l'écart latéral y à la trajectoire de référence, et l'écart angulaire θ par rapport à cette même trajectoire.

Le vecteur (s, y, θ) décrit l'état du véhicule (s représentant l'abscisse curviligne le long de cette trajectoire). Le mo-

dèle cinématique s'exprime sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\dot{s} &= v \frac{\cos \tilde{\theta}}{1-y \tilde{c}(s)} \\ \dot{y} &= v \sin \tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} &= v \left(\frac{\tan \delta}{L} - \frac{\tilde{c}(s) \cos \tilde{\theta}}{1-y \tilde{c}(s)} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

Les objectifs de commande sont d'amener et de maintenir y et $\tilde{\theta}$ à 0, grâce à la commande du volant δ . Par une transformation inversible de l'état et de la commande, le modèle non-linéaire (1) peut être converti de manière exacte, sous forme chaînée assurant un découplage entre la commande latérale et la commande longitudinale lors du suivi de trajectoire [27].

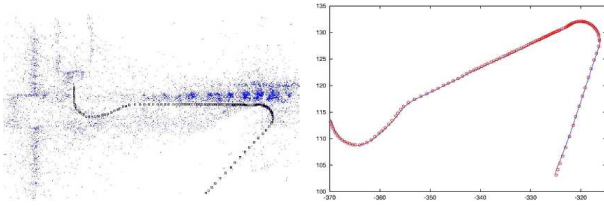


FIG. 14 – Trajectoire de référence vision - Localisation vision et GPS.

La figure 14 représente la trajectoire de référence obtenue par apprentissage en utilisant les points 3D reconstruits, ainsi que les résultats de localisation (*rond*) comparés avec ceux issus du capteur RTK-GPS (*trait fin*). Les performances obtenues en commande latérale sont de l'ordre de 2 cm en ligne droite et 10 cm en courbe pour le guidage par RTK-GPS (cf. Fig 15). Elles se dégradent très peu lorsque l'on utilise la vision pour la navigation autonome. Des améliorations sont en cours afin de permettre de réduire les erreurs de localisation.

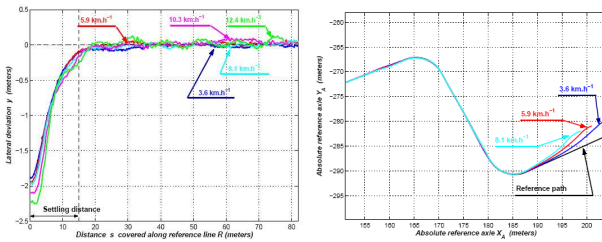


FIG. 15 – Performances : échelon et trajectoire courbe.

Le modèle (1) peut-être étendu pour prendre en compte des phénomènes de glissements latéraux (lorsque les hypothèses de roulement sans glissements ne sont pas parfaitement vérifiées), et réaliser une commande plus précise. Cet aspect a pu être validé dans le secteur agricole [10].

Les deux autres approches sont en cours d'étude dans le but d'exprimer la commande dans l'image (Rennes), et dans un espace invariant aux paramètres de la camera (Sophia-Antipolis).

5.2 Le contrôle longitudinal

Dans la plupart des applications de navigation autonome pour les véhicules urbains, il est intéressant de découpler la commande longitudinale de la commande latérale afin de pouvoir réaliser :

- une régulation de vitesse longitudinale sur une consigne fixe (vitesse de croisière) ou adaptée en fonction de la courbure de la route à suivre ; dans les deux cas, c'est un superviseur qui fixe la vitesse de référence afin d'assurer un certain confort pour les passagers,
- une régulation de vitesse longitudinale sur une consigne manuelle de l'utilisateur.

Dans ce contexte, le contrôle longitudinal devient simple et assimilable à une fonctionnalité de type "cruise control". Dans le cas où une distance de sécurité est à garantir, il est nécessaire d'introduire une fonction de "monitoring", comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

5.3 Le contrôle intégré et en file

Dans le cas de la navigation autonome en convoi, il est nécessaire d'assurer les commandes longitudinale et latérale. Les fonctionnalités à réaliser sont : le suivi d'une trajectoire de référence apprise, ou bien le suivi de la trajectoire du "leader" du convoi. Par ailleurs, il est nécessaire de prendre en compte : le confort des passagers, la surveillance de l'intégrité et de la sécurité du convoi, et les limites propres des performances des véhicules à commander.

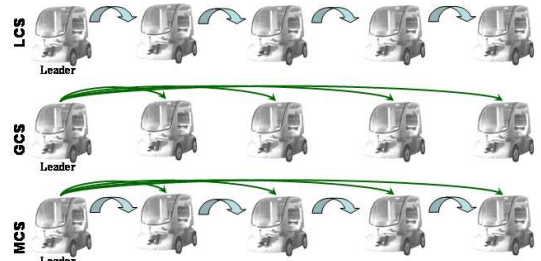


FIG. 16 – Stratégies de commande.

Plusieurs stratégies peuvent être développées pour assurer le contrôle du convoi (cf. Fig.16) :

- stratégie de commande locale (LCS) : basée sur un contexte local, le convoi est commandé de proche-en-proche.
- stratégie de commande globale (GCS) : basée sur le contexte global, le convoi est commandé en référence au leader.
- stratégie de commande mixte (MCS) : prenant en compte les complémentarités des deux méthodes LCS et GCS, une approche mixte peut être élaborée.

Stratégie de commande locale : accrochage immatériel.

Dans cette partie deux illustrations sont proposées.

Dans [6], c'est le capteur RTK-GPS qui est utilisé. De plus, il existe une liaison sans fil entre les véhicules permettant de transmettre l'état courant du véhicule au véhicule suiveur. Chaque véhicule, pouvant se localiser par rapport à

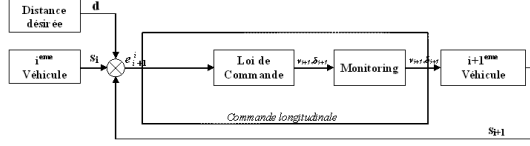


FIG. 17 – Contrôle longitudinal avec LCS.

la trajectoire de référence, est guidé latéralement en mode autonome. L'objectif de la commande longitudinale est de préserver une distance curviligne constante entre chaque voiture et son suiveur. Le schéma sur la figure 17 présente la loi de commande. Nous pouvons noter que l'entrée de cette loi est définie par l'erreur entre le $i^{\text{ème}}$ et le $(i+1)^{\text{ème}}$: $e_{i+1}^i = s_i - s_{i+1} - d$. Les résultats expérimentaux ont montré une précision de guidage latéral identique à celle de la conduite autonome, et inférieure à 5 cm en guidage longitudinal.

Dans [2], un accrochage immatériel est réalisé par l'intermédiaire d'une caméra PTZ et d'un algorithme de suivi visuel robuste [3]. La commande (longitudinale et latérale) réalisée est basée sur une localisation relative de proche en proche. Dans [5], nous avons montré que pour un nombre important de véhicules en convoi, cette stratégie propage des incertitudes de localisation pouvant entraîner des oscillations dans le convoi (figure 18).



FIG. 18 – Accrochage immatériel par vision.

Stratégie de commande mixte. Dans le cas d'une approche de commande globale pour la commande longitudinale, l'erreur est définie entre le $1^{\text{ère}}$ et le $(i+1)^{\text{ème}}$ par : $e_{i+1}^1 = (s_1 - s_{i+1}) - i \times d$. Il semble donc, intéressant de définir l'entrée de la loi de commande en se basant sur les erreurs définies par les deux approches (LCS et GCS). Une consigne adaptée peut être construite de la forme : $x_i = \sigma_i \cdot e_{i+1}^i + (1 - \sigma_i) \cdot e_{i+1}^1$. La figure 19 illustre le nouveau schéma de commande.

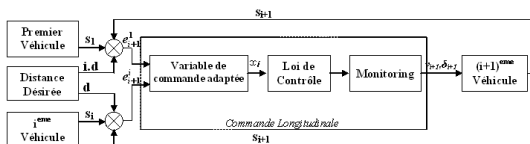


FIG. 19 – Commande longitudinale avec MCS.

L'étape suivante consiste à définir σ_i . Pour cela, nous définissons la distance de sécurité d_s comme la distance curviligne minimale qui doit toujours être observée entre 2 véhicules. Il s'avère que si l'écart est proche de cette limite, la régulation est mauvaise et la distance de sécurité peut ne pas être respectée. Ainsi, l'approche locale de proche-en-proche LCS doit prévaloir sur l'approche référencée absolue (σ_i doit être choisi proche de 0). À l'opposé, cette dernière doit être prédominante quand la sécurité est assurée (σ_i choisi proche de 1). De ces commentaires, quand e_{i+1}^i est proche de $-d + d_s$, σ_i doit être près de 0 ; et quand l'écart est près de d , σ_i proche de 1.

Enfin, afin de prendre en compte les aspects confort du passager, intégrité du convoi, et les limites des véhicules, une fonction monitoring a été proposée en agissant directement sur la commande en vitesse longitudinale. Dans le synoptique de la figure 20, a_{conf} représente une accélération confort, a_{urg} une décélération d'urgence, a_{i+1} et v_{i+1} l'accélération et la vitesse du véhicule courant.

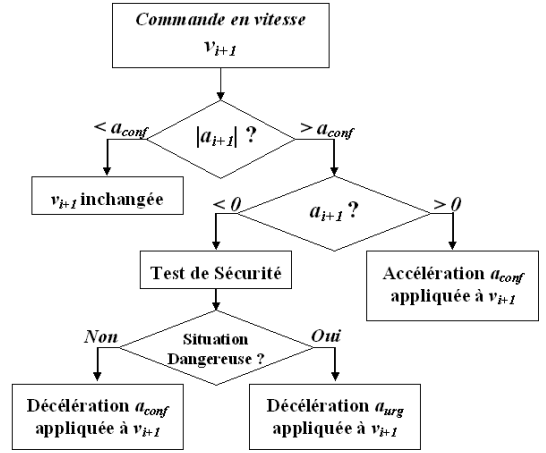


FIG. 20 – Fonction de monitoring.

6 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article un panorama des recherches sur les assistance à la conduite et l'automatisation des véhicules. Les recherches sont nombreuses et les résultats obtenus dans différents cas d'application sont très prometteurs. Mais les constructeurs automobiles demeurent prudents dans l'introduction de fonctions de sécurité préventive ou interactive car, en plus des problèmes de responsabilité, les aspects de partage et de couplage avec le conducteur sont loin d'être maîtrisés. Des études méthodologiques sur la coopération Homme-Machines sont encore nécessaires pour pouvoir affiner ces aspects. L'automatisation touche de manière concrète les véhicules agricoles et les engins de chantier. L'audace des constructeurs japonais et la réglementation dans ce pays ont permis la commercialisation de systèmes de maintien de voie et de gestion des inter-distances. Quoi qu'il en soit tout laisse penser que l'automatisation des véhicules concernera dans un

premier temps les véhicules urbains à faibles vitesses. Une application à court terme concernerait l'automatisation des véhicules pendant les périodes de congestion et toujours à faibles vitesses. Le système devra être dans ce cas suffisamment flexible pour permettre des enclenchements et des reprises en main rapides. Les fortes contraintes de coûts dans l'industrie automobile imposera toujours l'utilisation de capteurs peu chers. Il y a donc tout à gagner de la modélisation, de la fusion de données et des nouveaux systèmes de localisation et de mapping pour améliorer la qualité de l'information.

Références

- [1] E. Bastiaensen and P. Mengel, PReVENTive and Active Safety Applications (PReVENT), MST/MEMS For Safety and Security - VDI/VDE/IT, 2004.
- [2] S. Benhimane, E. Malis, J.R. Azinheira, Vision-based Control for Car Platooning using Homography Decomposition, *IEEE-ICRA'05*, Barcelonna, 2005.
- [3] S. Benhimane, E. Malis, Real-time image-based tracking of planes using efficient second-order minimization, *IEEE/RSJ-IROS'04*, Sendai, 2004.
- [4] R. Bishop, Intelligent Vehicles R&D : An Update on Selected Projects in the U.S. and Europe, *Japan AHSRA Consortium*, 2003.
- [5] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, P. Martinet, A Global Control Strategy for Urban Vehicles Platooning relying on Nonlinear Decoupling Laws, *IEEE/RSJ-IROS'05*, Alberta, 2005.
- [6] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, P. Martinet, Non-linear control for urban vehicles platooning relying upon a unique kinematic GPS, *IEEE-ICRA'05*, Barcelonna, 2005.
- [7] El Badaoui, M. El Najjar, Ph. Bonnifait, Intelligent Vehicle Absolute Localisation using GIS Information. *16th IFAC World Congress*, Prague, 2005.
- [8] S. Glaser and V. Aguilera, Vehicle-Infrastructure-Driver Speed Profile : Towards the Next Generation of Curve Warning Systems, *Intelligent Transportation Systems and Services*, *10th Conf.*, Madrid, 2003.
- [9] D. Koenig and S. Mammar, Design of Proportional-Integral Observer for Unknown Input Descriptor Systems, *IEEE Trans. on Aut. Cont.*, vol 47, pp. 2057-2062, 2002.
- [10] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet, Model Predictive Control of vehicle in presence of sliding : Application to farm vehicles path tracking, *IEEE, ICRA'05*, Barcelonna, 2005.
- [11] E. Malis, Improving vision-based control using efficient second-order minimization techniques, *IEEE-ICRA'04*, News Orleans, 2004.
- [12] S. Mammar and D. Koenig, Vehicle Handling improvement by Active Steering, *Vehicle System Dynamics Journal*, vol 38, No 3, pp. 211-242, 2002.
- [13] S. Mammar, T. Raharijaona, S. Glaser, G. Duc, Lateral driving assistance using robust control and embedded driver-vehicle-road model, *Vehicle System Dynamics*, vol 41 Supplement, pp. 311-320, 2004.
- [14] S. Mammar, S. Glaser, M. Netto et J.-M. Blosseville, Time to line crossing and vehicle dynamics for lane departure avoidance, *7th IEEE-ITS*, Washington, D.C., 2004.
- [15] J.J. Martinez-Molina, C. Canudas de Wit, Model Reference Control Approach for Safe Longitudinal Control, *ACC'04*, Boston, 2004.
- [16] J.J. Martinez-Molina, C. Canudas de Wit, A Warning Collision System based on an Inter-distance Reference Model, *16th IFAC W. C.*, Prague, 2005.
- [17] M. Netto, R. Labayrade, S.-S. Ieng, B. Lusetti, J.-M. Blosseville et S. Mammar, Different Modes on Shared Lateral Control, *10th ITS World Congress*, Madrid, 2003.
- [18] L. Nouvelière, S. Mammar, Experimental longitudinal control of vehicle using a second order sliding mode technique, *ACC'03*, 2003.
- [19] T. Raharijaona, G. Duc, S. Mammar, Application de la synthèse LPV à l'assistance au contrôle latéral d'un véhicule routier, *CIFA '04*, Douz, 2004.
- [20] A. Remazeilles, F. Chaumette, P. Gros, Contrôle des mouvements d'un robot à l'aide d'une mémoire visuelle, *RFIA'04*, Toulouse, 2004.
- [21] A. Remazeilles, Navigation à partir d'une mémoire d'images, *Thèse de l'Université de Rennes 1*, 2004.
- [22] E. Royer, J. Bom, M. Dhome, B. Thuilot, M. Lhuillier, F. Marmoiton, Outdoor autonomous navigation using monocular vision, *IEEE/RSJ IROS'05*, Alberta, 2005.
- [23] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, T. Chateau, Localization in urban environments : monocular vision compared to a differential GPS sensor, *textitCV-PR'05*, San Diego, 2005.
- [24] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, T. Chateau, Towards an alternative GPS sensor in dense urban environment from visual memory, *Proceedings of the 15th British Machine Vision Conference, BMVC'04*, London, 2004.
- [25] N. Simond, P. Rives, Homography from a Vanishing Point in Urban Scenes, *IEEE/RSJ-IROS'03*, Las Vegas, 2003.
- [26] N. Simond, P. Rives, Détection robuste du plan de la route en milieu urbain, *RFIA'04*, Toulouse, 2004.
- [27] B. Thuilot, J. Bom, F. Marmoiton, P. Martinet, Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor, *Fifth IFAC-IAV'04*, Lisbon, 2004.
- [28] S. Tsugawa, Cooperative Driving with Autonomous Vehicles and Inter-Vehicle Communications and Demo 2000, *Intelligent Vehicles*, Tokyo, 2001.