



MASTER RESEARCH INTERNSHIP



BIBLIOGRAPHIC REPORT

Assistance à la navigation d'un fauteuil roulant : navigation sur un trottoir dans un environnement peuplé d'humains

Domain: Robotics - Human-Computer Interaction

Author:
Nicolas LE BORGNE

Supervisor:
Marie BABEL
Lagadic - Inria/IRISA

Résumé :

Se déplacer en fauteuil roulant demeure un rempart à l'isolement pour les personnes en situation de handicap. Pouvoir sortir de chez soi est un facteur d'intégration sociale majeur. Pour autant, de nombreuses personnes ne se sentent pas en capacité de naviguer en extérieur, notamment au vu des risques de chutes qui sont la plupart du temps dues à la navigation sur un trottoir. En effet, manœuvrer sur un trottoir étroit, au milieu d'une foule, peut être une tâche très complexe en fonction des déficiences motrices, cognitives et/ou visuelles.

Afin de préparer un stage qui répond à ces problématiques, ce travail effectue une visite de l'état de l'art sur l'asservissement référencé capteur, et plus particulièrement l'asservissement visuel, ainsi que des problématiques sociétales associées. Au-delà de l'automatisation sécurisée d'une tâche, cette bibliographie aborde également la prise en compte des intentions de l'utilisateur pour un contrôle partagé, ainsi que le respect des conventions sociales, facteur important d'acceptation d'une technologie de navigation semi-autonome.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Fondamentaux de l'asservissement visuel	2
2.1	Principe et définitions	2
2.2	Différents types d'asservissements	3
2.3	Mise en œuvre d'un asservissement cinématique	5
3	Asservissement visuel appliqué à la navigation d'un fauteuil roulant	6
3.1	Asservissement visuel pour un suivi de couloir	6
3.2	Vers un formalisme pour le contrôle partagé	7
4	Navigation dans un environnement peuplé d'humains	9
4.1	Analyse des croisements de trajectoire entre humains et robots	9
4.2	Approche d'un groupe d'humains par un robot	10
5	Conclusion	11

1 Introduction

Ce stage s'inscrit dans le cadre des travaux engagés dans l'équipe associée Inria ISI4NAVE, qui regroupe les activités de l'équipe Inria/IRISA Lagadic, du Pôle MPR Saint Hélier et de l'équipe Aspire CREATE de University College of London. Il a pour objectif principal l'assistance à la navigation d'un fauteuil roulant sur des trottoirs dans un environnement peuplé d'humains.

L'incapacité à se déplacer par soi-même est un facteur important d'isolement. Dans ce contexte, le fauteuil roulant est un outil important pour les personnes en situation de handicap. Cependant, et selon les troubles (moteurs, visuels et/ou cognitifs), naviguer en fauteuil roulant peut s'avérer une tâche complexe et de nombreuses personnes ne se sentent pas en capacité de naviguer en extérieur. Si le besoin d'autonomie est réel, le besoin de sécurité l'est tout autant.



FIGURE 1 – Feego : un fauteuil roulant équipé de la technologie HandiViz

Afin d'aller dans cette direction, des travaux sur la robotisation de fauteuils roulants ont été initiés. Ces travaux portent sur des problématiques classiques de robotique, telles que l'évitement de collisions [1] (avec des objets statiques ou dynamiques) ou la facilitation de certaines tâches quotidiennes de navigation. Le suivi de couloir [15][16] et le passage d'une porte [13] sont des exemples de tâches dont l'exécution a pu être facilitée grâce à la robotique. Mais ces travaux s'intéressent également à des problématiques humaines : la compréhension et le respect des intentions de l'utilisateur [3], le contrôle partagé entre l'usager et le fauteuil robotisé [13] ainsi que le respect des conventions sociales comme le respect des espaces personnels [17] et l'approche de groupes en interaction [14].

Le stage se concentrera sur la détection de bords de trottoirs et la génération d'une commande de correction de la trajectoire du fauteuil roulant en temps réel. Cela implique de maîtriser l'asservissement référencé capteur, dont les notions sont introduites dans cette bibliographie à travers l'asservissement visuel. De plus, la trajectoire du fauteuil devra prendre en compte les intentions de l'utilisateur (contrôle partagé) ainsi que l'environnement peuplé d'humains.

Dans cette bibliographie, nous commencerons par rappeler les fondamentaux de l’asservissement visuel illustrés par la mise en œuvre d’un asservissement visuel cinématique. En seconde section, nous poursuivrons sur l’application de ces notions dans le cas de la navigation d’un fauteuil roulant avec l’exemple d’un suivi de couloir et l’introduction d’un formalisme permettant le contrôle partagé. Puis dans la dernière section, nous parlerons des travaux sur la navigation dans un environnement peuplé d’humains, avec une synthèse sur l’analyse de croisements de trajectoires entre des humains et des robots, et l’approche de groupe d’humains en interaction par un robot. En conclusion, nous présenterons nos premières réflexions sur le travail à venir lors de ce stage.

2 Fondamentaux de l’asservissement visuel

Pour connaître son environnement, un robot utilise des capteurs fournissant différents types de mesures : capteurs à ultrason, télémètres, microphones, etc. Dans le cas de la navigation sociale, les données sur lesquelles le robot doit baser ses décisions sont plus complexes, c’est pourquoi la caméra qui fournit des informations très denses est un capteur de prédilection.

Le domaine consistant à commander un robot en fonction d’un flux d’images en temps réel est appelé **asservissement visuel** [6] (*visual servoing* ou *vision-based control* en anglais).

Les notions et explications apportées dans cette partie sont basées sur les cours de Jacques Gangloff [8][9], le tutoriel de contrôle par asservissement visuel de F. Chaumette et S. Hutchinson [5] ainsi que l’article de présentation de la plateforme ViSP par E. Marchand *et al.* [11]

2.1 Principe et définitions

On peut représenter un robot par un ensemble de **segments rigides**, liés entre eux par des **articulations**. Les segments ont pour origine une même base, et il peut y avoir un **effecteur** (organe terminal qui porte l’outil) à leur extrémité. La figure 2 illustre ces notions à travers l’exemple d’un bras articulé.

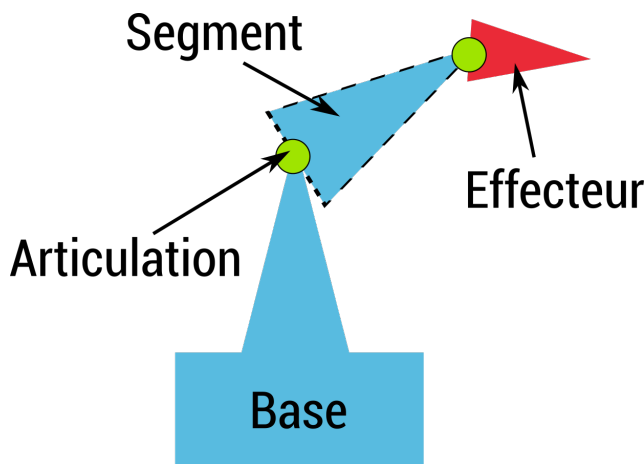


FIGURE 2 – Schéma d’un robot de type bras articulé

Ces articulations sont caractérisées par un certain nombre de **degrés de liberté** (6 au maximum : 3 degrés en translation et 3 degrés en rotation) et on appelle **pose** le vecteur $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$

des valeurs associées à chacun de ces degrés de liberté (distances pour les translations et angles pour les rotations).

2.2 Différents types d'asservissements

L'asservissement visuel d'un robot peut être classifié selon plusieurs critères :

Position de la caméra La caméra peut être externe au robot, fixe ou mobile dans l'environnement de celui-ci, on parle d'asservissement *eye-to-hand* (à droite sur la figure 3). Cela peut permettre d'avoir une information plus globale sur l'environnement, et en particulier d'avoir le robot et la cible dans la même image.

La caméra peut également être embarquée sur le robot, on parle d'asservissement *eye-in-hand* (à gauche sur la figure 3). La caméra se déplace ainsi avec le robot, c'est naturellement utile pour un robot navigant dans un espace ouvert, mais également pour les tâches de suivi car le risque que le robot obstrue la vision de la caméra par rapport à la cible est très réduit.

Type de commande La commande est calculée à partir de l'erreur entre les mesures et les consignes. Elle doit permettre l'envoi d'une vitesse ou d'un couple au contrôleur du robot fourni par le fabricant, qui va se charger de l'asservissement des variateurs pour se rapprocher de l'objectif. On parle alors d'**asservissement indirect**. On utilise en général cette technique pour faire de l'asservissement visuel cinématique. Elle a cependant l'inconvénient de causer un retard incompressible, à cause du contrôleur.

Une autre technique consiste à asservir directement les variateurs en vitesse ou en couple, sans passer par un contrôleur. On parle d'**asservissement direct**, il permet l'asservissement visuel dynamique mais est parfois compliqué à mettre en œuvre à cause de la réticence des constructeurs à donner leurs spécifications. Dans ce cas, il faut soit effectuer du *retro-engineering*, soit fabriquer son propre robot...

Vitesse Nous venons donc de parler d'**asservissement visuel cinématique** et d'**asservissement visuel dynamique** [12]. Le premier est valable pour des déplacements à vitesse modérée et la technique utilisée permet une convergence exponentielle de la mesure vers la consigne.

L'asservissement dynamique est plus complexe car il nécessite de prendre en compte toutes les informations dynamiques associées au déplacement du robot (inertie, frottements, force contre-électromotrice, etc.) et d'effectuer un asservissement directement sur les variateurs du robot. De plus, il faut que les caractéristiques de la caméra et le traitement d'image permettent une fréquence d'asservissement supérieure à 50Hz. Cependant, cette technique permet des déplacements beaucoup plus rapides.

Type de mesure Enfin, on peut différencier les asservissements selon la nature de leurs mesures (et donc de leurs consignes) :

- **3D** : L'objectif à atteindre est exprimé en coordonnées spatiales, l'asservissement est relativement simple à calculer mais nécessite d'avoir une connaissance géométrique de la scène et du robot (ce qui est en général le cas dans une utilisation industrielle, mais rarement pour de la navigation dans un environnement mouvant). Ce type d'asservissement est appelé **PBVS** (*Position-Based Visual Servoing*).

- **2D** : L'asservissement se fait par rapport à des **primitives visuelles** (*features*) dans l'image ou la séquence d'images. Cette technique ne nécessite pas de reconstruction 3D de la géométrie de l'environnement, mais peut se retrouver dans des situations où l'asservissement est impossible alors qu'une rotation pure selon l'axe optique aurait suffi (voir *Chaumette Conundrum* [4]). Ce type d'asservissement est appelé **IBVS** (*Image-Based Visual Servoing*).
- **2D 1/2** : Cette méthode hybride permet en théorie d'avoir les avantages des deux méthodes précédentes en découplant l'asservissement de la rotation par rapport à la 3D et l'asservissement en translation par rapport à la 2D. La connaissance de la géométrie de l'environnement n'est pas nécessaire.

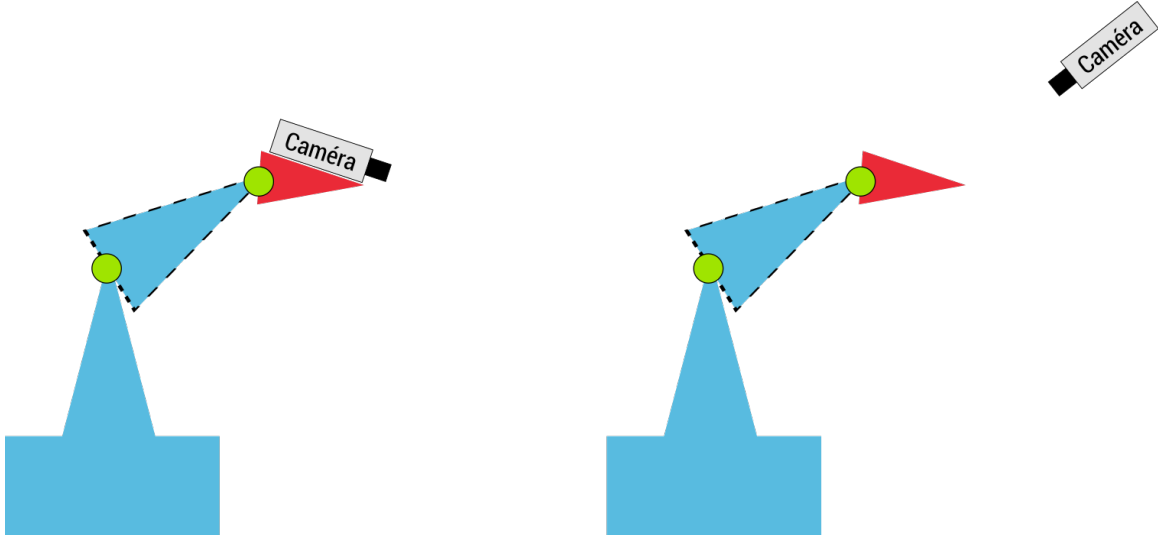


FIGURE 3 – Schéma d'un asservissement eye-in-hand (à gauche) et eye-to-hand (à droite)

En résumé, l'asservissement visuel consiste à :

1. acquérir une image 2D de la scène à partir de la caméra,
2. mesurer certaines valeurs (qui peuvent être des distances entre des points 3D ou des points 2D, des angles, des similarités avec des formes, des contours, etc.) qu'on appelle également **primitives visuelles** (ou *features* en anglais),
3. définir pour ces mesures des valeurs désirées (**consignes**) que l'on cherche à atteindre,
4. calculer une **commande** pour faire varier la pose q selon ses différents degrés de liberté pour se rapprocher de l'objectif (voir section 2.3 pour plus de détails),
5. recommencer à la première étape jusqu'à convergence des mesures vers les consignes.

On peut ainsi représenter l'asservissement visuel par une boucle fermée (figure 4).

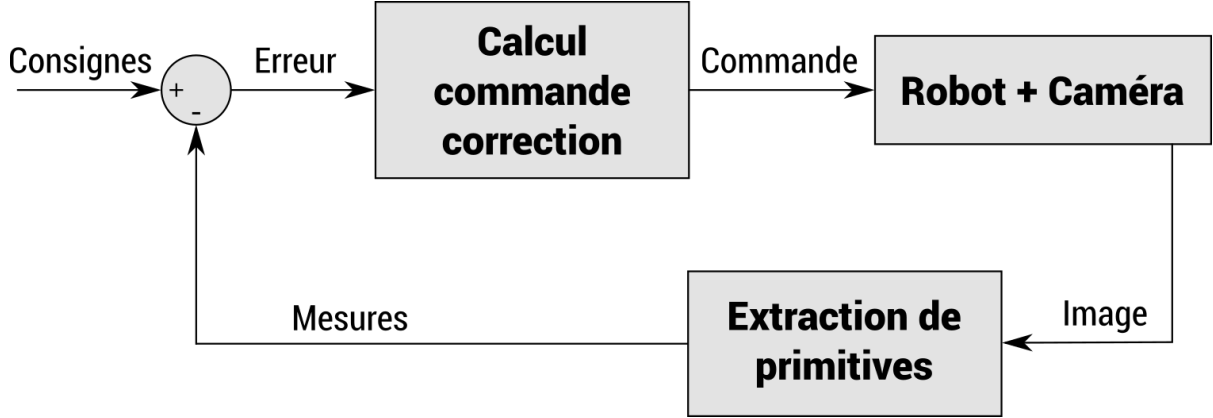


FIGURE 4 – Schéma-bloc simplifié de l'asservissement visuel

2.3 Mise en œuvre d'un asservissement cinématique

Avant de poursuivre sur l'asservissement visuel pour la navigation d'un fauteuil roulant, nous allons présenter plus en détail la mise en œuvre d'un asservissement cinématique [5] pour des robots avec une caméra embarquée et n'ayant pas une connaissance préalable de la géométrie de leur environnement.

Extraction des primitives visuelles L'asservissement visuel repose sur une minimisation de l'erreur \mathbf{e} entre un ensemble de primitives visuelles mesurées \mathbf{s} et un ensemble de primitives visuelles **consignes** (ou valeurs désirées) à atteindre \mathbf{s}^* . On peut définir cette erreur par l'équation :

$$\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^* \quad (1)$$

Ces primitives peuvent être de simples coordonnées de points d'intérêt dans l'image, mais peuvent également avoir une nature plus complexe (lignes, courbes, etc.). On notera également que \mathbf{s}^* est en générale une constante, bien qu'il soit possible de gérer des consignes variables.

Loi de commande On peut relier la vitesse de ces primitives dans l'image $\dot{\mathbf{s}}$ au torseur cinématique de la caméra $\mathbf{v}_c = (v_c, \omega_c)$ grâce à la **matrice d'interaction** (ou Jacobienne image) \mathbf{L}_s . Ainsi,

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c \quad (2)$$

En mettant ensemble les équations (1) et (2), on obtient l'équation

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \mathbf{v}_c \quad (3)$$

qui permet d'exprimer la vitesse de l'erreur par rapport à la vitesse de la caméra (avec $\mathbf{L}_s = \mathbf{L}_e$).

Si l'on souhaite une décroissance exponentielle de l'erreur ($\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$), en utilisant (3) on a

$$\mathbf{L}_e \mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{e} \quad (4)$$

La loi de commande consiste à fournir le torseur cinématique \mathbf{v}_c au contrôleur du robot, cependant la matrice \mathbf{L}_e n'est pas forcément inversible. C'est pourquoi on passe par sa pseudo-inverse \mathbf{L}_e^+ de Moore-Penrose pour finalement obtenir

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^+ \mathbf{e} . \quad (5)$$

3 Asservissement visuel appliqué à la navigation d'un fauteuil roulant

À partir de ces notions générales, voyons maintenant le cas relatif à l'asservissement d'un fauteuil roulant.

3.1 Asservissement visuel pour un suivi de couloir

Commençons tout d'abord par la modélisation du fauteuil roulant présentée dans la thèse de V. K. Narayanan [13] et l'article de F. Pasteau *et al.* [15].

Robot unicycle Le déplacement du fauteuil roulant peut être assimilé à celui d'un disque roulant. Cela signifie que son déplacement en translation est contraint par la direction du disque (c'est-à-dire l'angle θ sur la figure 5). On qualifie ce type de système de *non-holonyme*.

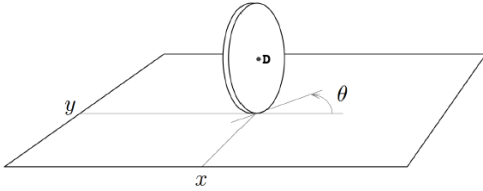


FIGURE 5 – Modélisation par un disque roulant (figure extraite de [13])

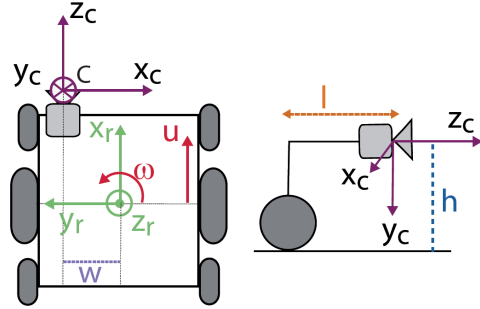


FIGURE 6 – Représentation du fauteuil roulant en vue du dessus et de côté (figure extraite de [15])

Dans [15], les auteurs présentent une méthode de suivi de couloir avec une seule caméra, sans connaissance *a priori* de la géométrie spatiale de l'environnement et en gérant le cas d'une caméra qui n'est pas positionnée sur l'axe de symétrie du fauteuil (voir figure 6).

Les entrées de contrôle du fauteuil roulant sont données par le torseur cinématique (v, ω) avec v la vitesse instantanée du fauteuil et ω sa vitesse angulaire. Ce torseur cinématique peut-être lié au modèle

$$\begin{cases} \dot{x} &= v \cos \phi - l \dot{\phi} \\ \dot{y} &= v \sin \phi - w \dot{\phi} \\ \dot{\phi} &= \omega \end{cases} , \quad (6)$$

où $\mathbf{q} = (x, y, \phi)$ représente la pose du fauteuil dans un repère global (O, x_g, y_g, z_g) fixe par rapport à l'environnement, (\dot{x}, \dot{y}) exprime la vitesse instantanée et $\dot{\phi}$ la vitesse angulaire. l et w sont les

distances selon les vecteurs \mathbf{x}_r et \mathbf{y}_r entre le centre optique de la caméra et le centre de l'axe reliant les deux roues du fauteuil (voir figure 6).

Choix des primitives visuelles Les auteurs utilisent deux primitives visuelles (dans le repère (I_0, X, Y) associé au plan image) : la coordonnée x_f du point de fuite $\mathbf{f} = (x_f, y_f)$ et θ_m l'angle entre l'axe z de la caméra et la ligne médiane du couloir (c'est-à-dire la ligne parallèle et équidistante par rapport aux deux murs). Ainsi, lorsque le fauteuil est parallèle au mur, tourné vers l'avant et que la position de la caméra se retrouve au milieu du couloir, alors la coordonnée x_f et l'angle θ_m valent 0.

On a donc l'ensemble de primitives visuelles mesurées $\mathbf{s} = (x_f, \theta_m)$ et l'ensemble consigne $\mathbf{s}^* = (0, 0)$. Par conséquent, l'équation (1) peut s'écrire sous la forme

$$\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^* = \mathbf{s} . \quad (7)$$

Extraction des primitives visuelles Dans [15], l'extraction de ces primitives est présentée : le traitement de l'image doit se faire en temps réel et fournir des mesures fiables. Ainsi, les méthodes permettant l'estimation de x_f et l'estimation de θ_m sont proposées, et les résultats d'extraction en situation réelle démontrent la robustesse des mesures, même en cas d'occultation par des objets fixes ou des humains en mouvement.

Loi de commande Sous l'hypothèse d'une vitesse instantanée constante $v = \text{const} = v^*$, il est intéressant de découper la relation (3) selon la vitesse instantanée et la vitesse angulaire, menant à une équation de la forme

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{J}_\omega \omega + \mathbf{J}_v v . \quad (8)$$

Ceci permet, en suivant le même principe que pour l'équation (4), d'obtenir l'équation

$$\mathbf{J}_\omega \omega = -(\lambda \mathbf{e} + \mathbf{J}_v v^*) . \quad (9)$$

Pour finir, en introduisant \mathbf{J}_ω^+ , la pseudo-inverse de \mathbf{J}_ω , la loi de commande est définie par

$$\omega = -\mathbf{J}_\omega^+ (\lambda \mathbf{e} + \mathbf{J}_v v^*) . \quad (10)$$

3.2 Vers un formalisme pour le contrôle partagé

En 2008, Tom Carlson et Yiannis Demeris publient un article sur la collaboration entre l'humain et le fauteuil roulant à travers une prédiction d'intention et une assistance adaptative [2]. Dans cet article, ils mettent en avant l'intérêt de prendre en compte les capacités et les intentions de l'utilisateur afin de préserver au maximum sa liberté et son contrôle du fauteuil, tout en réduisant la charge mentale que peut lui demander la conduite.

Si la méthode de suivi de couloir présentée ci-dessus est tout à fait fonctionnelle [15], elle ne prend pas en compte les intentions de l'utilisateur. C'est pourquoi les auteurs ont publié la suite de leurs travaux sur le sujet [16], dans laquelle ils proposent un système d'assistance semi-autonome qui combine la commande de l'utilisateur (issue de la manipulation d'un joystick) avec la loi de commande calculée par l'asservissement visuel, en utilisant une pondération de la commande adaptée.

Plus concrètement, si l'utilisateur n'est pas en danger, c'est-à-dire s'il ne risque pas d'entrer en collision avec un mur, alors il garde le contrôle complet sur la navigation. Mais plus il approche d'un mur, plus la pondération associée à la commande du joystick diminue¹, et plus celle associée à l'assistance automatisée présentée dans la section précédente augmente. Il y a ainsi collaboration entre l'utilisateur et le mécanisme d'assistance du fauteuil roulant.

Dans la poursuite de ces travaux, V. K. Narayanan propose dans sa thèse [13] un système générique semi-autonome pour la navigation en fauteuil roulant basé sur deux composants principaux : un module chargé de l'estimation de **l'intention de l'utilisateur** et un module chargé du **contrôle partagé**.

Prédiction de l'intention Le premier axe de recherche doit en particulier gérer le problème de l'incertitude de l'intention de l'utilisateur à long terme, c'est-à-dire que si l'algorithme de prédiction pense avoir compris l'intention de l'utilisateur, planifie la trajectoire complète et essaie de maintenir le fauteuil sur cette trajectoire, alors l'utilisateur peut ressentir un certain inconfort dû au fauteuil qui ne se comporte pas comme il le souhaiterait. Cet état de fait peut arriver, soit parce que la prédiction est erronée, soit parce que l'utilisateur a changé d'avis, soit parce que l'utilisateur avait l'intention d'atteindre l'objectif d'une manière sous-optimale du point de vue de l'algorithme de planification de la trajectoire. Afin de gérer cette situation, V. K. Narayanan [13] propose une prédiction via des objectifs sur le court terme : cette solution permet au système de ne pas se préoccuper de la stratégie long terme et permet à l'utilisateur une maîtrise plus fine de son fauteuil, tout en étant assisté dans sa tâche.

Contrôle partagé Le second axe de recherche est basé sur de nombreux travaux [3][7][10] à partir desquels un formalisme générique est proposé, à savoir

$$\mathbf{v} = (\mathbb{I}_2 - \mathbf{A})\mathbf{v}_{\text{op}} + \mathbf{A}\mathbf{v}_{\text{r}} , \quad (11)$$

où \mathbf{v} correspond à la commande envoyée au contrôleur du fauteuil, \mathbf{v}_{op} à la commande de l'utilisateur, \mathbf{v}_{r} à la commande du système autonome et \mathbf{A} à une matrice diagonale contenant les coefficients de pondération du vecteur de commande \mathbf{v}_{r} .

Dans sa thèse [13], V. K. Narayanan s'intéresse à la compatibilité avec la prédiction de l'intention de l'utilisateur. Sous l'hypothèse que la variation de la pondération (coefficients de \mathbf{A}) doit être souple afin de faciliter la perception du danger et d'éviter de perturber l'utilisateur par des mouvements brusques, [13] propose des équations non linéaires pour les coefficients de \mathbf{A} . Ces équations prennent en compte une distance limite de danger à partir de laquelle le robot prend de plus en plus contrôle de la commande. Toutefois, on peut voir que les équations ne permettent pas à \mathbf{A} de devenir une matrice identité ; ainsi le robot ne prend jamais le contrôle complet du fauteuil et l'utilisateur a la liberté de rentrer en collision avec des objets s'il insiste suffisamment. Cela signifie que l'utilisateur n'est pas complètement limité par l'interprétation qu'a le robot de son environnement, et peut par exemple s'approcher d'une table même si le système cherche à la contourner.

En guise d'ouverture, V. K. Narayanan indique que les distances utilisées comme limite de danger peuvent être adaptées en fonction des capacités de l'utilisateur. Cela permet au système d'intervenir de manière plus ou moins prononcée en fonction de sa confiance dans les capacités de son passager.

1. Quelle que soit la pondération associée au joystick, si l'utilisateur le lâche ou le met en position neutre, le fauteuil s'arrête systématiquement

4 Navigation dans un environnement peuplé d’humains

Nous nous sommes jusqu’à présent intéressés aux techniques permettant l’automatisation de la navigation du fauteuil roulant, ainsi qu’à la prise en compte des intentions de l’utilisateur pour effectuer un contrôle partagé. Cependant dans le monde réel, le facteur humain s’étend plus loin que l’utilisateur seul. Nous allons maintenant faire la synthèse d’une étude sur le comportement d’humains lorsque leurs trajectoires croisent celle d’un robot, puis nous terminerons par une mise en œuvre d’une approche de groupe prenant en compte les conventions sociales.

4.1 Analyse des croisements de trajectoire entre humains et robots

Des études montrent que des robots ayant des comportements semblables à ceux d’un être humain sont plus faciles à comprendre par d’autres humains. Force est de constater que les robots sont de plus en plus répandus dans l’environnement humain (en particulier dans l’industrie), et cela soulève des problématiques de sécurité, notamment pour l’évitement de collisions. C. Vassallo *et al.*, ayant remarqué que des études avaient eu lieu sur le croisement de trajectoires entre des humains mais pas entre des humaines et des robots, ont décidé de traiter le sujet et ont publié un article [18] sur le sujet.

Les auteurs ont conduit une expérience avec 7 volontaires et un robot. L’expérience a eu lieu dans un gymnase. À chaque fois, le participant humain devait marcher d’une position A à une position B, et sa trajectoire était intersectée en un point I par celle du robot. En fonction de la vitesse du participant, le robot démarrait de manière à causer l’une des deux situations suivantes : soit l’humain avait le temps de passer sans interrompre la course du robot, soit il n’en avait pas le temps. De plus, des obstacles visuels ne permettaient de voir le robot qu’à 3 mètres du point d’intersection (sur une trajectoire d’environ 14 mètres).

L’analyse des résultats a été faite sur 36 exécutions de l’expérience pour chaque participant :

- dans **43%** des cas, le participant avait le temps de passer et il passait,
- dans **28%** des cas, le participant n’avait pas le temps de passer et il ne passait pas,
- dans **29%** des cas, le participant avait le temps de passer, mais il ne passait pas,
- dans **0%** des cas, le participant n’avait pas le temps de passer, mais il passait.

Les auteurs ont comparé ces résultats à ceux de travaux sur les croisements de trajectoires entre humains, et ont remarqué que, si l’estimation et l’anticipation du risque de collision sont similaires, dans le cas du croisement de trajectoires entre un humain et un robot, l’humain laisse souvent passer le robot même quand c’est une stratégie sous-optimale. Les auteurs formulent l’hypothèse que cela serait dû à la perception du danger : dans le cas d’une collision entre humains, les conséquences ne sont pas très graves, alors que dans le cas d’un robot, l’être humain n’a pas beaucoup d’expérience et ne sait pas, par exemple, si le robot ralentit en cas de collision imminente, ni les conséquences d’une telle collision si elle se produit.

Ces travaux sont très récents (2017) et les auteurs proposent des pistes pour de futures études, en particulier pour mieux comprendre le possible effet de la perception du danger dans les Interactions Humains-Robots, et quels sont les aspects qui sont les plus influents (la vitesse du robot, sa forme, sa taille, etc.).

Les auteurs évoquent également la situation où le robot, en essayant de s'adapter à l'humain, annulerait la stratégie d'évitement de l'humain, menant à une situation d'ambiguïté où personne ne sait s'il doit agir ou laisser l'autre agir. Afin d'étudier ce sujet plus en détails, l'expérience sera reproduite avec un robot équipé de capacités d'évitement de collisions qui imitent les stratégies humaines.

4.2 Approche d'un groupe d'humains par un robot

Dans la continuité des travaux sur la compréhension des conventions sociales pour faciliter l'intégration des robots dans un environnement humain, V. K. Narayanan *et al.* intègrent sur un robot une stratégie d'approche de groupe d'humains en interaction, dans le but de le joindre et de devenir une partie équitable de cette interaction [14]. La proposition s'attache à valider le système par une expérience dans le monde réel et l'étude se concentre en particulier sur la stabilité, la convergence, et la fiabilité de la méthode dans différentes situations. De plus, pour démontrer l'adaptabilité de la méthode, l'expérience d'approche de groupe est combinée avec de l'évitement d'obstacles.

Dans ce cadre, [14] traite de l'état de l'art sur la gestion de l'espace physique dans le cadre public et dans le cadre privé. Les théories sur le sujet font en particulier référence aux distances maintenues dans les situations sociales et interpersonnelles, et la gestion de l'espace est divisée en deux catégories :

- Personal space : gestion de l'espace par une seule personne,
- Interaction space : gestion de l'espace par un groupe.

Les auteurs s'intéressent en particulier aux groupes de personnes qui, concentrées autour ou en direction d'un point visuel, créent un **Interaction Space**. Cet espace se découpe en 2 zones :

- **O-space** : la zone partagée et réservée pour l'activité du groupe,
- **p-space** : l'espace qui entoure la zone partagée et dans laquelle se placent les participants.

La figure 7 illustre un type d'*interaction space*. La forme de l'espace créé dépend du nombre de personnes, des relations entre ces personnes, du point d'attention du groupe et des contraintes de l'environnement.

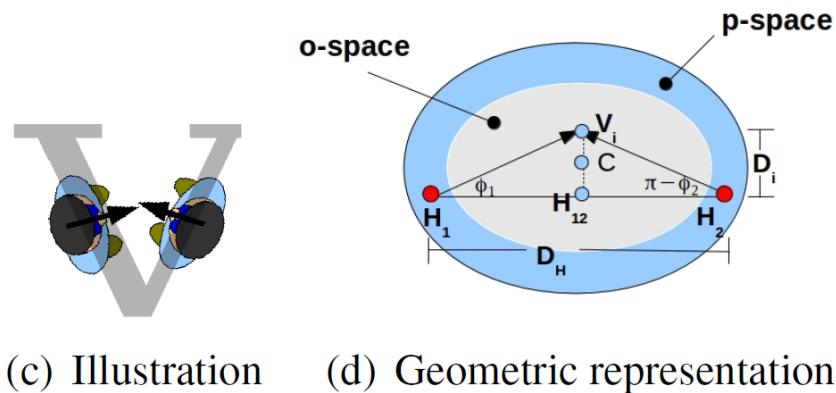


FIGURE 7 – Représentation d'un type d'espace d'interaction (figure extraite de [14])

Afin d’approcher le groupe en interaction de manière conventionnelle, le robot doit respecter un certain nombre de contraintes : l’approche doit être frontale, l’intention d’approche doit être révélée aux membres du groupe, de plus le robot ne doit pas invalider la zone partagée (*O-space*). Pour joindre l’interaction, le robot doit également être capable de calculer le **point de rencontre** (*meeting point*) optimal. Dans le cas d’une interaction entre 2 humains (comme sur la figure 7), ce point est obtenu en traçant la ligne qui passe par le point H_{12} (barycentre des 2 humains) et le point V_i correspondant au point regardé par les participants de l’interaction. Cette droite coupe l’espace de placement des participants (*p-space*) en deux endroits qui sont donc des points de rencontre optimaux.

Pour mettre en œuvre cette approche techniquement, le robot est équipé d’un scanner laser lui permettant de détecter les jambes des participants, et ainsi de connaître la représentation géométrique de l’espace d’interaction. Trois primitives géométriques consignes sont ensuite définies et permettent une approche frontale vers le point de rencontre optimal. L’asservissement se fait ainsi de manière similaire aux travaux présentés précédemment, même si la nature du capteur est différente.

Par cette combinaison de travaux pluridisciplinaires, un système de contrôle robuste, basé sur des primitives visuelles et capable d’atteindre un point de rencontre optimal d’une manière socialement conventionnelle a été mis en place [14].

5 Conclusion

À travers cette bibliographie, nous avons vu les concepts fondamentaux de l’asservissement référencé capteur, et en particulier de l’asservissement visuel via l’extraction de primitives et la définition d’une loi de commande permettant de faire converger les primitives d’un robot vers des valeurs consignes, et ainsi d’atteindre l’objectif souhaité. Nous avons également vu comment appliquer ce type d’asservissement à l’automatisation d’un fauteuil roulant et les problématiques humaines associées. En particulier le besoin de proposer un contrôle partagé à l’utilisateur pour maximiser sa liberté en termes de mobilité, et celui de développer un système dont le fonctionnement prend en compte l’environnement humain et le respect des conventions sociales.

Le stage va maintenant consister à proposer une solution de navigation sur un trottoir, capable de détecter les différences de niveau pour éviter les chutes et de calculer une loi de commande adaptée. Cette solution sera basée sur de l’asservissement référencé capteur, fonctionnant selon le même principe que l’asservissement visuel (le choix du ou des capteurs n’est pas encore défini). Dans la continuité des travaux présentés, il va également s’agir d’améliorer l’expérience utilisateur en prenant en compte les contraintes de navigations sociales en utilisant à la fois la loi de commande, l’intention de l’utilisateur, et les conventions sociales.

Références

- [1] M. Babel, S. Gu, P. Gallien, B. Fraudet, S. Achille-Fauveau, D. Guillard, et al. Handiviz project : clinical validation of a driving assistance for electrical wheelchair. In *IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, pages 1–6. IEEE, 2015.

- [2] T. Carlson and Y. Demiris. Human-wheelchair collaboration through prediction of intention and adaptive assistance. In *ICRA 2008. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3926–3931. IEEE, 2008.
- [3] T. Carlson and Y. Demiris. Collaborative control for a robotic wheelchair : evaluation of performance, attention, and workload. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(3) :876–888, 2012.
- [4] F. Chaumette. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. In *The confluence of vision and control*, pages 66–78. Springer, 1998.
- [5] F. Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control. I. Basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(4) :82–90, 2006.
- [6] F. Chaumette and E. Marchand. Recent results in visual servoing for robotics applications. In *8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, ASTRA 2004.*, pages 471–478, 2004.
- [7] E. Demeester, E. Vander Poorten, A. Hüntemann, and J. De Schutter. Wheelchair navigation assistance in the fp7 project radhar : Objectives and current state. 2012.
- [8] J. Gangloff. Cours : Robotique de manipulation, 2012.
- [9] J. Gangloff. Cours : Vision et commande, 2016.
- [10] A. Goil, M. Derry, and B. D. Argall. Using machine learning to blend human and robot controls for assisted wheelchair navigation. In *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [11] É. Marchand, F. Spindler, and F. Chaumette. Visp for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12(4) :40–52, 2005.
- [12] P. Morin and C. Samson. Motion control of wheeled mobile robots. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 799–826. Springer, 2008.
- [13] V. K. Narayanan. *Characterizing assistive shared control through vision-based and human-aware designs for wheelchair mobility assistance*. PhD thesis, INRIA Rennes-Bretagne Atlantique ; INSA Rennes, 2016.
- [14] V. K. Narayanan, A. Spalanzani, R. C. Luo, and M. Babel. Analysis of an adaptive strategy for equitably approaching and joining human interactions. In *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 341–346. IEEE, 2016.
- [15] F. Pasteau, M. Babel, and R. Sekkal. Corridor following wheelchair by visual servoing. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 590–595. IEEE, 2013.
- [16] F. Pasteau, A. Krupa, and M. Babel. Vision-based assistance for wheelchair navigation along corridors. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4430–4435. IEEE, 2014.
- [17] D. Vasquez, P. Stein, J. Rios-Martinez, A. Escobedo, A. Spalanzani, and C. Laugier. Human aware navigation for assistive robotics. In *Experimental Robotics*, pages 449–462. Springer, 2013.
- [18] C. Vassallo, A.-H. Olivier, P. Souères, A. Crétual, O. Stasse, and J. Pettré. How do walkers avoid a mobile robot crossing their way ? *Gait & Posture*, 51 :97–103, 2017.