Assistance à la conduite de fauteuil roulant électrique (FRE) sur un trottoir : une preuve de concept

Louise Devigne[1,3], François Pasteau[2], Nicolas Le Borgne[3],
Marie Babel[3], Tom Carlson[4] and Philippe Gallien[1]

***Abstract*— L'utilisation d'un FRE permet de conserver une autonomie de déplacement et de ce fait de maintenir des activités quotidiennes. Une telle aide technique joue un rôle majeur dans la qualité de vie des personnes en situation de handicap moteur. Cependant, conduire un FRE est une tâche complexe. L'une des difficultés majeures rencontrées est la présence d'obstacles négatifs dans l'environnement tels que les marches d'un escalier ou le bord d'un trottoir. En effet, les chutes sont l'une des principales causes d'accidents liées à la conduite d'un FRE. Ainsi, afin de fournir une aide à la navigation efficace, un système d'assistance à la conduite de FRE devrait non seulement empêcher l'utilisateur de se heurter à l'environnement, mais aussi de tomber d'un trottoir. Afin de répondre à ces attentes, nous proposons une solution d'aide à la conduite semi-autonome sous la forme de suivi de trottoir. Nous présentons des simulations ainsi qu'une expérience réalisée avec notre solution embarquée sur un FRE. Dans les deux cas, notre méthode permet une correction de la trajectoire du FRE lorsque l'utilisateur s'approche d'un bord de trottoir. Les résultats obtenus fournissent ainsi une preuve de concept de notre méthode.**

I. Introduction

Certaines personnes en situation de handicap moteur peuvent bénéficier de l'utilisation d'une FRE pour avoir plus de mobilité et être plus indépendants. Cependant l'utilisation d'appareils motorisés n'est pas sans risques et des accidents peuvent se produire. Dans une étude portant sur la prévalence d'accidents en fauteuil roulant incluant 95 participants, 54.7% ont rapporté avoir eu au moins 1 accident dans les 3 dernières années [1].

Dans ce contexte, de nombreuses équipes de recherche sont impliquées dans le développement de solutions d'assistance à la conduite de FRE. En effet, une aide à la conduite peut être apportée sous la forme d'une assistance autonome [2] [3] [4] ou semi-autonome [5] [6] à la navigation en FRE consistant en un évitement d'obstacles. Cependant, les systèmes jusqu'ici développés sont restreints à une utilisation en intérieur car ils n'apportent pas d'assistance lorsque des différences d'élevation du sol sont rencontrées.

Pourtant, des études récentes mettent en lumière les bénéfices de l'utilisation d'appareils motorisés dans le cadre d'activités en extérieur [7] [8]. En effet, ces études montrent que l'utilisation de ce type d'aide à la mobilité peut améliorer l'estime de soi et le sentiment d'indépendance de l'utilisateur car cela lui permet d'accéder plus facilement aux activités en extérieur et de maintenir des activités quotidiennes favorisant le lien social. Ainsi, des solutions d'aide à la navigation en FRE en extérieur doivent également être développées. En effet, parmi les 3 catégories d'accidents ayant eu lieu lors de la conduite d'un FRE identifiées dans [1], 87.7% étaient des chutes. De plus, une étude sous la forme d'interviews d'usagers, soignants et prescripteurs met l'accent sur l'impact des obstacles environnementaux sur la sécurité lors la conduite en extérieur notamment sur les difficultés rencontrées avec les bordures de trottoirs [9].

Alors qu'un travail conséquent des équipes de recherche a été investi dans le domaine de la robotique sur la détection d'obstacles dans l'environnement et les moyens d'éviter les collisions avec ceux-ci, il y a eu beaucoup moins de travaux sur la détection d'obstacles négatifs pour améliorer la navigation en extérieur. Les quelques méthodes proposées [10] [11] sont typiquement basées sur une détection par stéréo vision ou par des capteurs coûteux comme les télémètres lasers. De plus, ces solutions représentent généralement la présence d'obstacles dans une grille d'occupation et reposent sur la définition de cartes locales de l'environnement.

Dans le domaine de la recherche portant sur la navigation en FRE, seulement quelques travaux ont porté sur la détection des obstacles négatifs. Les solutions présentées dans [12] et [13] stoppent le FRE lorsqu'un dénivelé est détecté. Une détection des bords des obstacles via une mesure par stéréo vision est proposée dans [14] mais cette méthode a des limitations importantes telles que l'absence de détection de certains bords de trottoirs ainsi que des fausses détections. Certes, des travaux sur la détection d'obstacles négatifs avec un FRE robotisé ont été menés. Cependant, aucune loi de commande n'a été proposée pour assister l'utilisateur pendant la conduite de FRE dans un environnement comportant des obstacles négatifs.

Dans cet article, nous présentons une solution bas coût en contrôle partagé de suivi de trottoir qui repose sur le même principe que l'approche présentée dans [15]. Cette méthode a été appliquée à l'assistance à la navigation en intérieur et a déjà été testée et validée par des usagers lors d'essais cliniques réalisés au Centre MPR Saint Hélier à Rennes. Ici, nous adaptons ce principe à la navigation dans un environnement comportant des dénivelés. La loi de commande repose sur une méthode d'asservissement basée capteurs avec un faible coût de calcul. Par conséquent, la méthode proposée ne repose pas sur la définition d'une carte locale de l'environnement autour du fauteuil et est capable

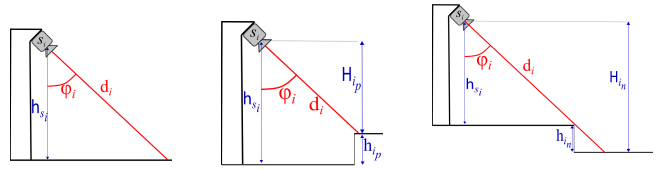
[1] Centre MPR Pôle Saint Hélier, Rennes, France.
[2] Ergovie, Rennes, France.
[3] Univ Rennes, INSA, CNRS, Inria, Irisa-UMR6074, F-35000 Rennes, France.
[4] Aspire Centre of Rehabilitation and Assistive Technology, University College London, UK.

de corriger la trajectoire du FRE à l'approche d'un bord de trottoir.

L'article est organisé comme suit. La Section II présente la méthode de détection des obstacles négatifs. La Section III présente la méthode de correction de trajectoire. Les simulations de la méthode proposée son présentées dans la Section IV. Enfin, une expérience menée avec un FRE de série effectuée au sein du laboratoire PAMELA de l'UCL à Londres est presentée et commentée dans la Section V.

II. Détection des obstacles

Pour détecter les obstacles négatifs autour du FRE, nous utilisons des capteurs de distance montés sur le FRE orientés vers le sol. Ici, l'idée est de fournir une preuve de concept de la méthode, la distance au sol mesurée par chaque capteur est donc utilisée pour calculer la distance dans le plan horizontal entre le capteur et le bord du trottoir détecté, nous ramenant donc dans la même configuration que dans [15].



(a) Pas d'obstacle détecté

(b) Détection d'un obstacle positif

(c) Détection d'un obstacle négatif

Fig. 1: Détection des bords de trottoir.

Comme présenté en Fig. 1, soient

- d_i la distance mesurée par le capteur s_i,
- h_{s_i} la hauteur du capteur s_i par rapport au sol,
- φ_i l'orientation du capteur par rapport à la verticale,
- h_{i_n} la hauteur de l'obstacle négatif,
- h_{i_p} la hauteur de l'obstacle positif,
- $H_{i_n} = h_{s_i} + h_{i_n}$ la hauteur du capteur s_i par rapport au niveau de l'obstacle négatif,
- $H_{i_p} = h_{s_i} - h_{i_p}$ la hauteur du capteur s_i par rapport au niveau de l'obstacle positif.

On distingue 3 cas pour la détection:

1) si on définit h_{i_p} comme la hauteur minimum de l'obstacle positif détecté, alors un obstacle positif est détecté quand

$$d_i < d_{i_p} = \frac{h_{s_i} - h_{i_p}}{\cos(\varphi_i)} = \frac{H_{i_p}}{\cos(\varphi_i)},$$

alors la distance du capteur à l'obstacle est définie comme

$$x_i = d_i \sin(\varphi_i).$$

2) si on définit h_{i_n} comme la hauteur minimum de l'obstacle négatif détecté, alors un obstacle négatif est détecté quand

$$d_i > d_{i_n} = \frac{h_{s_i} + h_{i_n}}{\cos(\varphi_i)} = \frac{H_{i_n}}{\cos(\varphi_i)},$$

alors la distance du capteur à l'obstacle est définie comme

$$x_i = h_{s_i} \cos(\varphi_i).$$

3) tant que le distance d_i mesurée par le capteur s_i est telle que $d_{i_p} \leq d_i \leq d_{i_n}$, on peut considérer qu'aucun obstacle n'est détecté. Alors, la distance du capteur à l'obstacle est définie par $x_i = x_m$ avec x_m la distance maximum qu'un capteur peut mesurer.

III. Solution d'assistance à la navigation

Dans un précédent article, nous avons présenté une approche d'assistance à la conduite de FRE semi-autonome sous la forme d'un évitement d'obstacles par une adaptation progressive de la trajectoire du FRE [15]. Jusqu'ici, nous avons restreint l'application de cette méthode la navigation en intérieur car celle-ci ne reposait que sur la détection d'obstacles positifs. Ici, bien que la méthode repose sur le même principe, nous précisons les calculs des contraintes sur les vitesses linéaire et angulaire du FRE déduites des mesures des capteurs de distance. En particulier, nous précisons les calculs d'estimation de l'orientation de l'obstacle détecté. Cette information supplémentaire permet d'effectuer une correction de la trajectoire plus confortable pour l'utilisateur à l'approche d'un obstacle.

A. Modèle

Comme présenté sur la Fig. 2, on définit les notations suivantes, soient

- $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u & \omega \end{bmatrix}^T$ la vitesse du FRE robotisé avec u et ω respectivement la vitesse linéaire et la vitesse angulaire,
- $\mathbf{v}_{s_i} = \begin{bmatrix} u_{s_i} & \omega_{s_i} \end{bmatrix}^T$ la vitesse du capteur s_i avec u_{s_i} et ω_{s_i} respectivement la vitesse linéaire et la vitesse angulaire du capteur s_i,
- x_i la distance du capteur s_i à l'obstacle,
- θ_i l'orientation du capteur s_i par rapport à l'axe Z_r du FRE robotisé,
- x_i^* la distance autorisée minimum du capteur s_i à l'obstacle,
- $e_{s_i} = x_i - x_i^*$ l'erreur entre x_i et x_i^*,
- α_i l'angle formé par l'axe X_i du capteur s_i et la perpendiculaire à l'obstacle détecté.

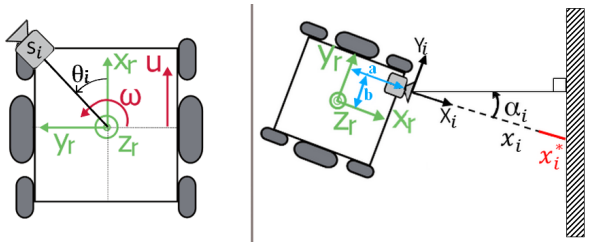


Fig. 2: Définition du repère du FRE robotisé.

La translation entre le repère du capteur s_i et le repère du FRE est donnée par ${}^{s_i}\mathbf{t}_r = \begin{bmatrix} a & b & 0 \end{bmatrix}^T$ avec a et b définis sur la Fig. 2. La matrice de rotation du repère du capteur s_i par rapport au repère du FRE robotisé ${}^{s_i}\mathbf{R}_r$ est donnée par

$$ {}^{s_i}\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1) $$

Avec ${}^{s_i}\mathbf{R}_r$ et ${}^{s_i}\mathbf{t}_r$, la matrice de transformation est donnée par

$$ {}^{s_i}\mathbf{W}_r = \begin{bmatrix} {}^{s_i}\mathbf{R}_r & [{}^{s_i}\mathbf{t}_r]_\times {}^{s_i}\mathbf{R}_r \\ \mathbf{0}_{3\times3} & {}^{s_i}\mathbf{R}_r \end{bmatrix}. \quad (2) $$

avec $[\ ]_\times$ l'expression de la matrice antisymétrique. La vitesse du capteur s_i dans le repère capteur $\mathbf{v}_{s_i}$ est obtenue à partir de la vitesse du fauteuil $\mathbf{u}$ dans le repère fauteuil à partir de

$$ \mathbf{v}_{s_i} = {}^{s_i}\mathbf{T}_r \mathbf{u}, \quad (3) $$

avec

$$ {}^{s_i}\mathbf{T}_r = {}^{s_i}\mathbf{W}_r {}^{r}\mathbf{J}_r, \quad (4) $$

où ${}^{r}\mathbf{J}_r$ est la jacobienne du fauteuil exprimée dans le repère du fauteuil :

$$ {}^{r}\mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (5) $$

Cela mène à

$$ {}^{s_i}\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} T_{v_0} & T_{v_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{w_0} & T_{w_1} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6) $$

avec

$$ \begin{cases} T_{v_0} = \cos(\theta_i) \\ T_{v_1} = \sin(\theta_i) \\ T_{w_0} = -b\cos(\theta_i) + a\sin(\theta_i) \\ T_{w_1} = a\cos(\theta_i) + b\sin(\theta_i). \end{cases} \quad (7) $$

B. Asservissement basé capteur

Comme présenté dans [15], on peut définir une matrice d'interaction $\mathbf{L}_{x_i}$ pour chaque capteur s_i telle que

$$ \dot{x_i} = \mathbf{L}_{x_i} \mathbf{v}_{s_i}. \quad (8) $$

La matrice d'interaction $\mathbf{L}_{x_i}$ qui est introduite et définie dans [16] et [17], est telle que

$$ \mathbf{L}_{x_i} = \begin{bmatrix} -1 & tan(\alpha_i) & 0 & 0 & 0 & x_i \tan(\alpha_i) \end{bmatrix}, \quad (9) $$

avec α_i l'angle formé par l'axe X_i du capteur s_i et la perpendiculaire à l'obstacle détecté (Fig. 2).

À partir de la seule distance mesurée par le capteur s_i, il n'est pas possible de déterminer l'orientation de l'obstacle détecté. Alors, en considérant que l'obstacle détecté par le capteur s_i est perpendiculaire à l'axe X_i du capteur s_i, on approxime $\alpha_i \simeq 0$ pour le calcul de la matrice d'interaction $\mathbf{L}_{x_i}$. Cela mène à

$$ \mathbf{L}_{x_i} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10) $$

Afin de corriger la trajectoire du fauteuil, on contraint la distance x_i mesurée par le capteur s_i avec une valeur minimum λe_{s_i} avec $\lambda > 0$. On obtient alors

$$ \mathbf{L}_{x_i} {}^{s_i}\mathbf{T}_r \mathbf{u} \geq -\lambda e_{s_i}. \quad (11) $$

En utilisant les équations (4) et (10), on obtient

$$ \mathbf{L}_{x_i} {}^{s_i}\mathbf{T}_r \mathbf{u} = -\begin{bmatrix} T_{v_0} & T_{w_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (12) $$

Alors, l'inégalité (11) peut être ré-écrite comme suit

$$ \mathbf{A}_i \mathbf{u} \geq B_i \quad (13) $$

avec $\mathbf{A}_i = \mathbf{L}_{x_i} {}^{s_i}\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} -T_{v_0} & -T_{w_0} \end{bmatrix}$ et $B_i = -\lambda e_{s_i}$. On définit alors un demi-plan dans le domaine des vitesses du fauteuil (u, ω) représenté en vert sur la Fig. 3.

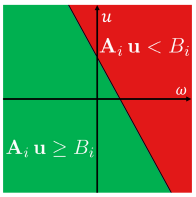


Fig. 3: Demi-plan calculé dans le plan (u, ω) à partir de la contrainte déduite de la distance mesurée par le capteur s_i.

C. Cas particulier des capteurs montés aux coins du fauteuil

La configuration géométrique aux coins du fauteuil permet d'utiliser les informations de distance mesurées par les capteurs voisins du capteur s_i afin d'estimer l'orientation α_i de l'obstacle détecté. Cette estimation n'est cependant pas prise en compte dans le calcul de la matrice d'interaction $\mathbf{L}_{x_i}$ mais est plutôt utilisée pour modifier virtuellement l'orientation du capteur s_i pour que son axe X_i soit perpendiculaire à l'obstacle.

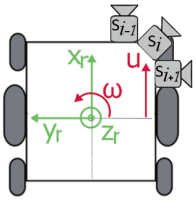


Fig. 4: Configuration des capteurs au coin du fauteuil.

Alors, on place 3 capteurs à chaque coin du fauteuil avec la configuration présentée sur la Fig. 4. On peut calculer l'orientation de l'obstacle détecté par le capteur de coin s_i en calculant les distances mesurées par les 3 capteurs s_{i-1}, s_i et s_{i+1} (Fig. 4). On obtient l'estimation $\hat{\alpha_i}$ de α_i avec une moyenne pondérée par l'inverse des distances mesurées :

$$ \hat{\alpha_i} = \frac{1}{\sum_{j=i-1}^{i+1} \frac{1}{x_j}} \sum_{j=i-1}^{i+1} \frac{\theta_j - \theta_i}{x_j}. \quad (14) $$

Grâce à cette information supplémentaire, on peut définir une nouvelle matrice $\mathbf{A}'_i$ qui prend en compte $\hat{\alpha_i}$ telle que

$$ \mathbf{A}'_i = \begin{bmatrix} -T'_{v_0} & -T'_{w_0} \end{bmatrix} \quad (15) $$

avec

$$\begin{cases} T'_{v_0} = T_{v_0}\cos(\hat{\alpha_i}) + T_{v_1}\sin(\hat{\alpha_i}) \\ T'_{w_0} = T_{w_0}\cos(\hat{\alpha_i}) + T_{w_1}\sin(\hat{\alpha_i}). \end{cases} \quad (16)$$

Alors, on estime α_i pour chaque capteur de coin s_i en utilisant les mesures de distance des 3 capteurs formant les modules de détection montés à chaque coin du fauteuil.

Cela permet de ré-écrire le problème de la manière suivante

$$\begin{cases} \mathbf{A}'_i\,\mathbf{u} \geq B_i, \text{ si } s_i \text{ es un capteur d'angle} \\ \mathbf{A}_i\,\mathbf{u} \geq B_i, \text{ sinon,} \end{cases} \quad (17)$$

avec

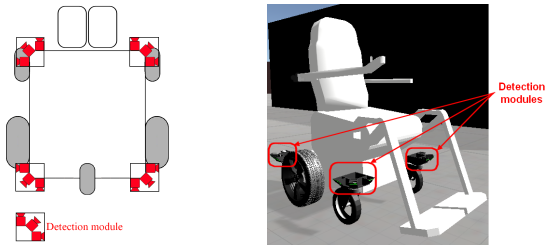
- $\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} -T_{v_0} & -T_{w_0} \end{bmatrix}$ définissant le demi-plan correspondant à la contrainte déduite du capteur s_i dans le plan (u, ω),
- $\mathbf{A}'_i = \begin{bmatrix} -T'_{v_0} & -T'_{w_0} \end{bmatrix}$ définissant un demi-plan adapté pour les capteurs de coin en utilisant l'estimation $\hat{\alpha_i}$ de l'orientation α_i de l'obstacle détecté,
- B_i = -λe_{s_i}.

IV. Simulations

Dans cette section, nous présentons les résultats d'une mise en situation effectuée sur le simulateur de conduite de FRE que nous avons présenté dans [18].

A. Configuration de la simulation

Dans le cadre des travaux présentés ici, le simulateur a été utilisé comme plateforme de développement et tests pour la solution d'assistance à la navigation sur trottoir.



(a) Configuration des capteurs. (b) FRE virtuel.

Fig. 5: Configuration du FRE virtuel pour la simulation.

Le FRE virtuel (Fig. 5b) est ici équipé d'un total de 12 capteurs de distance répartis en 4 modules de détection placés aux coins du FRE virtuel (Fig. 5a). Comme représenté en Fig. 6, l'environnement virtuel consiste en un trottoir en forme de "L" de 15 cm de hauteur, 1.2 m de largeur et 5 m de longueur avec un tournant à droite. Les paramètres de vitesse du FRE ont été fixés à une vitesse linéaire maximum de $0.5\,m.s^{-1}$ et une vitesse angulaire maximum de $0.5\,rad.s^{-1}$.

B. Résultats de la simulation

La position initiale du FRE virtuel est représentée en Fig. 6. Afin de montrer les propriétés de la solution d'aide à la navigation proposée, les commandes en vitesse linéaire et angulaire sont imposées constantes et fixées aux valeurs maximum soit une commande en vitesse linéaire de $0.5\,m.s^{-1}$ et

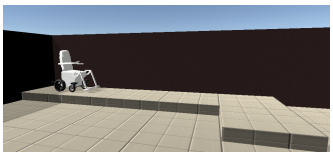
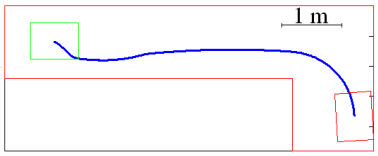
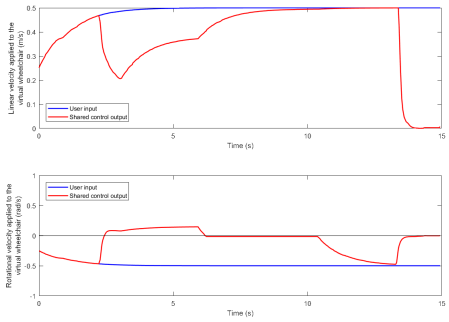


Fig. 6: Environnement virtuel pour la simulation.

une commande en vitesse angulaire de $0.5\,rad.s^{-1}$. Le FRE reçoit donc comme consigne de se diriger en avant et vers la droite.



(a) Trajectoire du fauteuil virtuel en simulation



(b) Vitesses linéaires et angulaires appliquées au fauteuil virtuel

Fig. 7: Résultats de la simulation: (a) Trajectoire du fauteuil virtuel dans l'environnement virtuel. Les rectangles représentent le fauteuil en position initiale (en vert) et en position finale (en rouge). (b) Vitesses linéaires et angulaires imposées au fauteuil virtuel (en bleu), vitesses appliquées par le système d'assistance à la navigation (en rouge).

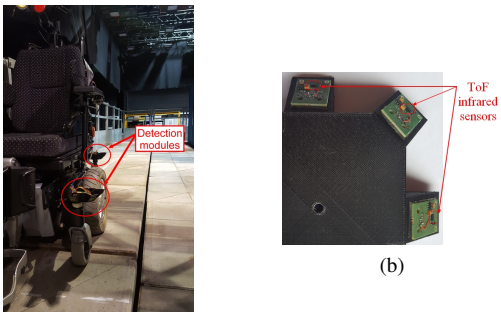
Au départ, aucun obstacle négatif n'est détecté donc le fauteuil se dirige vers le bord du trottoir, les commandes envoyées au fauteuil virtuel sont les commandes imposées, elles ne sont alors pas modifiées par le système d'assistance à la conduite. Ensuite, quand le bord du trottoir est détecté, la vitesse linéaire décroît progressivement et la vitesse angulaire est modifiée afin d'éviter la chute. Lorsque le fauteuil virtuel est parallèle au bord du trottoir, seule la contrainte sur la vitesse angulaire est maintenue, la vitesse linéaire augmente car il n'y a plus de danger dans cette direction. La vitesse angulaire est maintenue à zéro tant qu'un bord de trottoir est détecté sur la droite du fauteuil. Ensuite, lorsque le fauteuil arrive sur le tournant à 90° vers la droite, la contrainte sur la vitesse angulaire est relâchée. Le fauteuil se stoppera enfin lorsqu'un bord de trottoir sera détecté devant le fauteuil et sur sa gauche, contraignant au maximum la vitesse linéaire ainsi que la vitesse angulaire. En effet, dans cette configuration, si un bord de trottoir est détecté sur la gauche alors que le fauteuil a pour consigne de tourner à droite, la vitesse

angulaire est contrainte car l'arrière du fauteuil est trop proche du bord du trottoir.

V. Expérience

A. Prototype

Nous avons testé la solution d'assistance à la navigation sur un fauteuil roulant électrique Typhoon II d'Invacare. L'algorithme est exécuté sur un ordinateur embarqué Beagle-Bone Black (AM335x 1GHz ARM Cortex-A8 processor) utilisant ROS sous Linux. Pour cette expérience, les vitesses linéaire et angulaire du fauteuil étaient fixées aux valeurs maximum de $0.25m/s$ et $0.625rad/s$ respectivement.



(a) (b)

Fig. 8: (a) Fauteuil roulant électrique équipé de prototypes de modules de détection. (b) Prototype de module de détection (vu du dessous). Chaque module de détection est formé de 3 capteurs infrarouges ToF inclinés de $45°$ par rapport à la verticale.

Pour la détection, nous avons utilisé les capteurs infrarouge Time-of-Flight (ToF) VL53L0X de STMicroelectronics. Contrairement aux capteurs infrarouges conventionnels, ces capteurs sont peu coûteux et mesurent la distance quelle que soit la réflectance de la cible. L'ordinateur embarqué Beagle-Bone Black utilise un bus I2C pour le contrôle des capteurs et le transfert de données.

B. Environnement de l'expérience

La solution d'assistance à la navigation proposée ici a été testée au laboratoire PAMELA de l'UCL (Pedestrian Accessibility Mobility and Environment Laboratory), qui est une plateforme constituée de 36 modules qui peuvent être agencés pour simuler des environnements urbains. Pour cette expérience, nous avons organisé les modules de façon à avoir un trottoir de 15 cm de hauteur, 1.2 m de largeur et 8 m de longueur (Fig. 9).

C. Résultats de l'expérience

Un exemple de résultat obtenu lors d'un essai sur la plateforme du laboratoire PAMELA est présenté sur la Fig. 10. Pendant ces essais, contrairement à la simulation, les commandes n'étaient pas imposées au fauteuil puisqu'un utilisateur était installé dans le fauteuil.

Dans le cas de l'essai dont les résultats sont présentés sur la Fig. 10, l'utilisateur donne tout d'abord une commande

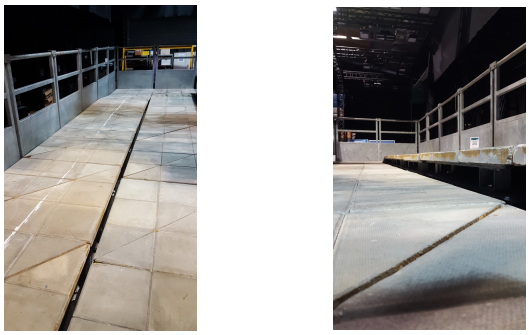


Fig. 9: Environnement pour les tests de la solution sur la plateforme PAMELA.

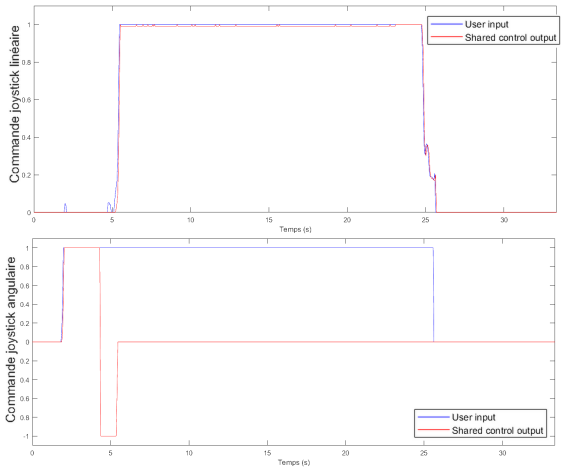


Fig. 10: Résultats de l'expérience : commandes joystick de l'utilisateur (bleu) et calculées par le système d'assistance à la navigation (rouge).

joystick en rotation vers le bord du trottoir sans appliquer de commande linéaire. Tant que le bord du trottoir n'est pas détecté, la commande joystick de l'utilisateur est directement appliquée au fauteuil. Puis lorsque le bord du trottoir est détecté, la commande joystick est modifiée par le système à l'opposé pour repositionner le fauteuil dans la bonne orientation par rapport au bord du trottoir (i.e. parallèle au bord du trottoir) puis est remise à zéro. Après cela, l'utilisateur maintient une commande joystick angulaire vers le trottoir et applique en même temps une commande linéaire vers l'avant. La commande calculée par l'algorithme d'assistance à la conduite puis envoyée au fauteuil est donc la suivante : la rotation n'est pas permise et est donc maintenue à zero mais aucun obstacle n'est détecté devant le fauteuil donc celui-ci peut suivre le trottoir, la commande linéaire appliquée par l'utilisateur est donc directement appliquée au fauteuil. Le fauteuil suit ensuite le bord du trottoir en restant parallèle à celui-ci.

D. Discussion

Cette première expérience qui a été menée dans la laboratoire PAMELA nous a permis d'équiper notre système sur un fauteuil de série. Cette méthode a pour l'instant des

limitations telles que l'absence d'assistance sur un dénivelé progressif (i.e. une rampe) et le caractère "tout ou rien" de la détection. Cela cause un comportement peu confortable pour l'utilisateur et reste l'inconvénient majeur car la correction des vitesses du fauteuil n'est pas suffisament progressive. Malgré cela, la correction est tout de même effective, ce qui apporte une preuve de concept de notre méthode. Ce constat nous permet d'envisager de continuer nos travaux afin de fournir une correction de trajectoire plus souple. Pour ce faire, nos futurs travaux porteront notamment sur le calcul d'une matrice d'interaction dédiée pour chaque capteur prenant en compte l'orientation du sol.

VI. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une solution d'aide à la conduite de FRE sous la forme d'un suivi de trottoir. Alors que la loi de commande repose sur le même principe que la solution d'aide à la navigation en FRE sous la forme d'évitement de collisions présentée dans [19], le caractère innovant de notre approche repose sur la méthode de détection des dénivelés autour du FRE pendant la navigation. La commande de l'utilisateur est fusionnée avec les contraintes déduites de la distance entre chaque capteur et l'obstacle négatif détecté. Un contrôle partagé avec l'utilisateur est alors introduit progressivement à l'approche du bord d'un trottoir. Le comportement du système en simulation ainsi qu'embarqué sur un FRE de série donne une preuve de concept de notre méthode tout en en montrant les faiblesses que nous adresserons dans de futurs travaux notamment en calculant une matrice d'interaction dédiée pour chaque capteur prenant en compte l'orientation du sol afin de détecter avec plus de précisions les différences d'élévation du sol et apporter une aide à la navigation sur les rampes. En faisant cela, nous espérons élargir les possiblités d'assistance de notre méthode afin de passer d'une solution restreinte à la navigation sur trottoir à une méthode d'assistance à la navigation dans un environnement extérieur. La méthode présentée dans cet article est peu coûteuse en ressources de calcul et indépendante du type de capteur de mesure de distance utilisé. De plus, ces travaux montrent la généricité de notre solution d'aide à la navigation.

Remerciements

Nos remerciements vont à Chinemelu Ezeh, Nikos Papadosifos et Tatsuto Suzuki pour leur aide dans la préparation de la plateforme du laboratoire PAMELA pour l'expérience. Un grand merci également à Éric Bazin du laboratoire IETR à INSA Rennes qui a été d'une grande aide pour le développement. Ces travaux ont été soutenus par l'Inria dans le cadre de l'équipe associée ISI4NAVE ainsi que l'Institut des Neurosciences Cliniques de Rennes (INCR). Ce travail est financé dans le cadre du projet INTERREG VA FMA ADAPT Assistive Devices for empowering disAbled People through robotic Technologies http://adapt-project.com/index.php. Le Programme FMA est un programme de Coopération Territoriale Européenne qui vise à financer des projets de coopération ambitieux dans la région frontalière entre la France et l'Angleterre. Le Programme est financé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

References

[1] W.-Y. Chen, Y. Jang, J.-D. Wang, W.-N. Huang, C.-C. Chang, H.-F. Mao, and Y.-H. Wang, "Wheelchair-related accidents: relationship with wheelchair-using behavior in active community wheelchair users," *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 92, no. 6, pp. 892–898, 2011.

[2] M. Burhanpurkar, M. Labb, C. Guan, F. Michaud, and J. Kelly, "Cheap or robust? the practical realization of self-driving wheelchair technology," in *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, July 2017, pp. 1079–1086.

[3] E. Baklouti, N. B. Amor, and M. Jallouli, "Autonomous wheelchair navigation with real time obstacle detection using 3d sensor," *automatika*, vol. 57, no. 3, pp. 761–773, 2016.

[4] A. Kokosy, T. Floquet, G. Howells, H. Hu, M. Pepper, and C. Donz, "SYSIASS An Intelligent Powered Wheelchair," in *Proc. of International Conference on Systems and Computer Science*, 2012.

[5] O. Horn, "Smart wheelchairs: Past and current trends," in *2012 1st International Conference on Systems and Computer Science (ICSCS)*, Aug 2012, pp. 1–6.

[6] C. Ezeh, P. Trautman, L. Devigne, V. Bureau, M. Babel, and T. Carlson, "Probabilistic vs linear blending approaches to shared control for wheelchair driving," in *IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, ICORR'17*, 2017.

[7] C. Löfqvist, C. Pettersson, S. Iwarsson, and A. Brandt, "Mobility and mobility-related participation outcomes of powered wheelchair and scooter interventions after 4-months and 1-year use," *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 211–218, 2012.

[8] K. Samuelsson and E. Wressle, "Powered wheelchairs and scooters for outdoor mobility: a pilot study on costs and benefits," *Disability and Rehabilitation: AT*, vol. 9, no. 4, pp. 330–334, 2014.

[9] B. Alexandra Korotchenko and P. Alex Mihailidis PhD, "Power mobility with collision avoidance for older adults: User, caregiver, and prescriber perspectives," *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 50, no. 9, p. 1287, 2013.

[10] J. Larson and M. Trivedi, "Lidar based off-road negative obstacle detection and analysis," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 International IEEE Conference on*. IEEE, 2011, pp. 192–197.

[11] A. Murarka, M. Sridharan, and B. Kuipers, "Detecting obstacles and drop-offs using stereo and motion cues for safe local motion," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 702–708.

[12] R. Simpson, E. LoPresti, S. Hayashi, I. Nourbakhsh, and D. Miller, "The smart wheelchair component system," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 41, no. 3B, p. 429, 2004.

[13] H. W. Ka, R. Simpson, and Y. Chung, "Intelligent single switch wheelchair navigation," *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 501–506, 2012.

[14] J. M. Coughlan and H. Shen, "Terrain analysis for blind wheelchair users: Computer vision algorithms for finding curbs and other negative obstacles." in *CVHI*, 2007.

[15] L. Devigne, V. K. Narayanan, F. Pasteau, and M. Babel, "Low complex sensor-based shared control for power wheelchair navigation," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 5434–5439.

[16] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics," *ieee Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 313–326, 1992.

[17] J. R. Azinheira and P. Rives, "Image-based visual servoing for vanishing features and ground lines tracking: Application to a uav automatic landing," *International Journal of Optomechatronics*, vol. 2, no. 3, pp. 275–295, 2008.

[18] L. Devigne, M. Babel, F. Nouviale, V. Narayanan, F. Pasteau, and P. Gallien, "Design of an immersive simulator for assisted power wheelchair driving," in *IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, ICORR'17*, 2017.

[19] M. Babel, F. Pasteau, S. Guégan, P. Gallien, B. Nicolas, B. Fraudet, S. Achille-Fauveau, and D. Guillard, "HandiViz project: clinical validation of a driving assistance for electrical wheelchair," in *IEEE Workshop On Advanced Robotics And Its Social Impacts (ARSO)*, Lyon, France, Jul. 2015.