

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine

Etienne Colle* – Philippe Hoppenot* - Jean Pierre Gaillard – Laurent Claquin****

**CEMIF-LSC, université d'Evry
40 rue du Pelvoux, 91020 Evry cedex, France.
ecolle@cemif.univ-evry.fr
hoppenot@cemif.univ-evry.fr*

***Laboratoire de psychologie expérimentale – Université de Rennes 2
6 Avenue Gaston Berger 35043 Rennes cedex
jean-pierre.gaillard@Uhb.fr*

RESUME. Pour concevoir une assistance robotisée constituée d'un véhicule porteur d'un bras manipulateur nous avons adopté une démarche incrémentale. Concernant l'aspect robotique du projet, 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. Pour certains modes de commande appelés « mixtes » 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.

ABSTRACT. For the design of an aid system composed of a manipulator arm mounted on a mobile robot an iterative approach has been followed. Concerning the robotic aspect of the project a compromise between the complexity of the machine and its autonomy abilities has been researched. Each function needed for the robot move has been evaluated in order to determine its limits. From those knowledges and the fact the person must be involved in the mission which is "to do the person a favor" a close man-machine co-operation(MMC) has been developed. The control modes are the visible part of the MMC. In some control modes, called "mixed modes", the control of degrees of freedom of the robotic system is shared between man and machine. The CHM performances are evaluated in two types of experiment .

MOTS-CLES : Assistance aux personnes handicapées moteur, robotique de réhabilitation, Coopération Homme-Machine.

KEY WORDS : Disabled people assistance, rehabilitation robotics, Man-Machine Cooperation..

1. Introduction

Le principal objectif de la robotique de réhabilitation est de restaurer complètement ou partiellement la fonction de manipulation de la personne 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 comme Master (Manipulator Autonomous at Service of Tetraplegics for) développé par le CEA et industrialisé par EPI-RAID, [CAM 93], 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), [DAR 93]. Cette dernière configuration permet de couvrir le champ d'utilisation des deux premières et élargit le champ des utilisateurs potentiels 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 système constitué 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 la machine ne sait 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 que celui-ci 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

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

(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 trois chapitres. Le premier chapitre décrit le système dans sa globalité. Le deuxième développe l'autonomie du porteur pour la fonction mobilité avec un système de perception restreint à l'odométrie et une ceinture télémétrique ultrasonore. 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 troisième 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'expériences réelles de déplacement du véhicule dans un appartement. L'opérateur bénéficie de modes de commande manuel, semi-automatique et automatique.

2. Description de l'ensemble du système

A.R.P.H. (Assistance Robotisée pour Personne Handicapée) est composée d'une station de control-commande et d'un bras manipulateur Manus monté sur un robot mobile (figure 1).

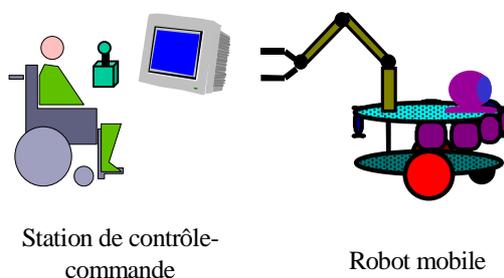


Figure 1. Description du système A.R.P.H.

2.1. Porteur

Pour des raisons de coûts, le porteur est constitué d'une structure mécanique moulée en fibre de verre motorisée à l'aide des composants du commerce pour fauteuil roulant, ce qui assure une très bonne maintenabilité et fiabilité. La perception, limitée dans la version de base à un dispositif odométrique et une ceinture ultrasonore, est actuellement complétée par une caméra orientable, elle aussi du commerce pour les raisons évoquée précédemment. L'intelligence

embarquée est multiprocesseur : un calculateur pour gérer les fonctions de haut niveau dialogue avec un carte microcontrôleur de gestion de l'odométrie et de la ceinture ultrason.

La caméra orientable en site et azimut joue plusieurs rôles :

- Assistance à la perception en fournissant un retour vidéo à l'utilisateur quand le robot se trouve dans une autre pièce que l'utilisateur (vision indirecte).
- Assistance à la commande. Par analogie avec le comportement d'une personne qui se déplace dans la direction de son regard, l'utilisateur pilote le déplacement du robot indirectement via la caméra.
- Localisation du porteur dans son environnement par appariement entre une ou plusieurs vues données par la caméra et un modèle de l'environnement. Cette approche peut être étendue à la recherche et la saisie automatique d'objets usuels prémodélisés. Ce dernier rôle de la caméra fait partie des travaux en cours et n'est pas présenté ici.

2.2. Station de contrôle-commande

La station est composée :

- D'organes de commande adaptés au handicap de la personne. Chaque personne étant un cas particulier, le système doit évidemment être capable de s'interfacer avec l'ensemble des dispositifs existants (dispositif proportionnel, tout ou rien, ...).
- D'un écran de contrôle affichant différents types d'information.
 - une image vidéo live de ce qui est vue par le robot sur laquelle peuvent être incrustées par réalité augmentée des données sous forme graphique ou textuelle. Des images synthétiques et animées délivrées par des caméras virtuelles selon des techniques issues de la réalité virtuelle. Sur ces images, des guides peuvent être ajoutés pour assister l'opérateur.
- D'un panneau de commande complémentaire de l'organe de commande.

La figure 2 donne un exemple de ce que peut présenter l'écran. En haut à gauche une vue vidéo live donnée par la caméra embarquée sur le robot. En bas à gauche et en haut à droite des vues virtuelles permettant à l'utilisateur de mieux apprécier les positions relatives des objets. Il est possible d'intégrer à cette vue une représentation du robot animée en fonction de la réalité. En bas à droite le panneau de commande de la caméra et du robot.

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

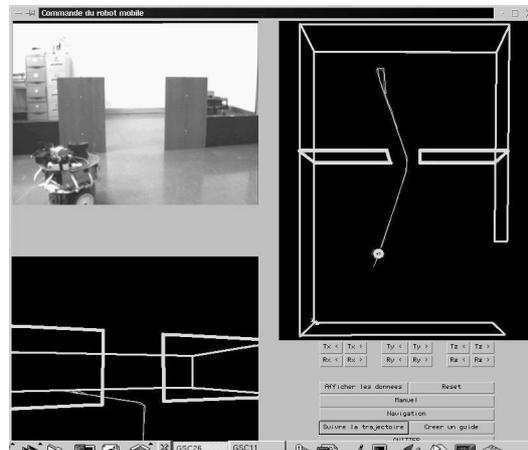


Figure 2. Exemple d'écran de contrôle basé sur une approche de type réalité virtuelle

La figure 3 illustre le concept de guide virtuel. Dans cet exemple, le guide est un chemin destiné à faciliter le passage de la porte. Si le guide est passif ce n'est qu'une indication fournie à l'utilisateur. S'il est actif certains degrés de liberté du robot sont contraints.

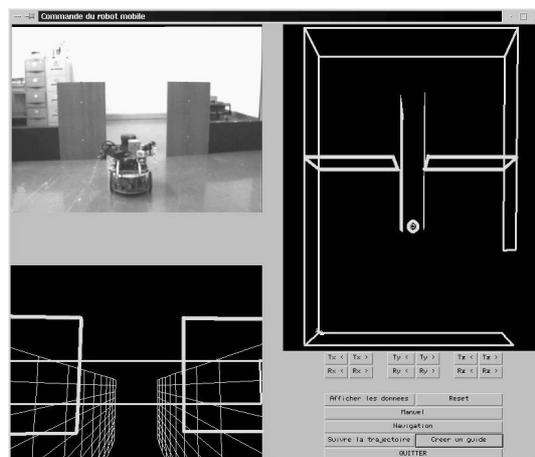


Figure 3. Guide virtuel aidant au passage de porte

2.3. Modes de commande

La personne développe des stratégies pour réussir sa mission. La mission principale consiste à aller vers un objet désiré et le rapporter. Une stratégie se traduit par une suite de modes de commande qui peuvent être automatiques ; la

machine réalise l'opération, manuels ; la personne pilote l'opération, ou mixtes. Dans ce cas la commande des degrés de liberté de la machine est partagée entre l'utilisateur et la machine. Par exemple la personne pilote la direction à suivre et le robot évite les obstacles automatiquement. Ces modes mixtes présentent plusieurs avantages :

- réduire la complexité de la machine et par la même son coût en utilisant les compétences en termes de perception, de décision et d'action de l'homme et de la machine.
- Faire participer la personne au « service rendu par la machine ». La personne redevient libre de ses choix.

La construction de stratégies par l'utilisateur pour réaliser des tâches complexes requiert la mise en place d'une coopération homme machine étroite pour favoriser d'une part le changement de modes, et d'autre part le développement de modes de commande mixtes seuls capables de répondre à des besoins évolutifs sans surcharger la personne.

Si les modes de commande sont redondants, l'utilisateur, pour réaliser une même mission, pourra choisir parmi plusieurs stratégies plus ou moins automatiques suivant les conditions, envie, état de fatigue de la personne,

Le principal problème lié à la notion de stratégie est le changement de mode. Par exemple, il est toujours très délicat de passer d'un mode automatique à un mode manuel. Non seulement au niveau de la prise de décision mais aussi du transfert de commande. Pour faciliter le changement de mode nous travaillons sur deux voies : améliorer la compréhension du fonctionnement de la machine par la personne en la dotant de comportements de type humain et seconder la personne dans l'évaluation de la tâche en cours pour l'aider dans sa prise de décision.

3. Autonomie de la base mobile

La première phase du travail consiste à étudier l'autonomie que la base mobile peut atteindre avec la contrainte du 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. Etudions les moyens de perception et d'action du robot avant de présenter ses capacités d'autonomie .

3.1. Description du robot

Le robot (figure 1) 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 base étant circulaire, les deux roues motrices permettent de réaliser tout type de trajectoire.

3.2. Planification

Dans un environnement connu, cette tâche a déjà fait l'objet de plusieurs études. Des solutions sont proposées dans [LAT 91] et [PRU 96]. Celle retenue pour le projet ARPH 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.

3.3. 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 ([ZEL 91]). Cette méthode est lourde, coûteuse en temps et en moyen de perception. La technique des champs de potentiel est très répandue pour la navigation ([KHA 86]). 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

E. Collé, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

l'évitement des obstacles ([BOR 96]). 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 ([HOP 96]). 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 [BEN 97] montrent que la méthode est robuste aux mesures aberrantes et au changement de caractéristiques de la base mobile (dimension et capteur).

3.4. Localisation

Il existe deux grandes familles de localisation. La localisation relative permet de déterminer la position courante d'un robot mobile en fonction des positions antérieures et de la mesure de 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 [HOP 97].

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 ([BOR 96]). La technologie ultrasonore est généralement limitée à la proxémétrie 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 ([HOP 98]) 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

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

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 [HOP 00] 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".

3.5. 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.

4. Coopération 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. 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

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

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 du 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 désactivée.

2) * : La fonction peut être

Table 1. Modes de commande associés aux différentes tâches

Les modes sont d'abord décrits puis évalués expérimentalement.

4.1. 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. 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.

4.2. Navigation

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

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

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.

4.3. 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 [BOR 96]. 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.

4.4. 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.

4.4.1. Evaluation des modes de commande

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

4.4.1.1. *Expérience 1*

Trois modes de commande étaient disponibles.

1 - Commande manuelle du porteur mobile et de la caméra l'équipant. Mode manuel.

2 - Commande par pointage du but à atteindre sur un écran de navigation. Le robot se déplace ensuite automatiquement vers le but choisi par l'opérateur. Mode automatique.

3 - Commande de l'orientation de la caméra embarquée vers le but. Le robot se déplace automatiquement vers le but visé par la caméra. Mode caméra.

Le premier mode est un mode entièrement manuel alors que, dans les deux derniers, l'opérateur ne commande pas directement les déplacements du robot, ce sont des modes de déplacement automatique ou semi automatique.

4.4.1.2. *Tâche et procédure*

En partant d'un point d'une pièce, la tâche consistait à positionner le robot devant un objet situé dans une autre pièce en empruntant un parcours nécessitant le franchissement d'une porte. L'objet pouvait être visible ou invisible du point de départ (OV et OI). La position de départ pouvait comporter une erreur de position initiale (E). Par croisement on avait donc quatre situations OV, OI, EO, EOI. Au début de chaque session le sujet était invité à circuler sur le parcours afin d'identifier les objets et leur positionnement. Les 11 sujets étaient dans un premier temps familiarisés avec le robot et l'utilisation des modes de commande, puis on procédait à une série de 12 essais soit 4 essais par situation.

4.4.1.3. *Sujets et plan expérimental*

Les sujets, non handicapés, masculins travaillant au CEMIF, étaient étudiants ou chercheurs et avaient entre 25 et 45 ans. Le plan expérimental comportait deux variables indépendantes principales: La position de l'objet a approché OV ou OI, facteur O à deux modalités et la position de départ du robot avec ou sans erreur de position initiale, facteur E à deux modalités. Une variable indépendante secondaire constituée par la répétition de chaque modalité, facteur R à quatre modalités. Chaque essai représente une mission pour le sujet. On considère le facteur sujet comme facteur aléatoire dans l'analyse, facteur S à 11 modalités. Tous les facteurs sont croisés entre eux. Le plan quasi complet s'écrivait donc de la façon suivante :

S11x O2xE2xR4

Les variables dépendantes étaient le temps d'utilisation de chaque mode de commande et le nombre de fois où chacun d'eux était utilisé.

4.4.1.4. *Résultats*

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

Le temps moyen de réalisation d'une mission fut d'environ 4'30" lors des premiers essais de chaque situation et d'environ 2' lors des derniers essais. On observe, pour les trois modes de commande utilisés, une diminution du temps de réalisation de la mission en fonction des essais pour les trois modes de commande utilisés ($F(3,160) = 11,75$; $p < .01$). Sur le total des 16 essais, toutes situations confondues, les sujets n'utilisent pas autant chaque mode de commande. Les modes automatique caméra et manuel sont les plus utilisés, respectivement 45% et 37% du temps total d'utilisation. Le mode automatique but est relativement délaissé, 18% du temps total (figure 4).

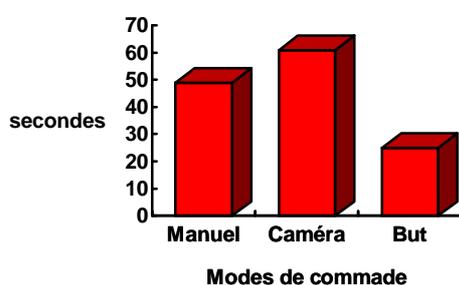


Figure 4. Temps moyens d'utilisation en secondes de chaque mode de commande

Le temps d'attente pour passer d'un mode de commande à un autre en cours de mission diminue de façon significative, de 1'30" aux premiers essais à 25" aux derniers ($F(3,156) = 7,04$; $p < .01$). Seul, le nombre moyen d'utilisations du mode automatique caméra diminue avec les essais. De deux utilisations en moyenne par mission à une utilisation ($F(1,155) = 6,91$; $p < .01$)

Lorsque l'objet est invisible, on observe un temps d'utilisation plus important des modes manuel et automatique caméra, respectivement $F(1,156) = 5,46$; $p < .02$ et $F(1,156) = 9,51$; $p < .01$. Dans cette situation, le temps d'utilisation du mode but ne varie pas de façon significative. En revanche, lorsqu'il y a une erreur de position initiale, le temps d'utilisation du mode manuel ne varie pas de façon significative en fonction de la position initiale du robot, mais il diminue en mode automatique caméra et but, respectivement $F(1,156) = 5,83$; $p < .02$ et $F(1,156) = 4,34$; $p < .05$. (figure 5).

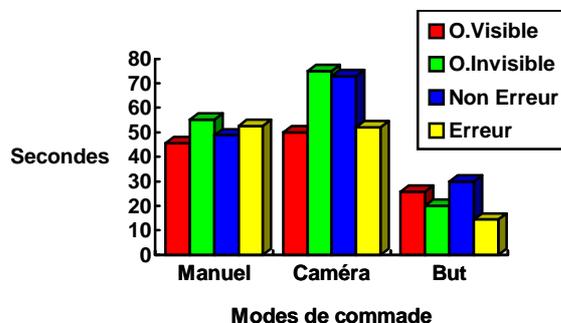


Figure 5. Temps d'utilisation moyens en secondes des différents modes en fonction de la situation

Les fréquences d'utilisation des différents modes confirment leurs temps d'utilisation. En particulier, le mode automatique caméra est plus fréquemment utilisé lorsque l'objet est invisible de la position de départ du robot, 1,74 contre 0,94 utilisation moyenne lorsque l'objet est visible ($F(1,155) = 18,29; p < .01$).

4.4.1.5. Discussion

Le but d'une aide technique est de rendre de l'autonomie à la personne. Cela signifie permettre à la personne d'exercer un minimum de contrôle, c'est à dire d'actions, sur son environnement. Le paradoxe de la robotique médicale aurait été de donner au robot le moyen d'exercer des actions sur l'environnement et à la personne très peu de moyen d'action sur le robot. La solution que nous préconisons s'inscrit donc dans une conception coopérative entre l'Homme et le robot, avec répartition des tâches ([MIL 88]) ([GAI 97]). Dans cette répartition l'opérateur est un superviseur au sens où l'entendait Sheridan ([SHE 76]). Ses capacités perceptives et cognitives sont valorisées, le robot ayant des fonctions d'exécution. Le but de cette expérience était d'évaluer les préférences à l'usage de modes de commande et de contrôle se différenciant par leur degré d'automatisme.

Les résultats laissent apparaître une préférence des sujets pour des modes impliquant une commande manuelle, au moins partielle, du robot. En cas de difficulté liée à une erreur de position initiale ou à une non visibilité de l'objet au départ, les sujets recourent au mode manuel ou à un mode semi automatique et délaissent le mode entièrement automatique. Ces résultats peuvent paraître surprenant. En effet, à tout accroissement de la difficulté d'une situation de commande/contrôle (dans notre cas erreur de position, objet invisible au point de départ) on imagine volontiers l'utilisation de mode de commande automatique pour pallier à la difficulté de contrôle rencontrée par l'opérateur. Tel n'est pas le cas ici. Les deux modes de commande préférentiellement utilisés sont caractérisés par deux aspects importants:

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

1 - Ils impliquent une action de l'opérateur.

2 - Ils permettent à l'opérateur d'exercer un contrôle visuel en relation directe avec l'action de commande.

Ces deux propriétés sont fondamentales dans la compréhension des situations de commande et de contrôle. Chez l'opérateur humain, l'action a un effet de régulation de ses activités cognitives. Perception et action sont naturellement étroitement couplées. Les activités perceptives ne prennent un sens que dans la mesure où elles servent à guider l'action motrice. Par exemple, Johannsen et Rouse ([JOH 81]) avaient déjà relevé qu'au cours de l'élaboration de scénarios alternatifs chez des pilotes, l'utilisation du pilote automatique diminuait la profondeur de leur planification en cas de modification du plan de vol (fermeture de piste pour cause de brouillard ou neige...). En revanche, elle avait un effet inverse en cas de situations d'urgence relevant d'une défaillance technique. Dans notre cas, une erreur de position initiale impose à l'opérateur une incertitude sur la trajectoire réelle du robot, des scénarios alternatifs doivent être envisagés. Les actions de commande du robot auraient un effet facilitateur sur cette activité, ce qui conduirait les opérateurs à préférer les modes de commande maintenant une part de son activité motrice.

La seconde propriété, concerne le rôle que tiennent les informations visuelles dans le contrôle de l'action. On a maintes fois mis en évidence l'importance des informations visuelles chez l'opérateur comparativement à d'autres modalités sensorielles ([GAI 97]). Cette importance tient au couplage entre le monde visuel et l'action motrice. Lorsque l'opérateur est parfaitement entraîné ce couplage est fondé sur des automatismes. Lorsqu'il est confronté à une situation peu ou mal connue il cherchera à identifier les propriétés de la situation et du dispositif technique permettant d'agir. Il s'agit donc d'un processus permettant d'identifier les contraintes du monde physique sur l'action. Ce processus n'est pas seulement analogue aux mécanismes perceptifs, il est directement lié aux transformations du champ visuel en monde visuel ([GIB 50]) ([GIB 79]). Ces propriétés sont d'une certaine façon contenues dans le monde visuel de l'opérateur. Ainsi, la perception de l'orientation spatiale, de la trajectoire du robot, de l'emplacement d'un objet invisible au départ implique la perception d'un espace qui n'existe que par des surfaces : murs, plancher, surfaces des objets. Lorsque la perception visuelle est médiatisée, on notera qu'assez généralement, seule la vidéo couplée à une caméra restitue la quasi totalité des transformations géométriques de l'image liée à la projection des objets 3D sur une surface 2D. C'est, nous semble-t-il, la raison profonde de la préférence des opérateurs pour une vision directe ou la plus proche possible de la vision directe. Elle est très directement couplée à l'action. En retour l'action régule efficacement les activités de contrôle, de décision et de planification.

4.4.2. *Evaluation de la détection d'erreur de localisation*

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

La détection des erreurs de localisation a été réalisée en deux temps. Une préexpérience a permis de déterminer les informations utiles, puis une seconde expérience a permis d'évaluer l'intérêt de l'indicateur de cohérence fourni par le robot et la confiance des opérateurs dans leurs choix.

4.4.2.1. *Préexpérience*

Trois sortes de trajectoires étaient proposées aux sujets : i) avec une erreur de position initiale, ii) avec une erreur d'odomètre, 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 résultats obtenus ont montré que le croisement des informations de trajectoire avec les impacts ultra sons sur l'écran représentait le mode de retour visuel le plus approprié pour détecter des erreurs de trajectoire. Par ailleurs, les résultats ont aussi montré qu'il n'y avait pas de différence de performance 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.

4.4.2.2. *Expérience 2*

Cette seconde expérience avait pour but de préciser les facteurs affectant la détection des erreurs de trajectoire l'intérêt d'un indicateur de cohérence et la confiance des opérateurs dans leur décision.

Le matériel utilisé était identique à celui des précédentes expériences auquel on avait ajouté un indicateur de cohérence décrit précédemment.

4.4.2.3. *Sujets*

34 sujets, étudiants valides, âgés de 18 à 25 ans ont participé à cette expérience. 25 d'entre eux, considérés comme novices en technologie, étaient étudiants en 1er année de psychologie à l'Université de Rennes 2. Les 9 autres, étudiants en technologie à l'université d'Evry, ont été considérés comme étant "experts", comparativement aux 25 novices, compte tenu de leurs compétences en robotique.

4.4.2.4. *Procédure*

Les informations de retour sur l'écran de contrôle représentant schématiquement la pièce, murs et obstacles connus concernaient :

- La trajectoire théorique passée du robot
- La position théorique du robot
- Les impacts ultrasons passés et actuels
- Un indicateur numérique ou analogique de cohérence entre les impacts ultra sons et la position des murs.

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

Les trois types de trajectoires testés étaient les suivantes:

- Avec erreur de position initiale
- Avec erreur d'odomètre
- Sans erreur

Au cours d'une première session d'apprentissage, les sujets étaient invités à contrôler les déplacements du robot sur l'écran. L'expérimentateur leur indiquait sur 9 trajectoires les moyens de détecter des erreurs de trajectoires en fonction du type de source d'erreur possible. A près cette phase d'apprentissage, les sujets devaient détecter et catégoriser 18 essais, puis donner sur une échelle, de type échelle de Lickert, en 4 points un degré de confiance dans leur décision.

Il y avait donc deux groupes de sujets : 25 novices et 9 experts. Les trajectoires étaient présentées aléatoirement : 6 trajectoires correctes - 6 avec erreur d'odomètre et 6 avec erreur de position initiale. Une même trajectoire était présentée aléatoirement deux fois dans la même condition.

4.4.2.5. Résultats

1 - Analyse de la détections des erreurs.

Conformément à la Théorie de la Détection du Signal (TDS) on a calculé la fréquence de chacun des quatre types de réponses possibles. Si on considère que lorsqu'une erreur de trajectoire intervient le signal qui doit être détecté sur l'écran est présent et que lorsque la trajectoire est correct le signal sur l'écran est absent on peut avoir quatre types de réponses possibles par le croisement du type de trajectoire - avec ou sans erreur - avec la réponse du sujet - trajectoire jugée avec ou sans erreur. Les quatre réponses possibles sont : oui correct (OC) pour les erreurs de trajectoire détectées, fausse alarme (FA) pour les bonnes trajectoires jugées mauvaises, non correct (NC) pour les bonnes trajectoires jugées comme telles et omission (OM) pour les erreurs de trajectoires non détectées.

Les résultats furent les suivants :

Décision Opérateur	Experts		Novices	
	signal absent	signal présent	signal absent	signal présent
Tc	77,8	6,5	66,7	4,3
Te	22,2	93,5	33,3	95,7

Experts	Novices	
	$d' = 2,18$	$d' = 2,14$
	$\beta = 1,93$	$\beta = 3,88$

Table 2 : Matrice des fréquences pour chaque type de réponses. Tc pour trajectoire jugée correcte (réponses "non") et Te pour trajectoire jugée erreur de trajectoire (réponses "oui"). Résultats exprimés en pourcentage

Dans la TDS la valeur de d' représente la sensibilité du récepteur sensorielle, ici la sensibilité visuelle des sujets à percevoir une erreur de trajectoire. La valeur de β l'utilité de la réponse, ici le risque de commettre une erreur de jugement et que les sujets acceptent de prendre pour chaque type de réponse.

Experts et novices détectent aussi bien les erreurs de trajectoire, les trajectoires correctes et font autant d'omissions. En revanche, les novices donnent plus de fausses alarmes que les experts, respectivement 33,3 % contre 22,2 % ($\chi^2 = 3,08$ (1); $p < .01$) (réponse : erreur de trajectoire alors que la trajectoire est correcte).

On observe pas de différences entre les experts et les novices quant la leur capacité sensorielle à détecter le signal d'erreur (valeur de d'). En revanche, les novices apparaissent plus libéraux que les experts. Ils ont tendance à donner plus de réponses de détection d'erreur même s'il n'y a pas d'erreur de trajectoire (valeur de β).

2 – Analyse du degré de confiance.

L'analyse du degré de confiance des sujets dans leurs réponses montre que les réponses erronées, de type fausses alarmes et omissions, induisent des degrés de confiance plus faibles que les réponses correctes ($\chi^2 = 210,85$ (7); $p < .01$) (figure 6).

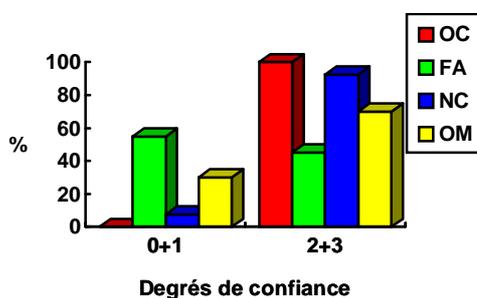


Figure 6. Fréquences des degrés de confiance en fonction du type de réponse. OC (oui correcte) pour les erreurs de trajectoire détectées, FA (fausse alarme) pour les bonnes trajectoires jugées mauvaises, NC (non correcte) pour les bonnes trajectoires jugées bonnes et MO (omission) pour les erreurs de trajectoires non détectées.

En cas d'omission, les experts sont plus confiants dans leur réponse que les novices $\chi^2 = 88,47$ (7); $p < .01$.

3 – Effet de l'indicateur de cohérence.

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

La présence d'un indicateur de cohérence, qu'il soit sous forme analogique ou en pourcentage, n'améliore pas de manière significative la détection d'erreur de trajectoire (tableau 3).

Indicateur de cohérence	Aucun	Pourcentage	Analogique
Bonnes Réponses	134	140	132
Erreurs	70	64	72
Total	204	204	204

Tableau 3. *Effet de l'indicateur de cohérence sur les réponses des sujets*

4.4.2.6. Discussion

Si dans l'ensemble, on observe que les sujets, experts comme novices, détectent bien les erreurs de trajectoire il faut noter qu'ils sont incapables d'estimer correctement la position du robot en cas d'erreur de trajectoire.

Les résultats ont montré que des experts obtiennent de meilleurs résultats que des novices, en ce sens qu'ils donnent moins de fausses alarmes. Un apprentissage du système est donc possible. Il convient cependant de souligner que les sujets sont prudents et ont tendance à privilégier les fausses alarmes en cas de doute ; ce que l'on considère ici comme un comportement "libéral" à donner des réponses "oui il y a une erreur de trajectoire" pour des trajectoires correctes.

La présence d'un indicateur de cohérence entre la position des obstacles et la position des impacts ultra sons sur l'écran n'a pas d'influence sur la détection des erreurs de trajectoire. En revanche, la présence de cet indicateur permet aux sujets de détecter plus rapidement les erreurs.

Les résultats concernant le degré de confiance des sujets dans leurs réponses invite à s'interroger sur la pertinence d'un éventuel système de détection automatique des erreurs de trajectoire. Moray et al. ([MOR 95]) avaient remarqué qu'en cas de choix entre un mode de commande automatique ou manuel, ce choix dépendait étroitement de la relation entre leur degré de confiance des opérateurs dans l'automatisme et le degré de confiance en eux-mêmes en mode manuel. Dans notre cas, leur degré de confiance chute lorsqu'ils donnent des réponses de type fausse alarme ou ne détectent pas une erreur de trajectoire. Il est fort possible qu'une utilisation en conditions réelles fasse varier le coût d'une fausse alarme avec celui d'une omission au détriment de ces dernières ce qui augmenterait l'intérêt d'une aide à la détection d'erreur de trajectoire que nous n'avons pu constater dans le cadre de cette expérimentation.

5.1 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 de l'image vidéo.

Les travaux en cours portent sur la localisation du robot dans son environnement par appariement entre une ou plusieurs vues données par la caméra et un modèle de l'environnement. Cette approche peut être étendue à la recherche et la saisie automatique d'objets usuels prémodélisés.

5. Bibliographie

- [BEN 97] Benreguiég M., Hoppenot P., Maaref H., Colle E., Barret C. : " Fuzzy navigation strategy : Application to two distinct autonomous mobile robots ", *Robotica*, 1997, vol. 15, pp. 609-615.
- [BOR 96] Borenstein J., " Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots ", *IEEE Trans on Rob and Auto*, vol. 12, N°6, dec 1996, pp. 869-880.
- [CAM 93] Cammoun R., Detriché J.M., Lauture F., Lesigne B. : " 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.
- [DAR 93] Dario P., Guglielmeli E., Male C., Dinatale M. : " 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.
- [GAI 97] Gaillard J.P. : *Psychologie de l'homme au travail : Les relations homme/machines*, Paris, Dunod, 1997.
- [GIB 50] Gibson J. J. : *The perception of the visual world*. Boston, Houghton Mifflin, 1950.

E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin : "Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine" - JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.

- [GIB 50] Gibson J. J.: *The ecological approach to visual perception*. Boston, Houghton Mifflin, 1979.
- [HOP 96] 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.
- [HOP 96] Hoppenot P. : " Contribution de la robotique mobile à l'assistance aux personnes handicapées ", Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne , 27 nov. 1997.
- [HOP 98] Hoppenot P., Colle E. : " Real-time localisation of a low-cost mobile robot with poor ultrasonic data " - *IFAC journal, Control Engineering practice*, 1998, vol. 6, pp. 925-934.
- [HOP 00] Hoppenot P., Colle E. and Barat C. : " Off line localisation of a mobile robot using ultrasonic measures ", *Robotica*, vol 18, pp. 315-323.
- [JOH 81] Johannsen G., Rouse W. B. : Problem solving behavior of pilots in abnormal and emergency situations. *First european annual conference on human decision making and manual control*. Delft university of technology, 1981, pp. 142-150.
- [KHA 86] Khatib O.: " Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots ", *Int. Journal of Rob.*, Res. 5, n°1, 1986, pp. 90-99.
- [LAT 91] Latombe J. C. : " *Robot motion planning* " - Academic publishers, 1991.
- [MIL 88] Millot P.: *Supervision des procédés automatiques et ergonomie*, Paris, Hermès, 1988.
- [NOR 95] Moray N., Hiskes D., Lee J. and Muir B.: Trust and human intervention in automated systems, in *Expertise and technology : cognition and human computer cooperation*, Hillsdale, New-Jersey, laurence Erlbaum Associates, 1995, pp 183-194.
- [PRU 96] Pruski A. : " *Robotique mobile - La planification de trajectoire* " - Hermes, 1996.
- [SHE 76] Sheridan T.B.: Towards a general model of supervisory control. In T.B. Sheridan and G. Johannsen (Eds.), *Monitoring behavior and supervisory control*. New-York, Plenum Press, 1976, pp. 171-282.
- [ZEL 91] Zelinsky A.: " Mobile robot navigation - Combining local obstacle avoidance and global path planning ", pp. 389-394, 1991.