



HAL
open science

Un contrôleur hybride pour le suivi de route et évitement d'obstacles

Danilo Alves de Lima, Alessandro Corrêa Victorino

► **To cite this version:**

Danilo Alves de Lima, Alessandro Corrêa Victorino. Un contrôleur hybride pour le suivi de route et évitement d'obstacles. 6èmes Journées Doctorales/Journées Nationales Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques (JDJNMACS'2015), Jun 2015, Bourges, France. hal-01305739

HAL Id: hal-01305739

<https://hal.science/hal-01305739>

Submitted on 21 Apr 2016

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

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

Un contrôleur hybride pour le suivi de route et évitement d'obstacles

Danilo ALVES DE LIMA¹, Alessandro CORRÊA VICTORINO¹

¹Laboratoire de Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes (Heudisyc)
UMR CNRS 7253 – Université de Technologie de Compiègne, Rue Roger Couttolenc CS 60319
60203 Compiègne cedex, France.

danilo.alves-de-lima@hdr.utc.fr et alessandro.correa-victorino@hds.utc.fr

Résumé— Cet article présente une approche pour la navigation locale des véhicules intelligents dans des environnements urbains. Nous proposons une nouvelle méthode hybride de navigation référencée capteur, basée sur l'association d'une stratégie d'asservissement visuel avec une méthode de navigation réactive référencée image, pour la réalisation de la tâche de suivi de routes avec évitement d'obstacles. L'asservissement visuel (VS) fonctionne comme un contrôleur délibératif et ses vitesses de contrôle sont validées dans un nouveau contrôleur réactif que nous avons proposé, basé sur une méthodologie référencée vision et l'approche de la fenêtre dynamique (Dynamic Window Approach - DWA), que nous avons appelé IDWA. Cette validation est nécessaire une fois que le VS ne considère pas les changements de vitesse pour arrêter le robot en situations de danger ou éviter des obstacles pendant la navigation. La solution hybride associe les avantages de chaque contrôleur (VS+IDWA) pour un meilleur suivi de route et évitement d'obstacles rapide, tout en considérant les contraintes cinématiques et dynamiques du véhicule. Des essais en simulation et dans un véhicule réel montrent la viabilité de la méthodologie proposée.

Mots-clés— Contrôleur hybride, asservissement visuel, approche de la fenêtre dynamique, navigation locale, évitement d'obstacles.

I. INTRODUCTION

Les véhicules robotisés sont de plus en plus utilisés dans les milieux industriels, civils et publics dans les dernières années, une fois qu'ils ajoutent plusieurs gains en sécurité routière, consommation d'énergie, efficacité, etc. Bien que certaines contributions aient été apportées avant, c'est après les *DARPA Grand Challenges*, réalisés pour l'agence de recherche de pointe du ministère de la Défense des États-Unis (DARPA) entre les années 2004 et 2007 [3], que la potentialité de ces véhicules a été testée. Actuellement, il y a des véhicules capables de se conduire en différentes situations, pendant des longues distances et en respectant les lois de circulation [14]. Cependant, ces véhicules utilisent des capteurs de coût élevé, beaucoup d'entre eux impraticables pour les voitures commerciales. De plus, ils doivent faire face à quelques problèmes liés à l'interaction avec l'environnement où la voiture est insérée, comme les problèmes de localisation liés à la perte de signal GPS, décrit pour beaucoup participants des challenges DARPA [3]. Il est important donc de rechercher des nouvelles approches pour la navigation basés sûr les capteurs à faible coût, mieux adaptées à l'environnement dans lequel le véhicule est inséré.

La navigation dans des environnements urbains peut être divisée en tâches locales afin de réduire les problèmes de localisation [17]. En se concentrant sur la tâche de suivi de route, il y a eu une augmentation de l'utilisation de

capteurs extéroceptifs basés sur la vision dans les travaux récents, dû à la richesse de caractéristiques disponibles dans la perception visuelle [2]. L'asservissement visuel est un des plusieurs façons de guider la voiture en utilisant des caractéristiques visuelles dans la boucle de commande. Il est divisé en deux approchés principales : l'asservissement visuel 3D ou référencé position (PBVS - *Position-based Visual Servoing*) et l'asservissement visuel 2D ou référencé image (IBVS - *Image-based Visual Servoing*) [5]. Ils sont liés à l'objectif de contrôle, exprimé dans l'espace cartésien ou dans l'image directement. Basé sur ce principe, plusieurs lois de contrôle peuvent être définies pour permettre un véhicule de converger et suivre différentes caractéristiques et primitives, comme des points, lignes et ellipses [9], [6]. Il est important de mentionner qu'il y a beaucoup d'autres méthodes d'asservissement visuel pour les robots non holonomes, en combinant le PBVS et l'IBVS, comme en [15], ou sans connaissance à priori de la scène [18].

Bien que ces tâches puissent guider le véhicule, ils n'effectuent pas de changement de vitesses pour l'évitement d'obstacles, essentiels pour la navigation dans les environnements urbains. En considérant le problème d'évitement d'obstacle, certaines approches définissent de lois de contrôle qui combinent la tâche d'asservissement visuel avec une méthode d'évitement d'obstacle (par exemple, champs de potentiel et les tentacules) [4], [7]. Normalement, ces tâches sont fusionnées au niveau de la stratégie de contrôle par une méthode de commutation qui modifie le poids de la tâche et, en conséquence, la loi de commande.

Ce travail aborde le problème de navigation pour une voiture robotisée, qui associe une méthode d'asservissement visuel (VS) pour le contrôle délibératif de suivi de la voie de circulation avec une méthode d'évitement d'obstacle réactive, ce qui résulte dans une stratégie de contrôle hybride. Une fois que le VS est indépendant de la localisation du véhicule et ne considère pas la présence d'obstacles pour accomplir sa tâche, une technique d'évitement d'obstacle doit être incorporée pour effectuer, en toute sécurité, la navigation locale. Avec l'utilisation d'un ensemble de caractéristiques réduit, basé sur celui présenté dans [6], une méthodologie d'asservissement visuel a été intégrée à l'approche de la fenêtre dynamique (DWA) [10], résultant en une nouvelle méthode d'évitement d'obstacle réactive appelée par approche de la fenêtre dynamique référencé image (IDWA - *Image-based Dynamic Window Approach*) [13]. L'IDWA valide la commande générée par le VS, prenant en compte les obstacles et les contraintes dynamiques/cinématiques du véhicule dans la boucle de

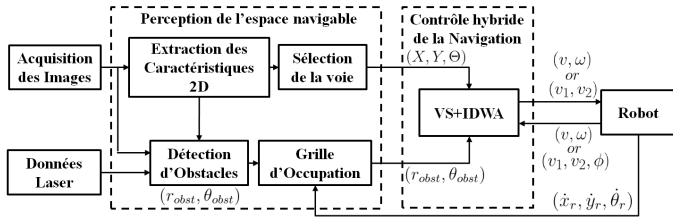


Fig. 1. Diagramme de la méthodologie proposée.

contrôle. La méthodologie utilisée diverge de celle présentée dans [12], où un champs vectoriel de vitesses a été intégré à la DWA pour effectuer la navigation d'une voiture robotisée, une fois qu'elle avait besoin d'une planification de trajectoire et la localisation globale du véhicule. Ce travail diverge aussi des précédents [4], [7] basés sur l'asservissement visuel, car l'évitement d'obstacles proposé avec l>IDWA intègre le suivi de la route et le contrôle de la vitesse dans ses calculs. En outre, contrairement à [13] qui utilise le contrôle réactif de l>IDWA pour guider la voiture, notre méthodologie combine les avantages des deux contrôleurs délibératif/réactif dans un contrôleur hybride (VS+IDWA).

La méthodologie proposée a été structurée en deux volets : la perception de l'espace de travail et le contrôle de la navigation, comme montré dans le diagramme de la Figure 1. Pour présenter ces concepts, cet article est structuré comme suit : la Section II présente le modèle du robot utilisé et quelques définitions ; la Section III présente la couche de perception de l'espace de travail, avec une brève explication de l'extraction des caractéristiques et détection d'obstacles ; la couche de contrôle de navigation, qui propose une méthode hybride de contrôle (VS+IDWA), est présentée dans la Section IV ; une analyse expérimentale et la validation de la méthode, en utilisant un véhicule autonome virtuel et réel, sont montrées dans la Section V ; et la Section VI présente quelques conclusions et perspectives pour les travaux futurs.

II. DÉFINITIONS GÉNÉRALES

Notre voiture robotisée se déplace dans un espace de travail plan et exécute une tâche d'asservissement visuel référencée image (IBVS) avec une caméra fixe au modèle sténopé. Il suit le centre de la voie décrit par un chemin un fois différentiable dans \mathbb{R}^2 . Nous supposons que le véhicule roule sur la voie et peut toujours la voir. À des fins de validation à basse vitesse, un modèle cinématique d'une voiture à traction avant a été considéré, représenté par :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \sin \theta \cos \phi \\ \sin \phi/l \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2, \quad (1)$$

où la configuration du véhicule est donnée par $q = [x_r \ y_r \ \theta \ \phi]^T$, avec la position (x_r, y_r) et l'orientation (θ) du référentiel de la voiture $\{\mathcal{R}\}$ par rapport au référentiel statique dans le monde $\{\mathcal{O}\}$, et ϕ est l'angle de braquage moyen de chaque roue avant par l'approximation d'Ackerman. Les angles d'orientation et de braquage $(\theta$ et $\phi)$ sont positifs dans le sens antihoraire, avec $\theta \in]-\pi, \pi[$ et

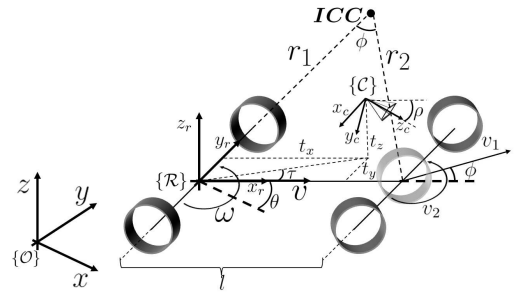


Fig. 2. Diagramme du modèle cinématique d'une voiture à traction avant centrée dans le référentiel \mathcal{R} . Le référentiel de la caméra est représenté en \mathcal{C} .

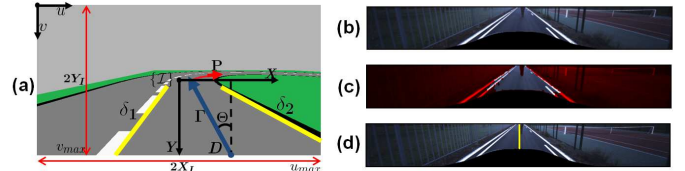


Fig. 3. Plan image $\{\mathcal{I}\}$ de l'environnement de simulation (a) avec la projection du centre de la voie routière P (en rouge) défini par les limites δ_1 et δ_2 (en jaune), sa tangente Γ (en bleu) au point D et l'angle de orientation Θ de Γ à l'axe $-Y$. (b) est une image de l'environnement réel, (c) est le résultat de la segmentation de la route et (d) la ligne tangente résultante.

$\phi \in [-\phi_{max}, \phi_{max}]$. La Figure 2 illustre ces variables. A noter que l'origine de $\{\mathcal{R}\}$ est situé au milieu des deux roues arrières, qui effectue des trajectoires circulaires définies par le centre instantané de rotation (ICC - *Instantaneous Center of Curvature*) et l'approximation de l'angle de braquage ϕ est liée à l'axe de x_r , orienté vers l'avant du véhicule.

L'entrée de contrôle pour le véhicule du modèle (1) est $u = [v_1 \ v_2]^T$, où v_1 est la vitesse linéaire des roues avant et v_2 est la vitesse d'angle de braquage. Dans ce modèle, la vitesse linéaire du robot v est liée à la vitesse des roues avant par $v = v_1 \cos(\phi)$, et la vitesse angulaire $\dot{\theta} = v_1 \cos(\phi)/r_1 = \omega$ est liée à l'angle de braquage (voir la Figure 2), ce qui nous permet de choisir comme entrée de commande du robot $u_r = [v \ \omega]^T$.

La Figure 2 représente aussi le référentiel de la caméra $\{\mathcal{C}\}$ avec la position du centre optique $(x_c, y_c, z_c) = (t_x, t_y, t_z)$ dans le référentiel du robot et une inclinaison constante entre $0 < \rho < \frac{\pi}{2}$ par rapport à l'axe x_r . Dans ce travail, la caméra a été positionnée dans le plan sagittal du robot ($t_y = 0$), qui n'est pas une limitation, et doit être à une certaine hauteur du sol ($t_z > 0$). Enfin, le plan image de la caméra $\{\mathcal{I}\}$ est représenté dans la Figure 3a, avec la taille définie comme $(2X_I, 2Y_I)$.

III. PERCEPTION DE L'ESPACE NAVIGABLE

Comme présenté dans la Figure 1, la perception de l'espace de travail est la première étape pour la tâche de navigation proposée. Cette perception fournit toutes les informations de l'environnement, donnée par un balayage laser et une caméra embarquée, requise pour effectuer la tâche d'asservissement visuel et d'évitement d'obstacles. Ce traitement a été divisé en extraction des caractéristiques 2D, détection d'obstacles et une représentation en grille d'occupation.

Pour la tâche d'asservissement visuel, Cherubini et al. [6]

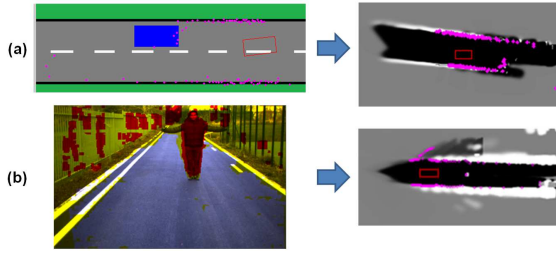


Fig. 4. Détection d'obstacles en simulation (a) et en monde réel (b), avec les grilles d'occupation respectives.

a mis en œuvre une stratégie de suivie de chemin en utilisant un ensemble de caractéristiques pour naviguer un robot non holonome. Le chemin a été défini par la projection sur le plan image d'une ligne blanche visible sur le sol, avec ces caractéristiques calculées dans le plan image $\{Z\}$ pour réaliser une approche IBVS. Ces caractéristiques, comme indiquées dans la Figure 3a, sont liées à la tangente Γ au chemin P , avec un décalage angulaire $\Theta \in]-\pi, \pi[$ de Γ à l'axe $-Y$ (positif dans le sens antihoraire). Dans le présent travail, le chemin P a été défini comme le centre de la voie plus à droite, entre les limites δ_1 et δ_2 . En cas d'absence de marquages au sol, δ_1 et δ_2 définissent la limite de la route. Avec ce chemin, les caractéristiques Γ ont été calculées de façon similaire à celles présentées par Cherubini et al. [6]. Ces caractéristiques peuvent être mieux visualisées sur la Figure 3a.

Ces caractéristiques sont facilement extraites dans l'environnement de simulation (Figure 3a), où la caméra simulée utilise les mêmes paramètres intrinsèques de cela des expérimentations réelles (présentées dans la Section V). Dans le scénario réel (Figure 3b), la détection des caractéristiques a été réalisée dans une image segmentée de la rue, basée en [16], dont le résultat final est dans la Figure 3c. Les caractéristiques finales ont été calculées par la détection des limites de la route, en utilisant une méthode RANSAC, donnant la tangente jaune dans la Figure 3d.

Pour garantir la perception de l'espace de travail et effectuer les manœuvres d'évitement d'obstacles, la grille d'occupation [8] est une utile très importante pour cette tâche. Elle est une technique probabiliste pour représenter l'espace de travail en utilisant les données de capteurs acquises au cours du mouvement du robot. Considérant que seulement l'information à la proximité doit être sur la grille, elle peut être réduite à une fenêtre locale autour du robot, actualisée par le mouvement du véhicule (voir la Figure 1). La grille d'occupation a été remplie avec la perception de la route et des obstacles à partir d'un capteur laser (en simulation) et d'une caméra stéréo (en réel), tel que présentés dans les Figures 4a et 4b. La détection d'obstacle pour les expérimentations réelles est basée sur une combinaison de carte de disparité U/V [11], et projetée dans la grille d'occupation comme décrit dans la Figure 4b. La grille d'occupation est mise à jour par un modèle gaussien bidimensionnel pour chaque mesure des capteurs et le mouvement relatif du châssis du robot. Ce mouvement est estimé en utilisant les informations proprioceptives du robot, comme l'odométrie, la vitesse et l'angle de braquage.

IV. CONTRÔLE HYBRIDE DE LA NAVIGATION

Un contrôleur hybride vise à combiner les atouts des contrôleurs délibératif et réactif. Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'optimisation de la délibération pour suivre une route et la réaction en temps réel pour faire face aux changements de l'environnement. Le contrôle délibératif sera effectué par un asservissement visuel (VS), adapté de Cherubini et al. [6], pour suivre le chemin défini par le centre de la voie de circulation. Le contrôle réactif sera assuré par l'approche de la fenêtre dynamique référencée image (IDWA) [13]. Elle sera également utilisée comme une validation pour les vitesses d'asservissement visuel. Cette section décrit ce contrôleur hybride appelé VS+IDWA dans la Figure 1.

A. Contrôleur délibératif : VS

Cette section rappelle la formulation de l'approche IBVS utilisée par Cherubini et al. [6] pour suivre un chemin défini par une ligne projetée dans le plan image¹. Prenons le plan image présenté dans la Figure 3a et l'ensemble de caractéristiques $s = [X \ Y \ \Theta]^T$ définies par la tangente Γ , comme montré dans la Section III. L'objectif est donc de calculer des entrées de commande qui conduisent ces caractéristiques à la configuration finale $X = \Theta = 0$ et $Y = Y_I$, ce qui signifie le véhicule est dans le centre de la voie. Cet entrée de commande sera définie par une vitesse linéaire constante $v = v_d > 0$ et une vitesse angulaire ω .

Cherubini et al. [6] décrit deux contrôleurs de primitives (lignes et colonnes), qui ont le même principe. Ils doivent établir le lien entre les vitesses des caractéristiques de l'image $\dot{s} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{\Theta}]^T$ et les vitesses du robot $u_r = [v \ \omega]^T$. Tout d'abord, les vitesses \dot{s} doivent être associées aux vitesses de la caméra $u_c = [v_{c,x} \ v_{c,y} \ v_{c,z} \ \omega_{c,x} \ \omega_{c,y} \ \omega_{c,z}]^T$, en utilisant une matrice d'interaction :

$$L_s(X, Y, \Theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_c} & 0 & \frac{X}{z_c} & XY & -1-X^2 & Y \\ 0 & \frac{-1}{z_c} & \frac{Y}{z_c} & 1+Y^2 & -XY & -X \\ \frac{C\rho C^2\Theta}{t_z} & \frac{C\rho C\Theta S\Theta}{t_z} & -\frac{\zeta C\rho C\Theta}{t_z} & -\zeta C\Theta & -\zeta S\Theta & -1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

exprimée pour une caméra des coordonnées normalisées au préalable, avec $C\theta = \cos\theta$, $S\theta = \sin\theta$, $C\rho = \cos\rho$ et $\zeta = (Y \sin\Theta + X \cos\Theta)$. La relation entre \dot{s} et u_c est la suivante :

$$[\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{\Theta}]^T = L_s(X, Y, \Theta)u_c. \quad (3)$$

Notez que chaque ligne de la matrice L_s est liée à sa respective caractéristique dans l'image (L_X , L_Y et L_Θ). Cette matrice exige également une estimation de la distance entre la caméra et le point D de l'image projetée dans le référentiel du monde, donnée par :

$$z_c = \frac{t_z}{\sin\rho + Y \cos\rho}. \quad (4)$$

Ainsi, les vitesses du robot u_r peuvent être exprimées dans le référentiel de la caméra $\{C\}$ par (5) utilisant la transformation homogène (6) :

$$u_c = {}^C T_R u_r, \quad (5)$$

1. Nous rappelons qu'une autre approche d'asservissement visuel peut être également utilisée.

$${}^C T_R = \begin{bmatrix} 0 & -t_x \\ -\sin \rho & 0 \\ \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\cos \rho \\ 0 & -\sin \rho \end{bmatrix} \quad (6)$$

Chaque colonne de la transformation ${}^C T_R$ (T_v et T_ω) est liée à la vitesse du robot. Le contrôleur de ligne doit asservir (X, Θ) à la consigne (X^*, Θ^*) , en ramenant l'erreur $e = [X - X^* \ \Theta - \Theta^*]^T$ vers zéro. Cette tâche est effectuée sous la contrainte $Y = const = Y^*$. Sous cette contrainte les équations d'état du système sont :

$$[\dot{X} \ \dot{\Theta}]^T = A_r v + B_r \omega, \quad (7)$$

avec $A_r = \begin{bmatrix} L_X \\ L_\Theta \end{bmatrix} T_v$ et $B_r = \begin{bmatrix} L_X \\ L_\Theta \end{bmatrix} T_\omega$. Lorsque $B_r \neq 0$, la loi de commande est :

$$\omega = -B_r^+ (\lambda e + A_r v), \quad (8)$$

où $\lambda = [\lambda_X \ \lambda_\Theta]^T$ sont des gains positifs. Le contrôleur pour la colonne peut être défini de manière analogue modifiant les définitions du contrôleur de ligne de X à Y et vice-versa. Pour plus de détails sur la mise en œuvre avec l'analyse de convergence voir [6].

B. Contrôleur réactif : IDWA

L'asservissement visuel (VS) présenté dans la section précédente ne garantit pas la sécurité du mouvement de la voiture, une fois que les obstacles et contraintes, dues à cinématique et dynamique du véhicule, ne sont pas considérés. Pour résoudre ce problème, notre méthode VS+IDWA propose la validation des commandes VS avant d'être appliquées au robot (expliquée dans la Sous-section IV-B.2). L'approche de la fenêtre dynamique (DWA) est une technique d'évitement d'obstacle réactive proposée par [10] qui sélectionne dans l'espace de recherche V_{DW} la meilleure entrée de commande pour le robot sous certaines conditions. Elle prend en compte la somme pondérée de trois fonctions basées sur la position de destination (*head*), la distance de collision (*dist*) et la vitesse linéaire désirée (*vel*), dans la fonction objective (9).

$$DWA(v, \omega) = \alpha head(v, \omega) + \beta dist(v, \omega) + \gamma vel(v). \quad (9)$$

Si les vitesses VS ne sont pas valides, la fonction objective de la DWA est optimisée pour retourner une nouvelle entrée de vitesse valide. Cependant, il faut aussi garantir que l'objectif du VS soit considéré par la DWA pour essayer de suivre la voie en évitant les obstacles. Pour cela, dans notre travail précédent [13] une nouvelle approche pour la DWA a été présentée, qui considère les caractéristiques 2D de l'image pour asservir le robot sur la voie et les caractéristiques 3D pour éviter les obstacles. Ce contrôleur réactif a été nommé *Approche de la fenêtre dynamique référencée image* (IDWA). Une nouveauté dans la méthode proposée dans cet article concerne la fonction *head* de la fonction objective (9), comme expliqué ci-dessous.

B.1 Les fonctions de l'IDWA

La fonction *head*(v, ω), dans la formulation originale de la DWA [10], est responsable pour guider le robot à une position désirée sur la voie. Elle calcule un poids plus élevé aux commandes de vitesses qui conduisent le robot à une orientation plus proche de la position finale désirée. Basé sur la localisation du robot, la position finale est précisément connue dans le monde. Toutefois, dans l'application de VS dans notre méthode la localisation du robot n'est pas nécessaire et l'objectif de régulation est d'asservir le robot au milieu de la voie, où les caractéristiques dans l'image disposent d'un erreur plus proche de zéro (voir la Sous-section IV-A).

La régulation des erreurs d'asservissement effectuée par le VS se fait dans ligne (X, Θ) et colonne (Y, Θ) , avec les caractéristiques de la Figure 3a. Afin de permettre l'IDWA de régler ces erreurs, la fonction *head*(v, ω) a été divisée en : $XY_{error}(v, \omega)$, responsable pour l'erreur en X ou Y ; et $\Theta_{error}(v, \omega)$ avec l'erreur en Θ . L'objectif principal de ces fonctions est d'estimer la position de la tangente Γ , formée dans le plan image suivant $(\mathcal{I}_{t+\Delta t})$, si la commande (v, ω) est appliquée. Cela peut être effectué en utilisant les équations (3) et (5) pour estimer la vitesse des caractéristiques visuelles \dot{s} et en intégrant les valeurs calculées dans le temps (voir [13] pour plus de détails). Les valeurs finales sont calculées par :

$$XY_{error} = \begin{cases} 1 - \frac{|e_X|}{e_{Xmax}}, & \text{si contrôleur de ligne,} \\ 1 - \frac{|e_Y|}{e_{Ymax}}, & \text{si non.} \end{cases} \quad (10)$$

$$\Theta_{error} = 1 - \frac{|e_\Theta|}{\pi},$$

où e_X , e_Y et e_Θ sont les erreurs des caractéristiques dans le plan image $\mathcal{I}_{t+\Delta t}$ et e_{Xmax} et e_{Ymax} sont les erreurs maximales en X et Y . La valeur finale est définie comme :

$$head(v, \omega) = \alpha_1 XY_{error}(v, \omega) + \alpha_2 \Theta_{error}(v, \omega), \quad (11)$$

où α_1 et α_2 sont des paramètres de pondération.

La fonction suivante *dist*(v, ω) est la distance normalisée de collision, calculée pour des robots polygonaux comme proposé en [1]. La dernière fonction *vel*(v) est calculée par rapport la vitesse linéaire désirée v_d du VS, comme suit :

$$vel = \begin{cases} \frac{v}{(v_d - v_{min})} & \text{si } v \leq v_d, \\ \frac{(v_{max} - v)}{(v_{max} - v_d)} & \text{si } v > v_d. \end{cases} \quad (12)$$

B.2 L'espace de recherche V_{DW} et la validation du VS

Initialement, pour la vitesse actuelle du robot (v_a, ω_a) , la fenêtre dynamique V_d est définie par toutes les vitesses atteignables dans un intervalle de temps Δt :

$$V_d = \{(v, \omega) \mid v \in [v_a - \dot{v}\Delta t, v_a + \dot{v}\Delta t], \\ \omega \in [\omega_a - \dot{\omega}\Delta t, \omega_a + \dot{\omega}\Delta t]\}, \quad (13)$$

par l'entrée de commande $u_r = [v \ \omega]^T$ et les accélérations $(\dot{v}, \dot{\omega})$.



Fig. 5. Véhicule robotisé du projet ROBOTEX (a) et la piste d'essais Seville avec le trajet réalisé en rouge (b).

Ensuite, chaque vitesse accessible doit être classée comme admissible ou non en raison de la distance de collision (fonction $dist(v, \omega)$) et les accélérations de freinage maximales du robot (\dot{v}_b , $\dot{\omega}_b$). Si cette distance est plus grande que la distance nécessaire pour arrêter en toute sécurité le véhicule, la vitesse est admissible. L'ensemble résultant est défini comme :

$$V_a = \{(v, \omega) \mid v \leq \sqrt{2 \cdot dist(v, \omega) \cdot \dot{v}_b}, \omega \leq \sqrt{2 \cdot dist(v, \omega) \cdot \dot{\omega}_b}\}. \quad (14)$$

Enfin, l'espace de recherche de la fenêtre dynamique, considérant la vitesse actuelle du véhicule, les accélérations, la dimension du robot et les obstacles dans l'espace de travail, est calculé comme suit :

$$V_{DW} = V_d \cap V_a \cap V_s, \quad (15)$$

où V_s est l'ensemble de vitesses limitées par les accélérations maximales \dot{v}_{max} et $\dot{\omega}_{max}$. Par discrétisation de V_{DW} , la vitesse doit être sélectionnée en respectant les critères présentés par la fonction objectif (9).

L'espace de recherche V_{DW} (Eq. 15) est utilisé pour valider l'entrée de commande calculée à partir de l'approche VS. Si l'entrée de commande u_r du VS (Eq. 8) n'appartient pas à V_{DW} , une nouvelle entrée de commande est calculée par l>IDWA. Cette validation se fait nécessaire parce que, dans l>IDWA, le suivi la route et l'évitement d'obstacles sont des tâches opposées, et la convergence vers le centre de la route peut être compromise [13], comme montré dans les résultats suivants.

V. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Pour valider la méthodologie de navigation proposée, quelques essais dans des environnements de simulation et réel ont été réalisés. Dans ces situations, le véhicule se déplace en respectant ses contraintes cinématiques et dynamiques des actionneurs. Les paramètres de l'expérimentation ont été définis comme étant les mêmes de notre véhicule électrique robotisée du projet ROBOTEX de la Figure 5a. Pour la perception de la route, le véhicule utilise une caméra monoculaire avec une longueur focale de $1,8mm$ et champ de vision de $\simeq 140^\circ$. La caméra est montée dans une structure rigide et positionnée à $(t_x, t_y, t_z) = (1.54, 0.0, 1.62)m$, dans le repère du véhicule, et avec une inclinaison $\rho \simeq 9.5^\circ$. Il détecte également les obstacles avec un capteur laser de 180° de couverture (pour les expérimentations en simulation) ou une caméra de vision stéréo (pour les expérimentations réelles).

La simulation a été effectuée dans un simulateur construit avec Matlab, Figure 6a. En utilisant seulement

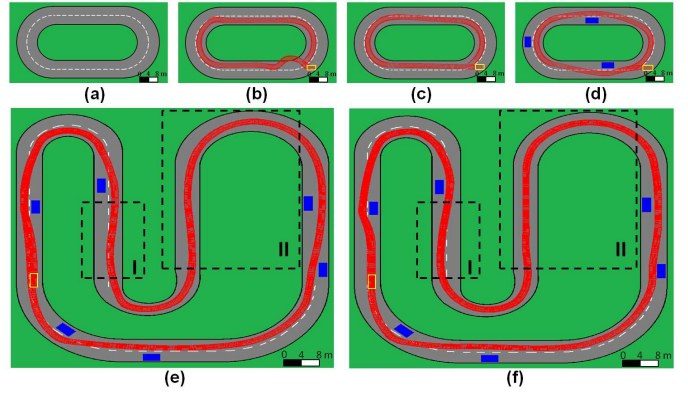


Fig. 6. Exemple de l'environnement de simulation (a) et le résultat du contrôleur délibératif (VS) avec $\lambda = 0,7$ (b). La solution hybride VS+IDWA pour la même tâche est en (c) et avec quelques obstacles statiques en (d), où $\lambda = 0,7$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,1$, $\beta = 2,0$, et $\gamma = 3,0$. A titre de comparaison, la trajectoire de la voiture en utilisant uniquement le contrôleur réactif IDWA et la solution complète VS+IDWA intégrant les contrôleurs délibératif et réactif est en (e) et (f) respectivement (voir les zones I et II). La pose initiale de la voiture est représentée en jaune et en rouge sont ses positions instantanées pour un mouvement dans le sens horaire.

le contrôleur délibératif (VS) pour suivre le centre de la voie plus à droite, similaire à la Figure 3a, le parcours du véhicule commandé est illustré dans la Figure 6b². Cette figure montre que la méthode référencée image (IBVS) n'est pas robuste pour converger vers le centre de la voie, et dépasse les limites de la voie une fois que les obstacles ne sont pas considérés.

Pour éviter le problème de convergence, le contrôleur hybride VS+IDWA a été appliqué considérant les limites de la route, les obstacles et les variations de vitesse linéaire nécessaires. Les gains α , β et γ de l'équation 9, ont été ajustés de manière similaire au résultat présenté en [13]. Le résultat final du VS+IDWA est montré dans les Figures 6c, 6d et 6f, où les gains ont été définis comme $\lambda = 0,7$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,1$, $\beta = 2,0$, et $\gamma = 3,0$ afin de garantir un mouvement qui suit les caractéristiques du VS et évite les obstacles doucement. Les Figures 6e et 6f présentent une comparaison entre la commande réactif de l>IDWA seule et le contrôleur hybride VS+IDWA (proposée dans cet article). Le véhicule autonome évite les obstacles dans les deux cas, mais quand il n'y a pas d'obstacles frontaux, la solution hybride présente une meilleure performance pour guider le robot vers le centre de la voie. Ceci est possible grâce à la partie délibérative fait par le VS.

Les sorties du VS et VS+IDWA sont présentées dans la Figure 7, qui montre 30 secondes de simulation dans une manœuvre d'évitement d'obstacles. Comme prévu, lorsque la sortie du VS est admissible, elle est conservée par l>IDWA et directement appliquée sur le robot (premiers 10 secondes dans les Figures 7b-c). Cependant, après 10 secondes l>IDWA commence à modifier la sortie du VS afin de garantir l'évitement d'obstacle et l'arrêt complet de la voiture.

L'essai avec la voiture robotisée a été réalisé dans un circuit de test, montré dans la Figure 5b. Le robot se déplace

2. Ce parcours est donné à de fins d'explications. Dans notre méthodologie, il n'y a aucune planification de trajectoire a priori.

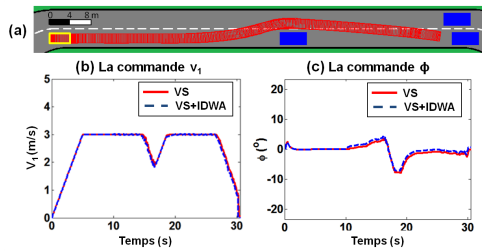


Fig. 7. La vitesse linéaire v_1 (b) et l'angle de braquage ϕ (c) calculées par le VS et le VS+IDWA dans le trajet simulé en (a).

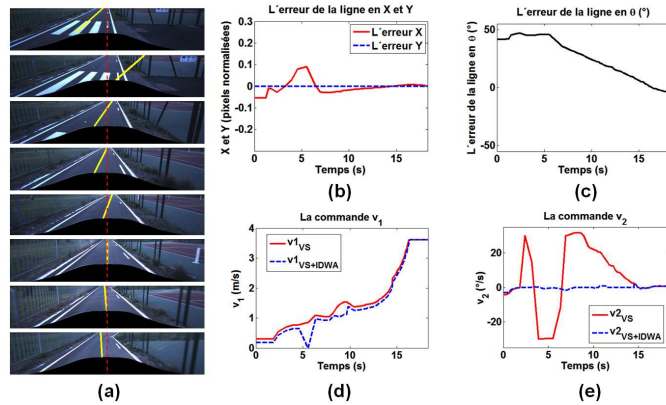


Fig. 8. Suivi du centre de la route par le contrôleur hybride VS+IDWA, avec l'évolution des caractéristiques en (a) et les erreurs X/Y et Θ en (b) et (c). Les commandes finales calculées par le VS et le VS+IDWA sont en (d) et (e).

en respectant les limites de la route et la vitesse linéaire souhaitée de $1,5\text{m/s}$. Comme prévu, le contrôleur hybride VS+IDWA a été capable d'asservir le robot sur la voie de navigation en évitant les obstacles. Les Figures 8b-c montrent la régulation des erreurs d'asservissement vers zéro, même en présence de variations considérables dans la détection des caractéristiques. La validation des vitesses du VS dans l'IDWA est montrée dans les Figures 8d-e, où la vitesse linéaire et de l'angle de braquage ont été limitée par l'approche actuelle. Après 15 secondes, les erreurs s'approchent vers zéro (ligne pointillée rouge) et le contrôle VS est appliqué directement.

VI. CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS

Ce travail a présenté une approche de navigation locale pour les voitures robotisées en milieu urbain, combinant un asservissement visuel avec une approche de la fenêtre dynamique référencée image, résultant dans le contrôleur hybride VS+IDWA. En utilisant seulement le contrôleur délibératif VS, le suivi de la route n'était pas garanti, en raison de certaines limitations comme : problèmes pour converger à la voie, la vitesse linéaire constante et les obstacles non considérés. Le VS+IDWA a été validé en simulation dans des différents scénarios. Un essai réel avec la voiture robotisée a également montré la viabilité de la méthode proposée. À l'avenir, pour augmenter la vitesse du véhicule, un modèle dynamique et quelques améliorations dans la couche de perception de l'espace de travail seront considérés. Nous intégrerons une stratégie de navigation globale, en gérant les intersection des voies et la gestion des round-points, comme en [17].

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé et financé par l'Equipex ROBOTEX (Référence ANR-10-EQPX-44- 01). Il a été aussi soutenu par le projet VERVE de la région Picardie, le gouvernement français, à travers le programme «Investissements pour l'avenir» géré par l'Agence Nationale de la Recherche et le Fonds Européen de Développement Régional FEDER. Les auteurs tiennent à remercier l'assistance de Gérald Dherbomez, Giovanni B. Vitor, Pierre Hudelaine et Thierry Monglon pendant les essais réels.

RÉFÉRENCES

- [1] Arras K., Persson J., Tomatis N. et Siegwart R. Real-time obstacle avoidance for polygonal robots with a reduced dynamic window. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '02, Washington, DC, États-Unis, 11-15 mai 2002.
- [2] Bonin-Font, F., Ortiz A. et Oliver G. Visual Navigation for Mobile Robots : A Survey. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 53, n° 3, pp. 263-296, 2008.
- [3] Buehler M., Lagnemma K. et Singh S. (Eds.) Special issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, part I-III. *Journal of Field Robotics*, vol. 470, n° 25, pp. 423-860, 2008.
- [4] Cadenat V., Swain R., Soueres P. et Devy M. A controller to perform a visually guided tracking task in a cluttered environment. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '99, Kyongju, Corée du Sud, 17-21 octobre 1999.
- [5] Chaumette F., et Hutchinson S. Visual servo control. I. Basic approaches. *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 13, n° 4, pp. 82-90, 2006.
- [6] Cherubini A., Chaumette F. et Oriolo G. Visual servoing for path reaching with nonholonomic robots. *Robotica*, vol. 29, n° 12, pp. 1037-1048, 2011.
- [7] Cherubini A. et Chaumette F. Visual navigation of a mobile robot with laser-based collision avoidance. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 2, pp. 189-205, 2013.
- [8] Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer*, vol. 22, no. 6, pp. 46-57, 1989.
- [9] Espiau B., Chaumette F. et Rives P. A new approach to visual servoing in robotics. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 313-326, 1992.
- [10] Fox D., Burgard W. et Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 23-33, 1997.
- [11] Labayrade R., Aubert D. et Tarel J. P. Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through "V-disparity" representation. IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, IV '2002, Versailles, France, 17-21 juin 2002.
- [12] Lima D.A. et Pereira G.A.S. Navigation of an autonomous car using vector fields and the dynamic window approach. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 24, n° 1-2, pp. 106-116, 2013.
- [13] Lima D.A. et Victorino A.C. An image based dynamic window approach for local navigation of an autonomous vehicle in urban environments. IEEE ICRA Workshop on Modelling, Estimation, Perception and Control of All Terrain Mobile Robots (WMEPC), Hong Kong, Chine, 31 mai-7 juin 2014.
- [14] Luettel T., Himmelsbach M. et Wuensche H.J. Autonomous ground vehicles - concepts and a path to the future. *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n° Special Centennial Issue, pp. 1831-1839, 2012.
- [15] Malis E., Chaumette F. et Boudet S. 2 1/2D visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 2, pp. 238-250, 1999.
- [16] Neto A.M., Victorino A.C., Fantoni I. et Ferreira J. Real-time estimation of drivable image area based on monocular vision. IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops, IV '13 Workshops, Gold Coast, Australie, 23-26 juin 2013.
- [17] Pereira E.C.M., Lima D.A., Victorino A.C. Autonomous vehicle global navigation approach associating sensor based control and digital maps. IEEE International Conference Robotics and Biomimetics, ROBIO '14, Bali, Indonésie, 5-10 decembre 2014.
- [18] Silveira G., Malis E. et Rives P. Visual servoing over unknown, unstructured, large-scale scenes. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006, Orlando, FL, États-Unis, 15-19 mai 2006.