



HAL
open science

Conception d'une poignée haptique multi-actionneurs pour l'aide à la navigation

Pierre-Antoine Cabaret, Claudio Pacchierotti, Marie Babel, Maud Marchal

► **To cite this version:**

Pierre-Antoine Cabaret, Claudio Pacchierotti, Marie Babel, Maud Marchal. Conception d'une poignée haptique multi-actionneurs pour l'aide à la navigation. Conférence Handicap 2024 – 13ème édition, IFRATH, Jun 2024, Paris, France. hal-04663149

HAL Id: hal-04663149

<https://hal.science/hal-04663149>

Submitted on 26 Jul 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Conception d'une poignée haptique multi-actionneurs pour l'aide à la navigation

Pierre-Antoine Cabaret

Univ Rennes, INSA, IRISA, Inria, CNRS
Rennes, France
pierre-antoine.cabaret@irisa.fr

Claudio Pacchierotti

CNRS, Univ Rennes, Inria, IRISA
Rennes, France
claudio.pacchierotti@irisa.fr

Marie Babel

Univ Rennes, INSA, IRISA, Inria, CNRS
Rennes, France
marie.babel@irisa.fr

Maud Marchal

Univ Rennes, INSA, IRISA, Inria, CNRS
Rennes, France
Institut Universitaire de France (IUF)
Paris, France
maud.marchal@irisa.fr

Résumé—Cet article présente une poignée haptique à actionneurs multiples destinée à l'assistance à la navigation pour des personnes en situation de handicap. La conception et l'évaluation expérimentale de trois stratégies de navigation conçues pour cette poignée seront décrites. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du Défi Inria Dornell. La poignée, imprimée en 3D, est équipée de quatre moteurs vibrants fournissant des stimuli tactiles localisés dans la main de l'utilisateur. Les techniques de navigation proposées sont combinées avec deux ensembles de stimuli directionnels afin de guider les utilisateurs le long d'un parcours. Nous évaluons l'utilisation de cette poignée avec ces stratégies de navigation au cours d'une étude utilisateur où les participants se déplacent dans une pièce de 8×8 mètres. Les résultats démontrent que les participants parviennent à naviguer avec succès le long du parcours, avec des taux de réussite variant de 80% à 100% selon les conditions.

Mots clés—Assistance à la Navigation, Haptique, Vibration

I. INTRODUCTION

Une navigation sûre et efficace dans des environnements difficiles ou inconnus constitue un défi quotidien pour de nombreuses personnes. De nos jours, les applications pour smartphones constituent le principal moyen d'orientation, utilisant le GPS pour afficher des données de localisation sur un écran. Toutefois, ces solutions exigent une attention visuelle ou auditive et peuvent ne pas convenir aux personnes en situation de handicap et/ou aux utilisateurs de dispositifs d'aide à la mobilité.

L'utilisation de technologies haptiques, c'est à dire stimulant le sens du toucher, apparaît comme une réponse possible à ces limitations. Des interfaces utilisant l'haptique pour fournir des indications de navigation de manière efficace ont ainsi été proposées, s'adressant à des utilisateurs en situation de handicap ou non. Différents types de modalités haptiques peuvent être exploitées, tels que l'étirement de la peau [1], la température [2], la pression [3], le retour de force [4] ou les vibrations, une des modalités les plus populaires [5]–[7].

Ces interfaces peuvent être des dispositifs autonomes [5], [8]–[10] ou être intégrées à un dispositif d'assistance à la mobilité, telles que des cannes blanches [2], [11]–[13] ou des déambulateurs [14]. Kappers et al. [15] ont récemment passé en revue des interfaces haptiques portables pour la navigation, soulignant la popularité et l'efficacité des solutions vibrotactiles.

Parmi les interfaces utilisant des vibrations, certaines n'utilisent qu'un seul actionneur pour fournir des informations simples de proximité [13] ou des motifs plus complexes, par exemple en utilisant des "Tactons" [16] pour encoder les informations souhaitées. Par exemple, PocketNavigator [17] utilise différents motifs vibratoires pour communiquer l'angle entre l'utilisateur et le prochain point de passage, augmentant la durée du signal vibrant proportionnellement.

D'autres interfaces avec plusieurs actionneurs utilisent la localisation de la vibration sur la main [2], [8], [9] ou d'autres parties du corps, comme la taille [18] ou les bras [6], pour encoder des informations spatiales. Par exemple, HALO [13] lie chacun des moteurs disposés sur la poignée d'une canne blanche à un capteur de proximité. Lacôte et al. [19] conçoivent une poignée haptique à 5 actionneurs, et exploitent l'illusion du mouvement apparent pour fournir des informations directionnelles à l'utilisateur.

Dans l'ensemble, l'efficacité du retour vibrotactile pour les applications de navigation a été démontrée dans divers scénarios. Cependant, l'utilisation de dispositifs portables à actionneurs multiples est moins courante, principalement en raison de la difficulté à fournir des sensations localisées et distinctes dans un dispositif de forme réduite.

Dans cet article, nous présentons une poignée haptique d'aide à la navigation proposant des stimuli tactiles localisés ainsi que trois stratégies distinctes de rendu pour la navigation. Les techniques de navigation proposées sont conçues autour de ces stimuli, utilisant leurs localisation comme des indications directionnelles. Ainsi, selon la stratégie utilisée, l'utilisateur reçoit une indication de la direction à suivre, ou bien de la



FIGURE 1. Notre poignée haptique fournit un retour vibrotactile localisé dans la main de l'utilisateur grâce à 4 moteurs vibrants isolés par une structure souple imprimée en 3D (à gauche). Dans une étude utilisateur, nous évaluons trois stratégies de navigation avec deux ensembles de stimuli tactiles, en demandant aux participants de suivre un chemin invisible en utilisant les informations fournies par la poignée haptique (droite).

direction dans laquelle il dévie de celui-ci.

Nos contributions peuvent être résumées comme suit :

- la conception d'une poignée haptique multi-actionneurs ;
- le développement de trois techniques de navigation pour la poignée ;
- la réalisation d'une étude utilisateur impliquant 18 participants pour évaluer leur capacité à suivre des tracés prédéfinis dans une pièce de 8x8 mètres, en utilisant les informations haptiques fournies.

II. DESIGN

A. Poignée Haptique Multi-Actionneurs

Afin de proposer des stimuli tactiles clairs à l'utilisateur pendant la navigation, nous concevons une poignée haptique multi-actionneurs, illustrée par la figure 1. Cette poignée est imprimée en 3D afin d'être facilement répliquée, avec la possibilité de personnaliser la structure selon les besoins de l'utilisateur. La forme de la poignée est pensée comme une représentation physique de l'utilisateur afin de faciliter l'interprétation des indications tactiles. Quatre moteurs vibrants de 7 mm de diamètre, positionnés sur les quatre faces de la poignée, permettent de fournir des stimuli tactiles localisés dans la main de l'utilisateur. Une structure déformable, imprimée en TPU, permet de minimiser la propagation des vibrations à travers la poignée, afin d'aider l'utilisateur à mieux identifier la source du stimulus.

Dans la suite de cet article, la poignée est utilisée tenue en main par des piétons. De par sa conception, elle peut facilement être combinée avec un joystick et pourrait être adaptée à d'autres dispositifs tels que des fauteuils roulants.

Les composants électroniques sont reliés à un microcontrôleur ESP32 et à une batterie, que les utilisateurs peuvent facilement porter à la ceinture. Les instructions de navigation sont calculées sur un ordinateur externe utilisant Unity et sont transmises sans fil à la poignée via ROS2.

B. Stratégies de navigation

Nous concevons trois stratégies de navigation et deux ensembles de stimuli pour notre poignée haptique afin de guider les utilisateurs le long de tracés prédéfinis, représentés par une courbe. Chaque stratégie calcule un angle θ entre l'utilisateur

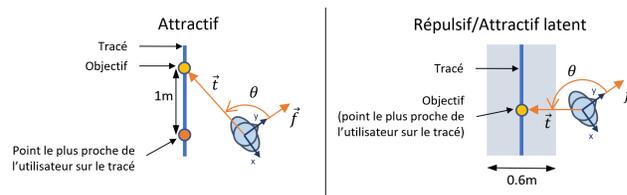


FIGURE 2. Chaque stratégie de navigation calcule un angle orienté θ entre la direction dans laquelle est orienté l'utilisateur \vec{f} et un vecteur pointant vers un point sur le tracé \vec{t} . La stratégie Attractive (A) définit ce point comme un point sur la courbe, situé un mètre en avant du point le plus proche de l'utilisateur sur la courbe. Les stratégies Répulsive (R) et Attractive Latente (AL) définissent toutes les deux ce point comme le point le plus proche de l'utilisateur sur la courbe.

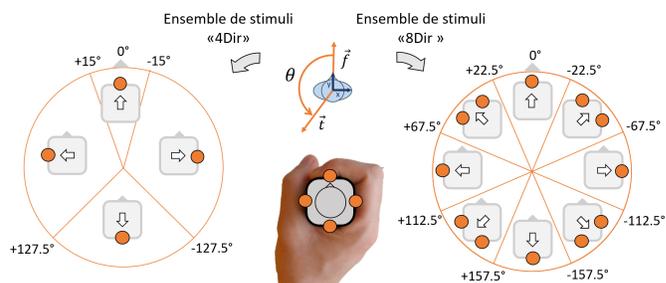


FIGURE 3. Nous concevons deux ensembles de stimuli pour notre poignée, qui sont utilisés pour relier l'angle θ à un stimulus directionnel dans la main de l'utilisateur. Dans 4Dir, chaque stimulus utilise un moteur de la poignée pour fournir l'une des quatre directions (gauche, droite, avant, arrière). 8Dir ajoute quatre directions diagonales (avant-gauche, avant-droite, arrière-gauche, arrière-droite), qui utilisent deux actionneurs simultanément. L'emplacement et l'interprétation de chaque stimulus sont corrélés : le stimulus "gauche" est fourni du côté gauche de la poignée, qui représente l'utilisateur. Selon la stratégie utilisée pour guider l'utilisateur, ces stimuli sont joués pendant 0,2 seconde (A) ou en continu (R, LA).

et un point sur le tracé à suivre, en fonction de l'orientation de l'utilisateur et de sa position par rapport au tracé (voir la figure 2). Ensuite, la valeur de θ détermine le stimuli haptique qui sera délivré par la poignée haptique (voir la figure 3).

Dans l'ensemble, les principes des trois stratégies sont les suivants :

- la stratégie Attractive (A) fournit une direction à suivre une fois par seconde, sous forme d'un stimulus de 0,2

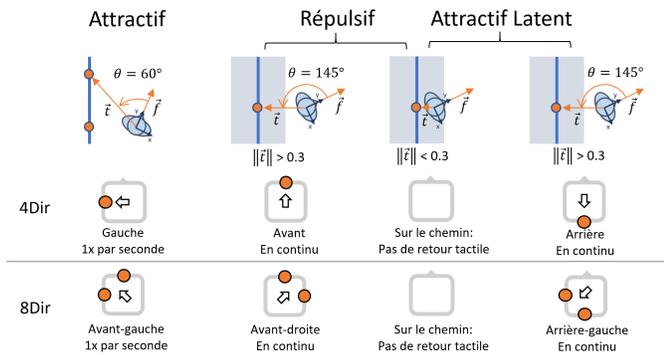


FIGURE 4. Les stratégies de navigation sont combinées avec deux ensembles de stimuli tactiles. Nous montrons ici quelques exemples du stimulus donné par la poignée en fonction de la stratégie de navigation utilisée.

seconde ;

- la stratégie Répulsive (R) informe l'utilisateur lorsqu'il dévie de plus de 30 cm du centre du tracé, en donnant la direction de déviation avec un stimulus continu (similaire aux bandes rugueuses sur les routes) ;
- la stratégie Attractive Latente (AL) informe l'utilisateur lorsqu'il dévie de plus de 30 cm du centre du chemin, en donnant la direction pour revenir sur le chemin avec un stimulus continu.

Nous présentons quelques exemples de la façon dont les différentes stratégies et ensembles de stimuli fonctionnent ensemble dans la figure 4.

III. ÉTUDE UTILISATEUR

Nous avons recruté 18 personnes (14 hommes, 4 femmes, âgés de 20 à 47 ans (moyenne = 27,28 ; écart-type = 6,25)) pour participer à l'étude, tous ayant donné leur consentement éclairé par écrit. Aucun participant n'a déclaré de handicap. Avant le début de l'expérience, la poignée haptique est présentée aux participants, qui ont la possibilité de se familiariser avec les différents stimuli tactiles qu'elle peut fournir.

A. Environnement expérimental

Nous menons l'expérience dans une pièce de 8×8 mètres (voir figure 1), dans laquelle nous utilisons le système de suivi de mouvement HTC Vive pour suivre la position et l'orientation de l'utilisateur. Les participants portent un harnais sur lequel est positionné un tracker Vive (figure 5) et tiennent la poignée dans leur main dominante, avec le boîtier de commande attaché à leur ceinture. Un casque antibruit est utilisé pour masquer d'éventuels indices sonores provenant des vibrations dans la poignée. Nous avons choisi trois tracés, présentés dans la figure 5, le long desquels les participants sont guidés. Les tracés P1 et P2 sont composés, respectivement, de virages à 90° et 45° tandis que P3 comporte à la fois des virages à 45° et 90°. Les chemins ne sont pas visibles par les participants, et deux points de départ sont définis dans l'espace expérimental pour minimiser les potentiels effets d'apprentissage.

B. Conditions expérimentales

Dans cette expérience, nous évaluons la capacité des stratégies de navigation haptique proposées à guider les participants le long de tracés définis dans la zone expérimentale. Nous prenons en compte les variables expérimentales suivantes dans notre étude :

- la stratégie de navigation : A, R et AL, telles qu'introduites dans la section II ;
- l'ensemble de stimuli : 4Dir et 8Dir ;
- le tracé : P1, P2 et P3 (voir figure 5).

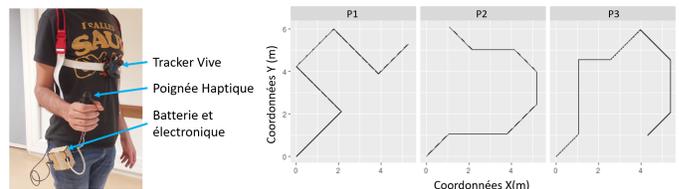


FIGURE 5. Dispositif expérimental. Les participants tiennent la poignée haptique dans leur main dominante, l'électronique et la batterie étant attachées à leur ceinture (à gauche). Pendant l'expérience, les participants marchent le long de trois tracés dans une pièce de 8×8 m (à droite).

L'expérience est composée de trois blocs, un pour chaque stratégie de navigation. Au sein de chaque bloc, la stratégie considérée est utilisée sur les trois chemins avec les deux ensembles de stimuli, l'un après l'autre (c'est-à-dire 6 essais par bloc). L'ordre de présentation des stratégies et des ensembles de stimuli est équilibré entre les participants, tandis que l'ordre des chemins est randomisé. Le point de départ change tous les trois essais, c'est-à-dire à chaque changement d'ensemble de stimuli.

Au début de chaque bloc, les participants reçoivent des explications sur la stratégie de navigation qui sera utilisée dans le bloc. Ils sont invités, pour chaque essai, à suivre les instructions données par la poignée du mieux qu'ils le peuvent.

Les essais commencent avec les participants debout au point de départ, faisant face à l'angle opposé de la pièce. L'essai se termine lorsqu'ils atteignent la fin du chemin ou après quatre minutes. Les participants sont invités à évaluer leur succès après chaque essai sur une échelle de 1 à 7, et répondent à un questionnaire après avoir terminé chaque paire de conditions.

C. Résultats

Dans l'ensemble, les participants ont réussi à atteindre la fin du chemin sans trop de déviations importantes dans 90% des essais (la figure I illustre les résultats par conditions et la figure 6 donne des exemples de trajectoires). Nous utilisons un modèle linéaire généralisé mixte pour analyser le succès des participants. La stratégie, l'ensemble de stimuli et le tracé sont considérés comme des variables indépendantes, tandis que les participants sont considérés comme un effet aléatoire. Nous observons un effet significatif de la stratégie ($\chi^2(2, N=324) = 14.07, p < 0.001$). Les tests post-hoc en utilisant le test de Tukey mettent en évidence un plus grand succès pour A par rapport à R ($Z=2.7, p < 0.05$) et A par rapport à AL ($Z=3.5, p < 0.01$). Parmi les essais que nous avons considérés comme

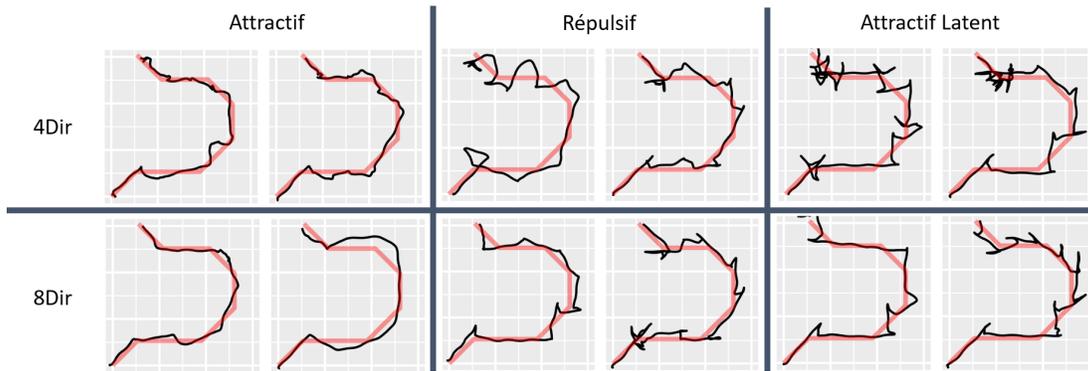


FIGURE 6. Exemples de trajectoires de deux participants sur la tracé P2 en fonction des conditions. Les trajectoires tendent à être plus lisses avec la stratégie A, tandis que celles avec R et AL montrent plus de rebonds autour de la trajectoire.

TABLE I
TAUX DE RÉUSSITE POUR CHAQUE COMBINAISON DE STRATÉGIE ET D'ENSEMBLE DE STIMULI.

	Attractif	Répulsif	Attractif Latent
4Dir	100%	93%	83%
8Dir	98%	87%	80%

échoués, la majorité sont des essais presque complets où les participants se sont retournés pendant le dernier segment du tracé.

L'efficacité du parcours, mesurée comme le rapport entre la distance parcourue par les participants et la longueur du tracé, est minimale pour A (1.39 ± 0.36), et plus grande pour AL (3.24 ± 1.84) que pour R (2.63 ± 1.34). Le test de Wilcoxon montre une différence significative entre toutes les paires de stratégies ($p < 0.01$). Bien que cette différence soit significative, il faut toutefois prendre en compte le fait que les conditions R et AL fournissent des retours uniquement en cas d'écart de plus de 0.3m du chemin.

Cette différence peut être observée en examinant l'écart des participants par rapport au chemin, qui est plus faible pour A que pour les autres stratégies (A : moyenne=0.27, médiane=0.19; R : moyenne=0.35, médiane=0.31; LA : moyenne=0.36, médiane=0.31).

En outre, nous analysons la réussite estimée par les participants à l'aide d'un modèle linéaire généralisé à effets mixtes. La stratégie, l'ensemble de stimuli et le tracé sont considérés comme des variables indépendantes, tandis que les participants sont considérés comme un effet aléatoire. Les résultats montrent un effet significatif de la stratégie ($\chi^2(2, N=324) = 25.38, p < 0.001$) et du tracé ($\chi^2(2, N=324) = 9.73, p < 0.01$). Comme on pouvait s'y attendre, les tests post-hoc de Tukey montrent une réussite estimée plus élevée pour A par rapport à R ($Z=3.2, p < 0.01$) et A par rapport à AL ($Z=4.9, p < 0.01$). P1 a également montré des résultats significativement meilleurs que P2 ($p < 0.01$).

Concernant les données du questionnaire subjectif, composé d'une série d'items de Likert gradués de 1 à 7, le test de Wilcoxon ne montre aucune différence significative

pour la confiance en la navigation entre les stratégies (A : moyenne=5.4; R : moyenne=4.3; AL : moyenne=4.2). Les participants ont évalué leur capacité à utiliser les stratégies sans instructions de manière significativement plus élevée pour A par rapport à R (moyenne : 5.1 vs. 3.0, $p < 0.01$) et A par rapport à AL (moyenne : 5.1 vs. 2.8, $p < 0.01$). La difficulté à interpréter les instructions de navigation a été notée moins élevée pour A par rapport à AL (moyenne : 2.7 vs. 3.9, $p < 0.05$) et A par rapport à R (moyenne : 2.7 vs. 3.8, $p < 0.05$). Enfin, la facilité à localiser les vibrations dans l'ensemble de stimuli 4Dir a été notée plus élevée que dans celui de 8Dir (moyenne : 5.8 vs. 5.1, $p < 0.01$). À la fin de l'expérience, 11 des 18 participants ont choisi A comme stratégie préférée, 3 ont choisi R et 4 AL.

IV. DISCUSSION

Dans l'ensemble, les résultats montrent un avantage clair pour A : les trajectoires dans cette condition sont plus fluides que pour les autres (voir figure 6) et les participants ont parcouru des distances moindres dans l'ensemble. Cela était quelque peu attendu, car les informations fournies par la stratégie sont plus directes que pour les deux autres, qui imposent ainsi une plus grande charge cognitive à l'utilisateur.

Cela ne signifie pas que les stratégies R et AL sont sans intérêt : elles fonctionnent différemment et nécessitent un comportement plus exploratoire de la part de l'utilisateur, qui doit tester différentes directions et interpréter les informations reçues avant de prendre une décision. Ces différences de fonctionnement sont visibles sur la figure 7. En particulier, certains participants ont indiqué qu'évaluer leur réussite dans la condition A était plus difficile, car ils ne recevaient pas de retour d'information sur le fait d'être ou non sur le chemin. Une suite intéressante pour cette étude serait de combiner les deux approches, avec une stratégie qui adapte son comportement si l'utilisateur est sur le chemin ou non.

R semble légèrement mieux fonctionner que LA. Les commentaires des participants suggèrent que les informations fournies par cette stratégie sont plus intuitives et plus faciles à relier avec une interprétation dans le monde réel. Les vibrations peuvent être interprétées comme des murs avec

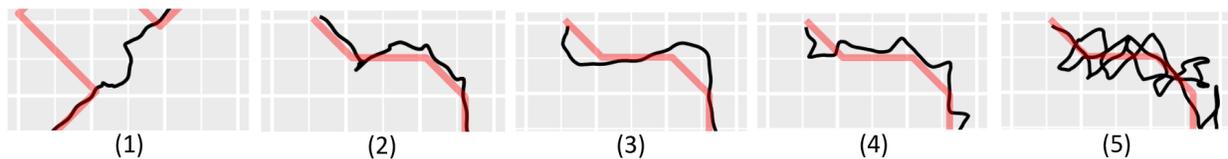


FIGURE 7. Exemples du comportement des participants pendant la navigation. (1) Raccourci : le participant est allé trop loin et a atteint un autre segment du tracé; (2) Boussole : le participant se réoriente régulièrement en utilisant la poignée comme une boussole; (3) Dépassement : le participant marche trop loin dans les virages, résultat d'une vitesse de marche plus élevée ou d'un temps de réponse plus long aux instructions de navigation; (4) Rebonds : un comportement observé dans les stratégies R et LA, où les participants ont tendance à rebondir d'un côté du tracé à l'autre; (5) Un autre exemple de rebonds plus importants autour du chemin. Cependant, la trajectoire reste globalement dans le couloir de 0.6m autour du tracé.

lesquels l'utilisateur entre en collision et doit donc changer de direction. Avec LA, cette interprétation est inversée.

Plusieurs participants ont décrit leur expérience avec R et LA comme "heurter des murs virtuels" et ont comparé l'utilisation de A à "une boussole". Ces deux interprétations de la stratégie de guidage peuvent être observées sur les trajectoires des participants. Nous mettons en évidence des exemples de ces comportements, et d'autres, dans la figure 7.

Par ailleurs, il ne semble pas y avoir de préférence claire entre 4Dir et 8Dir, certains trouvant la perception des stimuli de 8Dir difficile et d'autres les trouvant plus faciles à interpréter. Cela valide donc l'utilisation des deux ensembles de stimuli directionnels pour la navigation. 8Dir offre des retours plus précis, ce qui permet aux utilisateurs de modifier leur trajectoire de manière plus fluide, comme on peut l'observer sur la figure 6. Le choix entre les deux ensembles de stimuli pourrait être fait en fonction des préférences de l'utilisateur et de l'environnement dans lequel le dispositif serait utilisé.

Donner une vibrations par seconde pour A était perçu comme trop stimulant pour certains participants, tandis que d'autres trouvaient cette fréquence appropriée. La vibration continue hors du chemin pour R et LA était considérée de la même manière. Dans l'ensemble, l'intensité des vibrations pourrait être diminuée ou, idéalement, sélectionnée par les utilisateurs. Compte tenu de la tâche et du chemin choisis pour l'expérience, la fréquence à laquelle les indications sont fournies semble appropriée : un délai plus long entre les stimulations aurait entraîné un écart plus élevé des participants par rapport au chemin. Une stratégie de guidage prédictive pourrait consister en une fréquence dynamique d'instructions calculée en fonction de la complexité locale du tracé et de la vitesse de l'utilisateur.

Enfin, la plupart des participants ont déclaré avoir apprécié l'utilisation de la poignée pendant la tâche de navigation, certains trouvant les stratégies R ou LA plus ludiques, comme s'ils exploraient un labyrinthe.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une poignée haptique d'aide à la navigation, ainsi que trois stratégies de navigation exploitant deux ensembles de stimuli vibrotactiles directionnels. Nous avons mené une étude utilisateur avec 18 participants démontrant la capacité de la poignée, associée

à ces techniques de navigation, à guider efficacement les participants le long d'un tracé défini. Bien que la stratégie plus directe (Attractive) performe mieux, les deux autres présentent des comportements intéressants de la part des participants, qui parviennent toujours à atteindre leur objectif.

Les travaux futurs pourraient améliorer la navigation en recalculant dynamiquement le chemin en fonction de la position de l'utilisateur, ainsi qu'en combinant des instructions de navigation pourrait également être améliorée en l'adaptant en fonction de la forme locale du chemin et des mouvements de l'utilisateur. Bien que cette étude ait été réalisée avec des participants sans handicap, les travaux futurs se concentreront sur l'utilisation de notre poignée haptique et de nos techniques de navigation avec des dispositifs d'aide à la mobilité, et sur des tests avec des personnes en situation de handicap.

RÉFÉRENCES

- [1] Y. T. Pan, C. C. Shih, C. Debuys, and P. Hurl, "Design of a Sensory Augmentation Walker with a Skin Stretch Feedback Handle," *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 832–837, 2018.
- [2] A. Nasser, K. N. Keng, and K. Zhu, "ThermalCane : Exploring Thermotactile Directional Cues on Cane-Grip for Non-Visual Navigation," *International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, 2020.
- [3] S. Obermoser, D. Klammer, G. Sigmund, A. Sianov, and Y. Kim, "A Pin Display Delivering Distance Information in Electronic Travel Aids," *IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, vol. 2018-August, pp. 236–241, 2018.
- [4] L. Devigne, F. Pasteau, M. Babel, V. K. Narayanan, S. Guegan, and P. Gallien, "Design of a Haptic Guidance Solution for Assisted Power Wheelchair Navigation," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 3231–3236, 2018.
- [5] H. Kawaguchi and T. Nojima, "STRAVIGATION : A Vibrotactile Mobile Navigation for Exploration-Like Sightseeing," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7624 LNCS, pp. 517–520, 2012.
- [6] L. Devigne, M. Aggravi, M. Bivaud, N. Balix, C. S. Teodorescu, T. Carlson, T. Spreters, C. Pacchierotti, and M. Babel, "Power Wheelchair Navigation Assistance Using Wearable Vibrotactile Haptics," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 52–58, 2020.
- [7] S. Bhatlawande, M. Mahadevappa, J. Mukherjee, M. Biswas, D. Das, and S. Gupta, "Design, development, and clinical evaluation of the electronic mobility cane for vision rehabilitation," *IEEE TNSRE*, 2014.
- [8] A. J. Spiers and A. M. Dollar, "Outdoor pedestrian navigation assistance with a shape-changing haptic interface and comparison with a vibrotactile device," *IEEE Haptics Symposium*, vol. 2016-April, pp. 34–40, 2016.

- [9] G. H. Yang, M. S. Jin, Y. Jin, and S. Kang, "T-mobile : Vibrotactile display pad with spatial and directional information for hand-held device," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5245–5250, 2010.
- [10] E. Bouzbib, L. Kuang, P. Robuffo Giordano, A. Lécuyer, and C. Pacchierotti, "Survey of Wearable Haptic Technologies for Navigation Guidance," 2024. [Online]. Available : <https://inria.hal.science/hal-04356277>
- [11] R. Pyun, Y. Kim, P. Wespe, R. Gassert, and S. Schneller, "Advanced Augmented White Cane with obstacle height and distance feedback," *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2013.
- [12] S. Gallo, D. Chapuis, L. Santos-Carreras, Y. Kim, P. Retornaz, H. Bleuler, and R. Gassert, "Augmented white cane with multimodal haptic feedback," *IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 149–155, 2010.
- [13] Y. Wang and K. J. Kuchenbecker, "HALO : Haptic Alerts for Low-hanging Obstacles in white cane navigation," *IEEE Haptics Symposium*, pp. 527–532, 2012.
- [14] A. Wachaja, P. Agarwal, M. Zink, M. R. Adame, K. Möller, and W. Burgard, "Navigating blind people with walking impairments using a smart walker," *Autonomous Robots*, vol. 41, no. 3, pp. 555–573, 2017.
- [15] A. M. Kappers, M. Fa Si Oen, T. J. Junggeburch, and M. A. Plaisier, "Hand-held Haptic Navigation Devices for Actual Walking," *IEEE Transactions on Haptics*, pp. 1–12, 2022.
- [16] D. S. Elvitigala, D. J. C. Matthies, V. Dissanayaka, C. Weerasinghe, and S. Nanayakkara, "2bit-TactileHand : Evaluating Tactons for On-Body Vibrotactile Displays on the Hand and Wrist," 2019.
- [17] M. Pielot, B. Poppinga, W. Heuten, and S. Boll, "PocketNavigator : Studying tactile navigation systems in-situ," *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3131–3139, 2012.
- [18] W. Heuten, N. Henze, S. Boll, and M. Pielot, "Tactile wayfinder : A non-visual support system for wayfinding," vol. 358, pp. 172–181, 2008.
- [19] I. Lacôte, C. Pacchierotti, M. Babel, D. Gueorguiev, and M. Marchal, "Investigating the Haptic Perception of Directional Information Within a Handle," *IEEE Transactions on Haptics*, 2023.