

Robotique d'assistance aux personnes handicapées

Philippe HOPPENOT

Etienne COLLE

CEMIF-LSC, université d'Evry, 40 rue du Pelvoux, 91020 Evry cedex, France.

Courriel : hoppenot@cemif.univ-evry.fr

Courriel : ecolle@cemif.univ-evry.fr

RESUME

Le domaine d'application d'un système robotisé d'assistance à une personne handicapée a priori destiné à restaurer la fonction manipulation peut être étendu à d'autres services comme "aller voir dans une autre pièce" ou encore "aller explorer l'environnement". Pour concevoir un tel système constitué d'un véhicule porteur d'un bras manipulateur nous avons adopté une démarche incrémentale. Dans le domaine de la robotique, un compromis a été recherché entre la complexité des moyens de perception et de traitement de la machine et ses capacités d'autonomie. Chaque fonction nécessaire au déplacement du véhicule a été évaluée afin de déterminer ses limites. En partant de cette connaissance et du fait que la personne doit être impliquée dans la mission "lui rendre un service", une coopération homme-machine (CHM) a été développée dont les modes de commande sont la partie visible. Dans les différents modes de commande il y a répartition des tâches entre la personne et la machine pour réaliser les fonctions nécessaires au déplacement du véhicule. Les performances de la CHM sont évaluées dans deux types d'expérience.

MOTS CLES : Assistance aux personnes handicapées, robotique mobile, Coopération Homme-Machine.

INTRODUCTION

Le principal objectif de la robotique de réhabilitation est de restaurer complètement ou partiellement la fonction de manipulation en plaçant un bras manipulateur entre l'utilisateur et son environnement. Trois configurations de systèmes robotisés peuvent être considérées : le bras manipulateur fixé à une table (Master : Manipulator Autonomous at Service of Tetraplegics for Environment développé par le CEA et industrialisé par EPI-RAID, [1]), le bras embarqué sur un fauteuil roulant (bras Manus sur un fauteuil roulant) ou monté sur un véhicule autonome ou semi-autonome (URMAD : Mobile Robotics Unit for the Assistance to the Disabled, [2]). Cette dernière configuration permet, d'une part, de couvrir le champ d'utilisation des deux premières et élargit le domaine des utilisateurs à des personnes sévèrement handicapées ou clouées au lit. La grande adaptabilité de cette solution se paye par un accroissement de la complexité du système dû à la nécessité de le doter d'une certaine autonomie notamment pour le déplacement du véhicule. D'autre part, le véhicule peut se trouver dans une autre pièce

que la personne. Généralement, l'ajout d'une caméra embarquée sur le robot permet de renvoyer à l'utilisateur une image vidéo ; on parle de vision indirecte. Si on considère le système robotisé comme constitué du véhicule portant un bras manipulateur et une caméra orientable en site et azimuth, le domaine d'application peut aller au delà de la restauration de la fonction manipulation en permettant à la personne de se déplacer virtuellement dans son appartement grâce à la caméra mobile. Par exemple, l'utilisateur envoie le robot "voir" quelle personne se trouve dans la pièce d'à côté, explorer un lieu inconnu ou encore rechercher un objet dans l'appartement.

La conception d'un bras manipulateur embarqué sur un véhicule fait appel à deux principaux domaines de recherche. La robotique a pour but de donner le maximum d'autonomie au système. Le principe retenu ici est de trouver le meilleur compromis entre la complexité des moyens de perception et de traitement du robot et ses capacités d'autonomie afin de réduire les coûts. On admet que le système ne sache pas tout faire et que certaines tâches sont réalisées en collaboration avec l'utilisateur. C'est le concept de semi-autonomie.

Le deuxième thème de recherche du projet, la coopération homme machine, cherche à pallier les limites du système d'assistance en partant du principe que l'homme et la machine possèdent chacun des capacités de perception, de décision et d'action. Le service à la personne est rendu en choisissant au mieux suivant certaines conditions les capacités de l'un ou de l'autre. Déterminer les conditions pertinentes et les modalités de contribution de l'homme et de la machine à la réalisation de la tâche est un des points clés à résoudre. Cependant l'utilité majeure de la coopération est de faire en sorte que le système ne fasse pas à la place de l'utilisateur mais qu'il soit impliqué dans la tâche en cours. Le degré d'implication de la personne dépend de différents facteurs qu'on peut catégoriser : humain (la fatigue, ...), système (incapacité de réaliser une action, ...), tâche (intéressante, répétitive, ...). La mise en place de la coopération est un problème difficile qui est encore à l'heure actuelle traité au cas par cas.

Ce papier est organisé en deux chapitres. Le premier traite de l'autonomie apportée par la robotique et évalue les limites du système véhicule. Le déplacement d'un robot mobile fait appel à trois fonctions : la planification qui définit la trajectoire pour aller d'un

point source vers un point destination, la navigation qui assure le suivi de la trajectoire malgré des perturbations telles que la présence d'obstacles et la localisation qui calcule la position et l'orientation de la base mobile. C'est de loin la fonction la plus complexe. Le deuxième chapitre s'intéresse à la coopération homme machine appliquée au déplacement du véhicule dans un appartement. L'intervention humaine est possible dans chacune des fonctions : planification, navigation et localisation. L'efficacité de la coopération a été évaluée au travers d'une expérience de déplacement du véhicule dans un appartement. L'opérateur bénéficie de modes de commande manuel, semi-automatique et automatique.

AUTONOMIE DE LA BASE MOBILE

La première phase du travail consiste à étudier l'autonomie que la base mobile peut atteindre avec la contrainte de faible coût imposée par l'application. Les capacités de perception de la base mobile sont alors limitées. Trois types de tâches doivent être réalisés pour réussir une mission de déplacement vers un objet donné. La planification trouve un chemin pour se rendre au but voulu. Une connaissance préalable de l'environnement est requise. La navigation suit le chemin déterminé par la planification. En particulier, certains objets (les chaises par exemple) ne peuvent pas être modélisés car leur position dans l'environnement n'est pas fixe. Ils peuvent alors se trouver sur la trajectoire planifiée et doivent être évités par le robot. La localisation de la base mobile est indispensable aux deux tâches précédentes. Avant de présenter les capacités d'autonomie de la base mobile pour chacune de ces tâches, une description des moyens de perception et d'action du robot est donnée.

Description du robot

La base mobile possède plusieurs systèmes de perception répartis en deux familles : les systèmes proprioceptif et extéroceptif. La première famille comprend l'odométrie qui calcule la position du robot de manière itérative à partir du mouvement des roues. Simple à mettre en œuvre, elle génère néanmoins une erreur non bornée sur la position.

La seconde famille comporte des capteurs à ultrasons qui donnent des renseignements sur l'environnement du robot. Ils sont utilisés pour l'évitement des obstacles (navigation) et la correction de l'erreur de position odométrique (localisation). Une caméra a été ajoutée pour le retour d'information du superviseur humain. La caméra n'est utilisée que dans la CHM et n'intervient pas actuellement pour l'autonomie du véhicule.

Pour évoluer dans l'environnement, le robot est motorisé par des composants du commerce utilisés dans les fauteuils roulants électriques (DX). Ce choix

garantit la fiabilité de la commande et un suivi technique de la base mobile par les techniciens de maintenance de l'AFM. La base étant circulaire, les deux roues motrices permettent de réaliser tout type de trajectoire.

Planification

Dans un environnement connu, cette tâche a déjà fait l'objet de plusieurs études. Des solutions sont proposées dans [3] et [4]. Celle retenue pour le projet ARPH (Assistance Robotique aux Personnes Handicapées) consiste à générer un graphe de visibilité représentant tous les chemins possibles. Le chemin le plus intéressant est choisi grâce à l'algorithme A*. Il peut tenir compte de la longueur du chemin mais aussi de paramètres tels que l'encombrement supposé d'une pièce ou une meilleure réponse des capteurs.

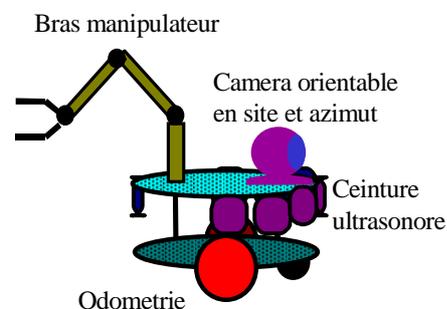


Figure 1 : Description de la base mobile.

Navigation

A partir de la liste des points de passage établie par l'étape de planification, la navigation conduit le robot à sa destination. Si l'environnement est totalement modélisé et que le système de localisation est suffisamment précis, le suivi de la trajectoire planifiée est simple. En effet, elle emprunte un chemin libre. En revanche, si l'environnement n'est pas totalement modélisé ou si le système de localisation est défectueux, des obstacles imprévus peuvent se trouver sur la trajectoire du robot. Pour les éviter, il faut dans un premier temps les détecter. Les capteurs à ultrasons placés en ceinture autour du robot donnent des informations de distance du robot à ces obstacles. De là, différentes techniques sont proposées dans la littérature. Une première consiste à remettre à jour la connaissance sur l'environnement à partir des données extéroceptives et à planifier à nouveau une trajectoire ([5]). Cette méthode est lourde, coûteuse en temps et en moyen de perception. La technique des champs de potentiel est très répandue pour la navigation ([6]). Le but à atteindre crée une force attractive. Les objets de l'environnement et les obstacles perçus créent des forces répulsives. Cet ensemble de forces guide le robot. Le défaut majeur de cette méthode reste les minima locaux. Borenstein utilise des grilles d'occupation mises à jour en ligne

pour l'évitement des obstacles ([7]). Les systèmes à base de règles floues sont aussi utilisés pour la navigation. A partir d'un petit nombre de règles de type "si la distance à droite est grande et la distance à gauche est petite alors aller vers la droite", l'évitement des obstacles est assuré ([8]). Cette dernière méthode est utilisée dans le projet ARPH. Pour valider cette approche, le contrôleur flou a été implanté sur deux robots différents : l'un de dimension maximale 40 cm avec des capteurs à ultrasons, l'autre de dimension maximale 5 cm avec des capteurs à infrarouge. Les résultats présentés dans [9] montrent que la méthode est robuste aux mesures aberrantes et au changement de caractéristiques de la base mobile (dimension et capteur).

Localisation

Il existe deux grandes familles de localisation ([10]). La localisation relative permet de déterminer la position courante d'un robot mobile en fonction des positions antérieures et de la mesure des ses déplacements. Simple à mettre en œuvre, elle présente un inconvénient majeur : à cause de sa définition même (fonctionnement incrémental), l'erreur de position n'est pas bornée. La localisation absolue permet de déterminer la position courante du robot mobile grâce à des mesures effectuées sur des repères de position connue. Plus lourde et plus complexe à mettre en œuvre elle présente néanmoins l'avantage de donner la position avec une erreur bornée. Chacune des familles a donné lieu à différents travaux présentés dans [11].

L'objectif dans le projet ARPH est la localisation dans un environnement partiellement connu avec présence d'obstacles à l'aide d'un système de perception limité à un odomètre et une ceinture ultrasonore. L'odométrie est connue pour présenter une erreur systématique, dérive fonction de la distance parcourue, et une erreur non-systématique donc imprévisible due à un glissement ou un patinage des roues ([7]). La technologie ultrasonore est généralement limitée à la proximétrie de par ses caractéristiques métrologiques moyennes : une résolution longitudinale moyenne, une résolution latérale faible et un taux de mesures aberrantes élevé. Ces conditions difficiles nous ont amenés à hiérarchiser la fonction localisation en trois niveaux de comportement adaptés aux différentes situations envisageables : localisation automatique en ligne, localisation automatique hors ligne, coopération homme-machine. Chaque comportement fait appel à des algorithmes particuliers, peu sensibles au fort taux de mesures aberrantes et à la présence d'obstacles par définition non modélisés. Tant que la situation est jugée normale, le robot connaît approximativement sa position et son orientation. L'odométrie remet à jour, en ligne, cette dernière information sous la surveillance du

système ultrasonore. Les résultats ([12]) montrent que la fonction reste opérationnelle jusqu'à une erreur systématique de l'odométrie de l'ordre de 4% en présence d'un ou deux obstacles.

Quand le système se juge perdu, la décision pouvant être prise en collaboration avec l'opérateur humain, une procédure automatique de localisation hors ligne est activée. Il s'agit de trouver la position du robot à partir d'un relevé panoramique ultrasonore comparé avec la connaissance a priori de l'environnement. Les résultats présentés dans [13] montrent une réussite de localisation de 95% dans une pièce rectangulaire avec obstacle. Le dernier niveau correspond à l'intervention de la personne. Elle est présentée dans le paragraphe "coopération homme-machine".

Discussion

Au vu des résultats obtenus, les tâches de planification et de navigation sont opérationnelles pour le projet ARPH. Deux voies peuvent néanmoins être encore explorées. En planification, l'algorithme A* n'intègre que la distance à parcourir comme critère de choix. D'autres paramètres peuvent être pris en compte. L'encombrement supposé d'une pièce, déterminé par l'opérateur ou les missions précédentes, peut pénaliser certaines zones voire les interdire complètement. Le passage près de certains objets caractéristiques ou l'évitement de zones, où la réponse des capteurs ultrasons est dégradée, est une des voies pour favoriser la localisation en cours de la mission. Parallèlement des études sont poursuivies sur la technologie ultrasonore pour augmenter leur performance pendant la navigation.

Quant à la localisation, des difficultés persistent. L'odométrie et les capteurs à ultrasons ne sont pas suffisants pour obtenir une localisation automatique de bonne qualité. Deux directions sont envisagées pour pallier ce déficit. En ligne, l'utilisation d'autres capteurs est à l'étude. L'orientation étant un paramètre important (il influence aussi la position en x et y), un gyromètre est prévu. La caméra présente pour le retour d'information à l'utilisateur peut aussi apporter des informations. Une fusion entre ces différentes données devrait améliorer les résultats. Hors ligne, la coopération avec le superviseur humain est envisagée. La désignation grâce à la caméra d'objets modélisés qui joueraient le rôle d'amers, permettra par triangulation de déterminer la position et l'orientation du robot.

COOPERATION HOMME-MACHINE

Le système d'assistance est composé du véhicule muni d'un bras manipulateur et d'une station de contrôle-commande qui permet à la personne de gérer la mission (Figure 2). L'objectif de la mission est de rendre un service à la personne, par exemple aller chercher un

objet, aller voir ou aller explorer, via une coopération homme machine. Les modes de commande du véhicule sont la partie émergée de la CHM. Le degré d'implication de l'utilisateur est variable suivant le mode ; faible en mode automatique jusqu'à total en mode manuel. Connaissant les capacités d'autonomie

du véhicule pour les trois tâches nécessaires à son déplacement, trois différents modes de commande ont été élaborés. La table 1 résume pour chacun la répartition des sous-tâches entre l'homme et la machine lors de l'exécution des tâches planification, navigation et localisation.

Mode de commande	Planification	Navigation	Localisation
Mode 1	Choix du but : homme Calcul du chemin : machine	Supervision : homme Contrôle-commande : machine	En ligne : machine Supervision : homme Hors ligne : CHM
Mode 2	Choix but : homme Auto-suivi : par la caméra : machine	Supervision : homme Contrôle-commande : machine	En ligne : machine * Supervision : homme Hors ligne : CHM
Mode 3	Contrôle-commande : homme	Contrôle-commande : homme (assisté par la machine)	En ligne : machine * Supervision : homme Hors ligne : CHM

1) CHM : Coopération Homme-Machine

2) * : La fonction peut être désactivée.

Table 1 : Différents modes de commande pour les différentes tâches.

Les modes sont d'abord décrits puis évalués expérimentalement.

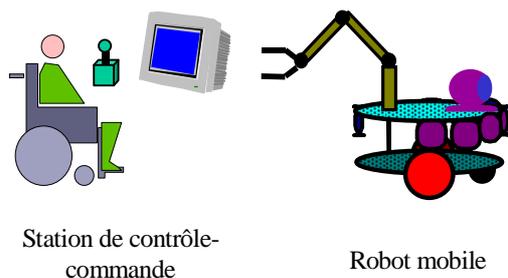


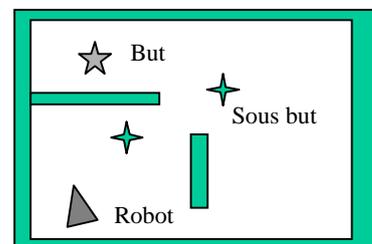
Figure 2 : Architecture du système d'assistance.

Planification

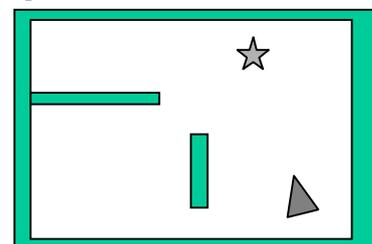
Pour cette première tâche, l'homme et la machine ont la capacité de déterminer le chemin à suivre pour atteindre un but donné. Dans tous les modes, c'est l'homme qui définit le but (Figure 3). En mode 1, la désignation du but peut être de bas niveau (pointage sur un plan de l'environnement) ou de haut niveau par exemple désignation de la télévision. L'algorithme définit des points de passage, l'opérateur pouvant en imposer certains. Dans le mode 2, la personne pointe le but à l'aide de la caméra qui reste centrée sur l'objet grâce à sa fonction d'auto-suivi. Le robot avance dans la direction pointée par la caméra. C'est un comportement proche de celui d'une personne se dirigeant vers un objet qu'elle recherche. En mode 3, la planification est réalisée en ligne par l'opérateur, qui pilote manuellement le robot, en fonction du retour vidéo.

Navigation

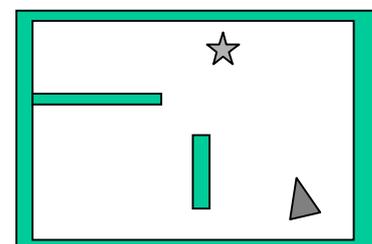
De même que pour la planification, l'homme et la machine possèdent la capacité de suivre le chemin



Mode 1 : La personne définit le but sur le plan.



Mode 2: La personne définit le but sur l'image vidéo. La caméra utilise sa fonction de suivi d'objet.



Mode 3: La personne téléopère le robot. La caméra est utilisée comme retour d'information.

Figure 3 : Planification en fonction des modes de commande. défini précédemment. Dans les modes 1 et 2 le véhicule se charge du suivi automatique avec évitement d'obstacles. L'opérateur garde un rôle de supervision.

Dans le mode 3, la personne pilote directement le robot. La navigation est réalisée par l'opérateur en fonction des informations dont il dispose : position du robot donnée par l'odométrie et mesures des capteurs à ultrasons sur l'écran de contrôle, vision directe dans le cas où le robot est dans la même pièce que la personne et vision indirecte via une image caméra dans le cas contraire. L'opérateur est totalement maître du déroulement de la mission.

Localisation

Dans le cas de cette tâche, l'utilisateur n'apporte pas les mêmes compétences que la machine notamment en terme de précision mais aussi de capacités de perception et de décision. En fonctionnement normal, le véhicule connaît sa situation à l'intérieur de l'appartement de façon précise par les capteurs (cf chapitre autonomie). Mais cette fonction automatique n'est pas complètement fiable. Le robot n'a qu'une vue locale, incomplète et imprécise de son environnement. L'intervention de la personne peut être de différents ordres : i) détection d'erreur, ii) apport d'une information approximative telle que "le robot est près du réfrigérateur", iii) participation au processus de localisation.

La coopération pour la localisation porte actuellement uniquement sur la détection d'erreur de localisation en ligne. Une fois détectée, la localisation hors ligne est lancée. A partir des informations disponibles (odométrie, mesures des capteurs à ultrasons et connaissance partielle de l'environnement), il faut déterminer si la position calculée en ligne du robot est la bonne. Deux sources d'erreurs doivent être considérées en référence à [7]. Une erreur systématique de l'odométrie induit une dérive de la position si le système de localisation en ligne n'est pas suffisant pour la corriger. Une erreur non systématique (un glissement par exemple) induit une erreur importante immédiate. L'idée est de mesurer la cohérence entre les différentes données : si les mesures des capteurs à ultrasons prises de la position calculée du robot coïncident avec la connaissance de l'environnement, alors la position est correcte. En plus des informations brutes, un indicateur mesurant cette cohérence est retourné à l'opérateur. A l'aide de ces informations, l'opérateur doit définir i) si le robot est perdu ou non ii) de quel type d'erreur il s'agit, iii) la position du robot si celle calculée et erronée.

Evaluation

La coopération a été évaluée par deux expériences où des sujets ont été mis en situation réelle : la première afin de tester l'efficacité des modes de commande pour le pilotage du robot (planification et navigation), l'autre pour la détermination des erreurs de localisation. Les

expériences ont été effectuées en collaboration avec le laboratoire de psychologie expérimentale de Rennes II. Les protocoles expérimentaux ont été définis en commun.

Evaluation des modes de commande

La mission consiste à aller chercher un objet et se placer devant dans un environnement composé de deux pièces. Cette spécification permet d'étudier deux types de mission en fonction d'un but visible ou non par l'opérateur. Une erreur de position initiale est introduite aléatoirement (un cas sur deux en moyenne) pour analyser la stratégie de l'opérateur (aucun diagnostic de localisation n'était ici demandé). En croisant ces deux variables on obtient des séries de quatre tests. Chaque sujet a effectué quatre séries de tests soit seize tests. Le premier constat est que les onze personnes qui ont testé le système ont toutes réussi à mener à bien les missions quelles que soient les conditions : les trois modes de commandes proposés sont suffisants pour piloter la base mobile. On note ensuite un effet d'apprentissage : le temps pour réaliser une mission diminue avec l'avancée dans les tests. Il est intéressant de remarquer que la durée d'une mission n'est pas fonction de l'erreur de position initiale ou non. Or, le mode 1 est assez peu utilisé car pas assez rapide aux dires des sujets. En fait, la position du robot n'est pas très utile dans les deux autres modes : le retour caméra suffit à l'utilisateur. On peut aussi noter que la durée de la mission n'est pas dépendante du but choisi (visible ou non) mais que le mode 2 est utilisé plus longtemps pour un objet invisible. Cela montre la pertinence de ce mode. En revanche, dans le cas d'un objet invisible, le nombre de modes utilisés est plus élevé ce qui s'explique par une mission plus complexe à réaliser. On peut enfin remarquer que l'utilisation du mode manuel est corrélée avec chacun des modes automatiques ce qui est révélateur des stratégies mises en places par les opérateurs.

Evaluation de la détection d'erreur de localisation

La détection des erreurs de localisation a été réalisée en deux temps. Une première série de tests a permis de déterminer les informations utiles. La seconde a mesuré l'intérêt de l'indicateur de cohérence fourni par le robot et la confiance des opérateurs dans leurs choix. Dans la première série de tests, trois sortes de trajectoires étaient proposées au sujet : i) avec une erreur de position initiale, ii) avec une erreur d'odométrie, iii) sans erreur. Le croisement de deux types d'informations, mesures des capteurs à ultrasons et mémoire de la trajectoire réalisée, a donné quatre retours d'information possibles. Les premiers essais ont fait ressortir qu'il n'y avait pas de différence entre les sujets valides et les sujets myopathes. Il semble donc envisageable d'améliorer la mise au point du prototype

en l'évaluant avec des personnes valides avant de le proposer à des personnes handicapées pour une phase d'évaluation finale. Les essais suivants ont montré que des experts obtiennent de meilleurs résultats que des novices : un apprentissage du système est donc possible. Pour les derniers essais une contrainte de temps a été appliquée. Elle oblige les sujets à analyser les informations. Dans les essais précédents, certains attendaient la fin du parcours pour se prononcer ce qui limite l'intérêt de la détection. Il ressort que les erreurs sont bien détectées (100%) mais que des fausses alarmes subsistent (30%). Le comportement des sujet est prudent. La détection du type d'erreur est assez importante (83%). En revanche, la détermination de la position réelle en cas d'erreur s'est avérée impossible.

La seconde série de tests montre que l'indicateur amène les sujets à de meilleurs résultats s'il est exprimé en pourcentage et pas sous forme analogique. Cet effet est sensible pour les bonnes trajectoires et celles avec une erreur de position initiale. En revanche, il n'apporte pas d'amélioration dans le cas d'une erreur d'odométrie. En effet, sa variation est trop lente et l'analyse des données brutes est plus rapide. Le second enseignement de cette étude porte sur le degré de confiance des opérateurs. Indépendant du format de l'indicateur (pourcentage ou analogique) il améliore le degré de confiance dans le cas d'une trajectoire sans erreur. La non activité dans ce cas (il faut attendre la fin de la mission) et le risque encouru poussent l'opérateur à être moins confiant. Si l'indicateur est présent, l'opérateur est conforté dans son choix. Les sujets gardent néanmoins un comportement libéral c'est à dire avec des fausses alarmes mais sans omission. Seule une utilisation en conditions réelles peut permettre à un utilisateur de comparer le coût d'une fausse alarme avec celui d'une omission.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif du projet ARPH est la conception d'un système robotisé capable de restaurer la fonction manipulation. Il est apparu que les solutions technologiques et notamment l'utilisation d'une caméra orientable permettent d'élargir le champ d'application de cette assistance. Pour éviter la complexité et la faible évolutivité d'un système tout automatique mais surtout parce qu'il est important que la personne participe à la réalisation de la tâche d'assistance le projet s'est orienté vers une machine semi-autonome. La CHM permet de profiter des compétences de l'homme et de la machine. La redondance dans l'exécution de certaines tâches permet de construire des modes de commande dont les domaines d'action se recouvrent partiellement ; les résultats actuels montrent que pour les tâches de planification et de navigation cette approche est efficace. La tâche de localisation requiert quant à elle un complément d'étude pour fiabiliser les modes

automatiques et intégrer plus largement l'homme en profitant de ses capacités de perception et de traitement notamment en ce qui concerne l'image.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Jean-Pierre Gaillard, maître de conférence à l'université de Rennes II, et ses étudiants de maîtrise de psychologie expérimentale qui ont réalisé les expérimentations présentées.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 R. Cammoun, J.M. Detriché, F. Lauture, B. Lesigne : « Evaluation of the MASTER 1 Robotic System and Design of the New Version » Proc. of the 6ème Int. Conf. On advanced Robotic (ICAR 93), Tokyo, Japan 1993, pp. 319-392.
- 2 P. Dario, E. Guglielmi, C. Male, M. Dinatale : « URMAD : An Autonomous Mobile Robot System for the Assistance to the disabled » Proc. of the 6ème Int. Conf. On advanced Robotic (ICAR 93), Tokyo, Japan 1993, pp. 341-346.
- 3 J.C. Latombe : « Robot motion planning » - Academic publishers, 1991.
- 4 A. Pruski : « Robotique mobile - La planification de trajectoire » - Hermes, 1996.
- 5 A. Zelinsky : « Mobile robot navigation - Combining local obstacle avoidance and global path planning » -pp 389-394, 1991.
- 6 O. Khatib : « Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots » - Int. Journal of Rob., Res. 5, n°1, 1986, pp 90-99.
- 7 Borenstein J. : « Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots » - IEEE Trans on Rob and Auto, vol. 12, N°6, dec 1996, pp869-880.
- 8 Hoppenot P., Benreguieg M., Maaref H., Colle E. and Barret C. : « Control of a medical aid mobile robot based on a fuzzy navigation » - IEEE Symposium on Robotics and Cybernetics, July 1996, pp 388-393.
- 9 M. Benreguieg, P. Hoppenot, H. Maaref, E. Colle, C. Barret : « Fuzzy navigation strategy : Application to two distinct autonomous mobile robots » - Robotica 1997, vol. 15, pp 609-615.
- 10 C. Fargeon; J.P. Quin : « Robotique mobile » - Teknea.
- 11 P. Hoppenot : « Contribution de la robotique mobile à l'assistance aux personnes handicapées » - Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne (EVE), 27 nov. 1997.

- 12 P. Hoppenot, E. Colle : « Real-time localisation of a low-cost mobile robot with poor ultrasonic data » - IFAC journal, Control Engineering practice 1998, vol. 6, pp.925-934.
- 13 P. Hoppenot, E. Colle and C. Barat : « Off line localisation of a mobile robot using ultrasonic measures » - Robotica, à paraître.