

Modes de commande intuitifs pour l'assistance robotisée aux déplacements.

O. Horn, M.A. Hadj-Abdelkader, F. Leishman et G. Bourhis
Laboratoire d'Automatique humaine et de Sciences Comportementales (L.A.S.C.),
Université Paul Verlaine, bât.ISEA, 7 rue Marconi
57070 METZ Cedex 01, France
{horn, hadjabde, leishman, bourhis}@univ-metz.fr

Résumé :

Dans le domaine de la robotique mobile appliquée à l'aide au déplacement des personnes handicapées moteur nous présentons deux études qui visent à combler le hiatus entre les avancées technologiques possibles et les besoins des utilisateurs. En nous inspirant des méthodes de la téléopération nous avons conçu deux approches pour l'assistance à la conduite : l'interface déictique permettant de déclencher simplement des fonctionnalités de navigation autonome et le joystick à retour de force pour une commande plus facile du joystick classique. Pour chaque approche, nous avons réalisé le dispositif dans son entier depuis l'interface homme-machine jusqu'à l'interprétation des mesures laser pour la perception. Nous décrivons ces réalisations et les tests effectués dans notre laboratoire dans la perspective d'une évaluation par des personnes handicapées.

I. INTRODUCTION

Les avancées technologiques d'une époque peuvent améliorer le mode de vie des personnes handicapées; ainsi dans les années 70 l'existence des moteurs électriques a permis la mise au point de fauteuils électriques rendant une autonomie de déplacement aux personnes qui ne pouvaient pas propulser elles-mêmes un fauteuil manuel. Mais ces fauteuils électriques sont encore inaccessibles à ceux qui, pour des raisons diverses, se trouvent dans l'incapacité de les conduire par le biais de l'habituel joystick [1], [2], d'où les études qui sont menées depuis la fin des années 80 pour employer les avancées de la robotique mobile afin de rendre ces fauteuils électriques accessibles au plus grand nombre. L'idée originale est de donner des

possibilités de déplacement autonome au fauteuil afin d'en alléger la charge de conduite.

Sur cette idée de nombreux dispositifs ont été conçus qui diffèrent par leur structure mécanique ou logicielle par le type de fonctionnalités proposées ainsi que par les modes de perception (type de capteur) et d'action (type de commande) du véhicule. Historiquement les premiers prototypes étaient constitués de robots mobiles équipés d'un siège [3], puis on a vu quelques prototypes intégrés robot-siège [4] ainsi qu'un grand nombre de fauteuils électriques du commerce équipés d'ordinateur et de capteurs [5], [6] et enfin des dispositifs additionnels [7] développés indépendamment du fauteuil et destinés à pouvoir s'adapter sur différents fauteuils.

Toutefois à l'heure actuelle très peu ont franchi le seuil des laboratoires. Au delà des motifs techniques de non aboutissement des projets on peut y voir un signe du manque d'échange entre laboratoires et institutions tels les hôpitaux ou les centres d'accueil. Ce déficit limite le feedback entre la conception du prototype et son usage potentiel, il est ainsi difficile de prévoir si les personnes utilisatrices seront intéressées par ces dispositifs. Il s'ensuit une désaffection du domaine qui fait qu'à l'heure actuelle le nombre d'études sur ce thème est en phase décroissante.

Pour autant il serait dommage de considérer que tout les travaux menés l'ont été en pure perte. L'espoir subsiste que ces aides robotisées débouchent un jour sur des technologies qui améliorent réellement la vie des personnes handicapées moteurs mais il est pour cela nécessaire de rechercher l'adéquation entre l'état de la technologie disponible et la demande potentielle.

Nous décrivons dans cet article deux approches que nous menons de front : l'interface déictique pour déclencher simplement des fonctionnalités de

navigation autonome et le joystick à retour de force pour une commande plus facile du dispositif classique. Il s'agit de deux pistes distinctes mais qui se situent dans la même perspective de simplification de la conduite des fauteuils au moyen d'une commande coopérative. Après une présentation des choix qui ont présidé à notre démarche, nous présenterons les deux approches et évoquerons les résultats obtenus pour chacune d'entre elles.

II LES APPROCHES DE L'AIDE À LA MOBILITÉ

a) L'aporie des fauteuils intelligents

Le postulat que les avancées de la robotique mobile sont à même d'alléger la tâche de conduite des utilisateurs de fauteuils électrique est à l'origine des projets menés sur la conception de fauteuils électriques intelligents. Ceci a conduit à de nombreuses études abordant différents aspects des aides robotisées au déplacement. On a pu ainsi décliner diverses approches de l'interface utilisateur, de la planification de trajectoire, de l'architecture logicielle, de la localisation, de l'apprentissage..., toutes les fonctionnalités des robots mobiles revisités à l'aune de leur emploi sur des fauteuils électriques. Les systèmes conçus à partir de ces études offrent des fonctionnalités potentiellement intéressantes, ils n'ont toutefois pas pu pénétrer l'univers des utilisateurs faute d'une prise en considération suffisante des contraintes fortes concernant notamment la facilité d'emploi, l'assurance de la sécurité, l'acceptation psychologique, l'adaptation à tout fauteuil et le prix non prohibitif. Ces impératifs étant souvent incompatibles avec les modules tels qu'ils ont été établis.

D'où la contradiction entre la complexité l'apport technique et les chances de le voir exploité dans l'univers des utilisateurs. A ce titre, il est remarquable de constater que deux dispositifs (SCAD [8] et Smart Wheelchair[9]) réellement utilisés en pratique n'emploient que des fonctionnalités basiques de suivi de ligne et d'évitement d'obstacle. Toutefois ils ont été conçus pour répondre à un besoin clairement identifié, puisque mis au point au sein d'institutions hospitalières.

On note alors une autre faiblesse des fondements des travaux du domaine : ils se sont lancés sans qu'un travail approfondi en concertation avec les intervenants auprès des handicapés n'ait été mené.

Une nouvelle approche doit être envisagée qui, parallèlement au développement des prototypes, instaurera un dialogue avec les utilisateurs envisagés afin d'évaluer la demande mais aussi en vue de la stimuler puisque les demandes sont aussi liées à l'éventail des possibles.

Cela nécessite d'établir un pont entre les institutions et les laboratoires qui passe notamment par le développement de fonctionnalités légères tant du point de leur installation sur les fauteuils que de leur utilisation, afin qu'elles puissent rapidement être présentées et évaluées.

C'est dans cette optique que nous nous sommes attachés à aborder l'aide à la mobilité sous forme de dispositifs additionnels s'inspirant des modes de commande tels qu'analysés en téléopération.

b) Modes de commande des fauteuils électriques

Les premiers travaux sur les fauteuils intelligents se sont portés sur la conception de dispositifs susceptibles d'assumer automatiquement une partie des tâches de conduite, le schéma de principe est celui d'un système automatique sur lequel la personne envoie certaines consignes que la machine se charge seule d'effectuer. L'évolution de la commande manuelle vers la commande automatique peut être représentée par la figure suivante (Fig.1).

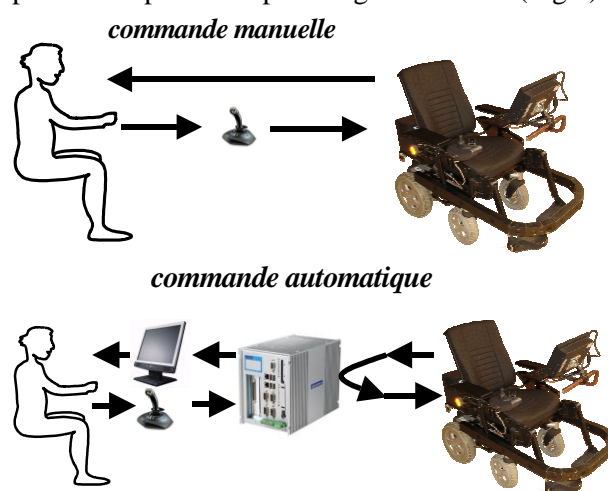


Fig.1 : Commandes du fauteuil électrique classique et du fauteuil autonome

Ce modèle s'est rapidement montré insatisfaisant dans la mesure où une fois la tâche lancée la personne ne dispose plus de moyen d'intervention sur son véhicule ce qui pose problème aussi bien en matière d'acceptabilité psychologique du dispositif que du point de vue de la sécurité de la personne.

Par la suite un lien plus étroit entre l'homme et le véhicule a été établi et les fonctionnalités d'assistance ont été conçues en relation avec leur mode d'activation envisagé. A ce titre on peut se référer aux modèles de la télérobotique d'autant que l'assistance robotisée lui est analogue par certains aspects. En effet en téléopération la personne fait agir le robot à sa place parce qu'elle est dans l'impossibilité d'effectuer elle-même les tâches requises, il existe donc une synergie étroite entre la machine et la personne afin que les réactions de l'une puisse profiter aux actions de l'autre. Bien que le contexte soit radicalement différent (puisque la personne se trouve sur le fauteuil contrairement à l'opérateur qui se trouve à distance de l'effecteur) il s'agit dans notre problématique de faire réaliser des fonctions que la personne est dans l'incapacité d'effectuer elle-même, la distance chez le téléopérateur est remplacé par l'incapacité motrice de l'utilisateur de fauteuil intelligent. La relation conducteur fauteuil est donc similaire à la relation opérateur effecteur et les modes de commande des fauteuils intelligents peuvent être considérés selon les modèles définis par Sheridan en télérobotique [10] qui distingue le mode échangé où la machine remplace parfois l'homme et le mode partagé où elle le soulage en permanence. Ils prennent alors la configuration suivante (Fig. 2) :

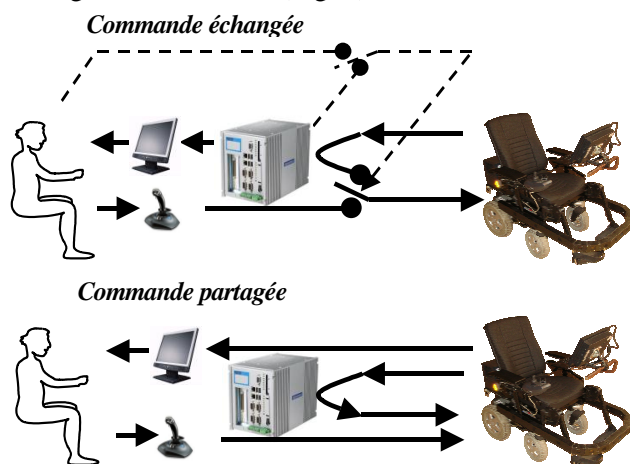


Fig.2 : Modes de commande des fauteuils intelligents

Dans ces modes de commande l'ordinateur et l'homme participent tous deux au pilotage du véhicule. Pour la commande échangée c'est soit l'homme soit l'ordinateur qui contrôle le véhicule et le passage d'un mode à l'autre se fait sur indication de l'homme ou de la machine tandis que dans la commande partagée il existe un lien permanent entre l'homme et le fauteuil mais les actions demandées sont modulées en fonction de l'analyse qu'en fait la machine.

c) Vers des systèmes d'assistance au pilotage

En nous appuyant sur ces considérations relatives à la téléopération aussi bien qu'à notre expérience sur les aides robotisées à la mobilité nous nous tournons actuellement vers la réalisation de dispositifs légers d'aide à la conduite qui visent à établir une coopération simple et intuitive entre le pilote et la machine et pour lesquels une validation rapide auprès des utilisateurs doit être menée.

Durant les vingt dernières années les travaux menés, au sein de notre laboratoire, sur l'aide robotisée aux déplacements ont conduit au développement de plusieurs prototypes qui suivent les évolutions décrites précédemment [11] [12]. Actuellement nous travaillons sur un fauteuil du commerce Storm équipé d'un PC industriel, d'une caméra et d'un capteur laser rotatif. Nous n'employons pas l'odométrie afin que notre dispositif puisse être aisément implanté sur tout fauteuil. Nous proposons ici deux démarches qui conçoivent des fonctionnalités d'assistance employant la perception laser pour la navigation et portant une attention particulière à la communication homme fauteuil.

III COMMANDE DÉICTIQUE : VISION LASER POUR UNE COMMANDE ÉCHANGÉE

a) Principe

Il s'agit d'un type particulier de commande échangée où le passage d'un mode à l'autre est décidé par le conducteur. La caméra offre via l'écran un aperçu de l'environnement sur lequel la personne choisira son déplacement qui pourra ensuite être réalisé de manière autonome à partir de la perception du laser. Si la personne veut reprendre la main, il lui suffit d'actionner le joystick qui redevient immédiatement l'organe de commande. La personne dispose donc du soutien d'une aide à la mobilité dont elle n'est pas prisonnière.

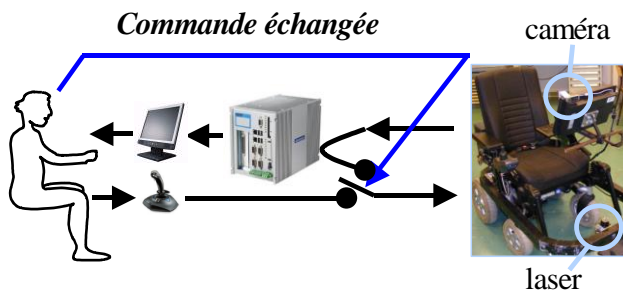


Fig.3 : La commande déictique

b) Interface déictique

Le terme déictique vient de la linguistique où il désigne des mots dont le sens dépend de la situation dans laquelle ils sont prononcés. Par exemple dans la séquence "donne moi ce livre" c'est la présence du livre qui donne le sens du mot "ce" et le fait de montrer rend la formulation plus simple. De même le principe de la commande déictique [13] est de donner les consignes en désignant ce qui doit être fait, son intérêt réside dans le caractère intuitif des instructions.

Pour mesurer ses potentialités dans l'aide à la mobilité, nous l'avons mise en œuvre sur notre fauteuil pour deux fonctionnalités de déplacement autonome: le franchissement de passage étroit et le suivi de mur. L'interface avec l'utilisateur se décompose en deux zones sur l'écran ; une grande partie de l'image donne un aperçu de l'environnement et, sur la gauche, un menu propose les différentes tâches possibles. Au départ la personne sélectionne le mode de déplacement entre «commande manuelle» «suivi de mur» ou «franchissement de passage étroit». Si l'une des deux fonctionnalités autonomes est choisie, les zones sélectionnables sont surlignées sur l'environnement et l'objectif sera déterminé en cliquant sur une des zones surlignées.



Fig.4 : Exemple d'affichage écran

La figure ci-dessus (Fig. 4) donne un exemple de l'affichage écran, alors que le franchissement de passage étroit a été sélectionné. La zone verte représente le passage qui peut être choisi (un seul dans ce cas) et le fauteuil est encore à l'arrêt ce qui est affiché en bas à gauche.

Ensuite le déplacement s'effectue par un ajustement de la trajectoire en fonction de la perception laser et l'utilisateur a en surimpression sur l'écran la nature de la tâche qui se déroule. Il peut à chaque instant envoyer un contrordre si le mouvement ne lui convient pas. Lorsque la séquence est terminée le choix se présente à nouveau de reprendre une commande manuelle ou de lancer une autre fonctionnalité. Ce mode de coopération permet d'alterner aisément des périodes en commande machine et des périodes en commande manuelle.

c) Mise en œuvre sur le fauteuil

Pour développer cette interface sur le fauteuil un premier module s'attache à la conversion des points de l'image en coordonnées cartésiennes dans le repère lié au capteur laser. Il permet d'afficher les zones pouvant être sélectionnées dans l'image (les passages étroit ou les murs), puis, une fois qu'un point de l'image est cliqué, de le convertir en un objectif adapté à la navigation à partir des mesures laser. Cette correspondance a été établie à partir des caractéristiques de la caméra et de sa position sur le dispositif. Les modalités de la conversion sont données dans [12].

Ensuite la trajectoire est générée par la définition d'un ensemble de points buts successifs calculés en fonction de la perception laser et de la nature de la tâche.

Pour le passage étroit, la première étape est la recherche des passages possibles par regroupement des obstacles dans les mesures laser. Puis relativement au passage un ensemble de zones est défini et, pour chacune d'entre elles, un objectif situé dans la zone immédiatement adjacente.

Pour le suivi de mur les points buts sont calculés en fonction de la distance au mur suivi, de la distance au mur opposé (mesure de l'espace disponible dans le cas d'un couloir) et de la présence éventuelle d'obstacle à l'avant.

La navigation se fait par l'asservissement du fauteuil sur la succession des objectifs au moyen de deux modules : un correcteur PID numérique qui permet

de donner la position qu'aurait prise le joystick si une personne voulait conduire le fauteuil vers le point but considéré et une simulation du joystick qui emploie la logique floue pour calculer les tensions correspondant à chaque position possible du joystick [12].

d) Résultats

Nous avons réalisé dans notre laboratoire des parcours alternant des déplacements manuels et des fonctionnalités autonomes. Ces essais ont permis de montrer la capacité du fauteuil à gérer les déplacements de manière autonome ainsi qu'à apprécier la facilité de passage d'un mode de commande à l'autre. Par ailleurs le relevé des trajectoires lors des primitives autonomes montre un déplacement fluide qui se rapproche de celui qu'aurait effectué une personne conduisant directement le fauteuil. Nous sommes actuellement en contact avec des intervenants auprès des personnes handicapées moteurs afin de présenter ce dispositif aux utilisateurs potentiels.

IV INTERFACE HAPTIQUE : PERCEPTION LASER POUR UNE COMMANDE ASSISTÉE

a) Principe

Il s'agit dans cette deuxième étude d'adopter le principe du retour haptique pour concevoir un nouveau mode de commande du fauteuil électrique exploitant les mesures du télémètre laser. L'idée est d'envoyer un retour d'effort sur le joystick en fonction de la proximité des obstacles perçus. Nous ne sommes pas tout à fait dans la commande partagée dans la mesure où les consignes de la machine ne s'adressent pas directement au fauteuil mais interviennent au niveau du joystick par le biais du retour haptique. Il s'agit d'un mode particulier que nous intitulons « commande assistée » puisque la perception laser permet de proposer des directions, indiquées en infléchissant la position du joystick, que le pilote choisira de suivre ou d'ignorer. Physiquement la communication homme machine ne repose ici que sur le joystick.

Commande assistée

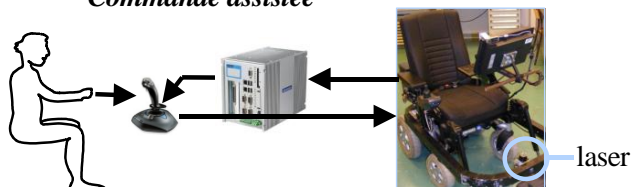


Fig.5 : Le joystick à retour d'effort

b) Le retour d'effort

Notre méthode repose sur l'enregistrement des mesures de distance laser sous forme de grille selon des modalités qui s'apparentent au VFH [14], algorithme qui a été conçu pour l'évitement d'obstacle à partir de mesures US. Lors de la construction de la grille chaque mesure est transcrite par l'incrément de la case correspondant à la distance délivrée par le capteur. Comme nous n'employons pas l'odométrie l'enregistrement d'une grille ne se fait qu'à partir d'une seule position du fauteuil (contrairement au VFH où les grilles sont incrémentées à partir de plusieurs positions successives du capteur).

On applique ensuite le principe des champs de potentiel à la grille afin que chaque cellule exerce une force répulsive proportionnelle à la valeur de la cellule et inversement proportionnelle à la distance entre la cellule et le centre de la grille. Puis la grille est divisée en secteurs de 5° auxquels on affecte une densité polaire d'obstacle qui est la somme des cellules dudit secteur. On obtient ainsi un histogramme polaire de densité d'obstacle où les pics représentent les directions des obstacles et les vallées correspondent aux directions libres. On lisse cet histogramme par un filtre passe bas afin de ne considérer que des vallées qui soit suffisamment larges.

Une fois les vallées déterminées nous adoptons deux méthodes de calcul du retour de force :

- Le retour de force actif : la direction de la force de retour correspond à la vallée la plus proche de la direction demandée par l'utilisateur.

- Le retour de force passif : le joystick est maintenu à sa position centrale par une force de résistance dont le module s'accroît si la direction de déplacement s'approche d'un pic.

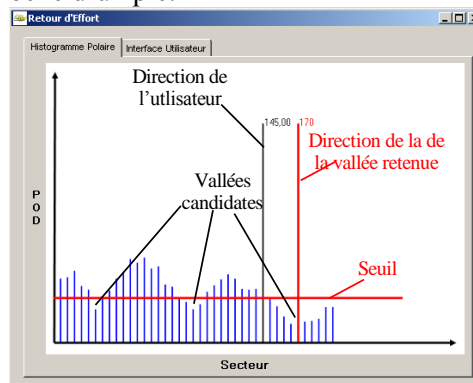


Fig.6 : Histogramme de densité d'obstacles

c) Evaluation du joystick en situation réelle

Nous avons demandé à 5 personnes du laboratoire de conduire le fauteuil dans un environnement expérimental faisant appel à des comportements de conduite différents [15]. Après quelques tours d'entraînement, l'utilisateur fera d'abord un parcours sans retour d'effort puis avec retour d'effort en mode passif puis en mode actif. Les performances de conduite sont évaluées par le temps de parcours, le nombre de collisions, et par les réponses des utilisateurs au questionnaire TLX (Task load index) qui permet d'évaluer la charge de travail. Globalement les essais montrent que dans les zones difficiles une diminution des collisions et du temps de parcours est obtenue grâce au retour d'effort. En revanche la charge de travail est ressentie comme plus importante avec retour d'effort, et ce, surtout en mode actif. Cette difficulté supplémentaire semble venir des mouvements autonomes du joystick pour tenter de diriger l'utilisateur qui impliquent de sa part une plus grande concentration. Toutefois certains utilisateurs s'étant plus familiarisés avec le retour d'effort en mode actif ont refait quelques essais par la suite qui montraient alors moins de collisions et moins de charge de travail. Pour les essais suivants nous introduirons donc une phase préliminaire plus conséquente d'apprentissage de l'emploi de la commande haptique. Par ailleurs nous développons actuellement un simulateur 3D afin que des personnes handicapées puissent tester ce dispositif sans aucune prise de risque [16].

V CONCLUSION

Pour pouvoir déboucher, les recherches sur les aides robotisées à la mobilité nécessitent une évaluation par les personnes handicapées moteur. Une première étape pour instaurer cette intervention est de concevoir des dispositifs sous forme de structure légère offrant un échange simple et efficace entre l'homme et la machine. Nos travaux en ce sens se sont attachés à réaliser deux procédés d'aide à la conduite, l'un proposant une interface conviviale, pour faire appel à des fonctionnalités de navigation autonome, et l'autre instaurant un retour de force sur le joystick pour guider les déplacements. Les essais réalisés dans notre laboratoire constituent une première étape dans l'évaluation de ces procédés avant de les présenter aux personnes intéressées.

VI RÉFÉRENCES

- [1] L. Fehr, W.E. Langbein, S.B. Skaar, "Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities: A clinical survey", *J. of Rehabilitation Research and Development*, 37(3):353_360, June 2000.
- [2] R.C. Simpson, E. F. LoPresti, R.A. Cooper, "How many people would benefit from a smart wheelchair?", *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 45(1):53_71, 2008.
- [3] G. Bourhis, A. Pruski, K. Moumen, C. Bop, "The V.A.H.M. project (Autonomous vehicle for disabled)", *ECART, Maastricht*:95_96, 1990.
- [4] H.A. Yanco "Wheesley, a robotic wheelchair system: indoor navigation and user interface", *Lecture notes in computer science*, 1458: 256_68, 1998.
- [5] P. Mallet, J.M. Pergandi., "Towards smart wheelchairs", *AAATE, Lille*: 328_335, 2005.
- [6] G. Del Castillo, S. Skaar, A. Cardenas, L. Fehr, "A sonar approach to obstacle detection for a vision-based autonomous wheelchair", *Robotics and Autonomous Systems* 54: 967_981, 2006.
- [7] R.C. Simpson, D. Poirot, F. Baxter, "The Hephaestus Smart Wheelchair", *IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 10(2): 118_122, 2002.
- [8] M. Langner, "Single track system for powered wheelchairs to provide an opportunity for children to safely venture away from helpers with greater autonomy", *Journal of Intelligent Mobility* 5(1): 65_77, 2002.
- [9] P.D. Nisbet, J. Craig, J.P. Odor, S. Aitken, "Smart Wheelchairs for Mobility Training", *Technology and Disability* 5: 49_62, 1996.
- [10] T.B. Sheridan "Telerobotics, automation, and human supervisory control", *Cambridge, Mass.: MIT Press*, 1992.
- [11] G. Bourhis, O. Horn, O. Habert, A. Pruski, "The VAHM Project: Autonomous Vehicle for People with Motor Disabilities", *IEEE Robotics and Automation Magazine, Special Issue on Wheelchairs in Europe* 7(1): 21_28, March 2001.
- [12] F. Leishman, O. Horn, G. Bourhis, "Multimodal Laser Vision Approach for the Deictic Control of Smart Wheelchair", *ICOST, Tours France*: 98_107, July 2009.
- [13] J.D. Crisman, M.E. Cleary, "Progress on the Deictically Controlled Wheelchair" *Assistive Technology and AI, LNAI* (1458):137_149, 1998.
- [14] J. Borenstein, Y. Koren, "The Vector Field Histogram- Fast Obstacle Avoidance For Mobile Robots", *IEEE Trans. on Rob. and Aut.* 7(3): 278_288, 1991.
- [15] M.A. Hadj Abdelkader, G. Bourhis, B. Cherki « Commande par retour d'effort d'un fauteuil roulant électrique », CIFA 2010, Nancy, 2-4 juin 2010.
- [16] Y. Morere, S.M. Meliani, G. Bourhis, « Evaluation en simulation de la conduite en fauteuil roulant électrique », CIFA 2010, Nancy, 2-4 juin 2010.