

# Le projet VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteur) : la localisation

## The VAHM (autonomous vehicle for people with disabilities) project: localization

par Odile HORN, Alain COURCELLE, Michel KREUTNER

Laboratoire d'Automatique des Systèmes Coopératifs (LASC), Ile du Saulcy, BP 80794, 57012 Metz cedex 01 France

e-mail : {horn|courcelle|kreutner}@lasc.sciences.univ-metz.fr

### *résumé et mots clés*

Ce papier décrit le mode de localisation d'un fauteuil électrique autonome développé dans le cadre du projet VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteur). Ce projet vise à décharger les personnes lourdement handicapées des contraintes de conduite du fauteuil en leur donnant des possibilités de déplacement autonomes. L'autonomie du fauteuil requiert la mise en œuvre d'une procédure de localisation qui utilise les capteurs ultrasons et qui est séparée en deux fonctions selon l'état du fauteuil : à l'arrêt ou en mouvement. A l'arrêt, la position est recherchée par association de grilles d'occupation ; la grille globale décrit l'environnement et la grille locale représente l'espace libre perçu par les capteurs ultrasons autour du fauteuil. En cours de mouvement, les mesures ultrasonores sont utilisées pour un ajustement de la position odométrique. Les essais réalisés en conditions réelles montrent que les deux procédures sont appropriées pour notre application ; mais la précision sur l'orientation est insuffisante dans la localisation dynamique, nous décrivons alors la procédure, utilisant la vision, développée pour améliorer cette précision.

Véhicule autonome, capteur ultrasons, localisation, vision

### *abstract and key words*

This paper describes an autonomous powered wheelchair localization method in the VAHM (Autonomous Vehicle for People with Motor Disabilities) project framework. This project aims at releasing people with heavy motor disabilities from driving wheelchair constraints by bring possibility of autonomous displacements. The wheelchair autonomy requires the achievement of localization procedure which uses the ultrasonic sensors and is split into two functions according to the state of the wheelchair: when stopped or in movement. When stopped the position of the wheelchair is searched by matching of occupancy grids. The global grid describes the environment and the local grid, built from ultrasonic data, represents the free space around the wheelchair. During the movement the ultrasonic measures are used to refine the position of the wheelchair estimated with the odometry. The tests achieved in real conditions show that the two approaches are appropriate for our application. But in dynamic location, the accuracy of the orientation is not good enough, we then give the procedure using the vision developed to improve this accuracy.

Autonomous vehicle, ultrasonic sensors, localization, vision

## 1. introduction

Les récentes avancées technologiques et méthodologiques en robotique mobile ont ouvert ce domaine à un nouveau champ d'application : l'aide technique aux personnes handicapées [1]. Dans ce contexte, durant les vingt dernières années, de nombreux projets ont été développés. Leur objectif est d'améliorer les conditions de vie des personnes lourdement handicapées en les aidant pour différents actes quotidiens. Il peut s'agir d'effectuer des actions à distance au moyen d'un bras téléopéré embarqué sur une base mobile [2] ou de rendre des déplacements possibles grâce à un fauteuil électrique « intelligent » qui allège les tâches de conduite. C'est à ce deuxième type d'aide que nous nous sommes attachés ; pour la réaliser un ordinateur est embarqué sur le fauteuil et exécute différents modules afin de remplacer le pilote dans certaines fonctions de guidage.

### a) les aides à la mobilité

Plusieurs études ont été menées pour définir et réaliser une assistance au pilotage. Les premières ont abouti à l'établissement de primitives réactives qui permettent d'ajuster les trajectoires par rapport à l'environnement proche perçu par des capteurs extéroceptifs (ultrasons, laser ou caméra). Ainsi le NAVCHAIR [3] conçu à l'université de Michigan est un fauteuil électrique semi-autonome équipé de capteurs ultrasons ; il est conçu autour d'une méthode originale d'interprétation des mesures ultrasonores qui détermine à chaque instant le sens de déplacement optimal compte tenu des obstacles perçus et de la direction pointée par le joystick. Dans le cadre du projet européen OMNI [4], une équipe allemande a réalisé un prototype constitué d'une base mobile omnidirectionnelle équipée de capteurs ultrasons, infrarouges et de contact. Les primitives d'évitement d'obstacle, et de suivi de mur ainsi que la communication homme-machine ont été développées et testées. La structure globale du système prévoit en outre des fonctions de haut niveau comme la planification et le suivi de trajectoire.

Dans une autre démarche, la maîtrise du mouvement est donnée à l'ordinateur, une approche [5] développée dans cette perspective consiste à apprendre au fauteuil un certain nombre de parcours utiles en les effectuant sous la conduite d'une personne habituée. Ensuite lorsqu'un déplacement est demandé la succession de commandes qui lui correspond est automatiquement envoyée sur les moteurs. Le contrôle de son exécution nécessite une localisation du fauteuil, elle est réalisée par des caméras qui se repèrent à des balises fixées en des positions précisément connues de l'environnement.

Le projet VAHM [6], développé actuellement au LASC, vise à mettre en place un fauteuil équipé qui adapte au mieux la répartition des tâches entre l'homme et la machine, suivant le degré de handicap de l'utilisateur et la complexité de l'environnement.

A cet effet nous avons défini différents modes de fonctionnement, pour lesquels le rôle du système varie d'un soutien partiel à partir de primitives locales jusqu'à une prise en charge totale du mouvement pour lequel la personne indique seulement le but à atteindre. Ce mode de fonctionnement automatique est défini dans un espace connu et modélisé et requiert la réalisation des fonctions de planification et de suivi de trajectoire, ceci nécessite notamment que le fauteuil soit en mesure de se situer dans son environnement. Nous sommes ici confronté à l'un des problèmes essentiels de la robotique mobile : la localisation. A partir du cahier des charges du VAHM et des travaux existant dans la littérature, l'objectif est d'établir le mode de positionnement adapté à notre prototype.

### b) les méthodes de localisation des robots mobiles

Les recherches menées dans ce domaine se sont développées dans une grande diversité. En effet les capteurs de perception, le type d'environnement de travail, l'équipement éventuel de repères artificiels, la précision recherchée sur le résultat et le temps autorisé pour le calculer sont autant de paramètres qui diffèrent selon la problématique définie et l'application envisagée. Si le problème de localisation est lié à un mouvement, l'odométrie constitue l'information de base ; elle est un moyen simple rapide et peu cher d'estimer le déplacement parcouru depuis un point de départ en mesurant la rotation des roues ; sa faiblesse est son manque de précision dû aux incertitudes sur leur dimension ou à leur possible glissement [7].

#### – Localisation en cours de mouvement

S'il s'agit de l'exploration d'un univers non défini au préalable, les capteurs de perception (ultrasonores ou laser) évaluent l'espace libre autour du robot, l'enregistrement des mesures prises depuis différentes positions permet de créer un modèle de l'environnement. Si les positions successives sont uniquement définies par l'odométrie la dérive de cette donnée induit une déformation du modèle calculé, il est donc nécessaire de localiser le robot par rapport à la part de l'univers déjà modélisée. Dans ce cas la grille d'occupation est une structure couramment employée, elle est constituée d'un ensemble de cellules de taille fixe à valeur positive pour l'espace occupé et négative pour l'espace libre. La grille globale représente l'environnement modélisé et chaque prise de mesure est enregistrée dans une grille locale, qui est employée d'une part pour ajuster la position du robot, d'autre part pour étendre la construction de la grille globale. Cette approche est développée à partir de capteurs ultrasonores seuls [8][9] ou accompagnés d'un laser [10]. Dans les deux cas la localisation est faite par mise en correspondance des grilles. L'enregistrement des mesures suppose une définition précise des capteurs afin de rendre compte le plus fidèlement possible des informations recueillies. Pour une modélisation d'environnement,

ment intérieur les mesures ultrasonores successives peuvent être groupées en segments de droite comme dans [11] où le filtre de Kalman est employé d'une part pour créer des droites à partir des mesures, d'autre part pour se localiser par rapport à l'environnement déjà exploré et défini comme un ensemble de droites limitant l'espace libre.

Dans le contexte d'un environnement connu en supposant que le robot part d'un point de départ donné l'odométrie fournit un ordre de grandeur de la position qui sera ajustée par la procédure de localisation, c'est un cas de figure très répandu en robotique mobile. Une des méthodes les plus employées est le filtrage de Kalman : la position odométrique permet de prédire la distance entre le robot et des repères (naturels ou non) de l'environnement, la mesure des capteurs détermine la valeur réelle de cette distance, l'écart entre la valeur prédite et la valeur réelle constitue l'innovation qui permet de calculer une position estimée optimale par rapport à l'erreur d'estimation. Cette approche est utilisée en recherchant dans un environnement intérieur des caractéristiques naturelles telles que les plans et les coins à partir de six capteurs ultrasons [12] ou à partir d'un télémètre laser [13] ; dans [14] le capteur est une caméra et les repères sont les contours verticaux de l'image. Pour une application de robot nettoyeur [15], cette même méthode est employée en groupant les mesures ultrasonores en segments de droite comparés à ceux de l'environnement connu. Un autre mode de filtrage des mesures est la méthode des moindres carrés, elle est utilisée [16] avec un télémètre laser tournant pour déterminer la modification de la position odométrique qui minimisera les écarts entre les mesures et la carte de l'environnement. D'autres approches ne requièrent pas de référence stochastique ou statistique. Ainsi les réseaux neuronaux sont employés pour apprendre, en différents points, la scène vue par un robot équipé d'une caméra puis la reconnaître pour se localiser [17]. Pour une application dans une centrale nucléaire [18] des images couleurs permettent de détecter des points de repères précis par rapport à des caractéristiques connues de l'environnement et ainsi ajuster la position odométrique, le même principe est employé dans [5] à partir de balises artificielles.

#### – Localisation à l'arrêt

La conception est différente lorsque le robot mobile doit se localiser en dehors des mouvements car aucune estimation approximative de sa position n'est disponible. Un travail de référence dans ce domaine [19] modélise les mesures ultrasonores en segments de droite dont la place est recherchée sur les obstacles de l'environnement par un arbre d'interprétation. Une autre démarche analyse chaque mesure par intervalle de possibilité pour la position du robot, l'intersection des intervalles donne un ensemble contenant les configurations du robot compatibles avec la carte de l'environnement et les mesures. Elle est employée avec des capteurs ultrasons [20] ou avec une caméra [21]. La vision peut aussi être employée par la recherche d'invariants projectifs dont la mise en correspondance avec des

caractéristiques de l'environnement permet de se positionner sans calibration de la caméra [22][23]. Lorsque l'application autorise l'équipement de l'environnement, la perception de balises artificielles référencées détermine la place du robot. Dans [24] chaque repère identifiable est constitué de 3 leds infrarouges. Grâce à une modélisation très ajustée de la caméra placée sur le robot sa position est calculée précisément en analysant la place des trois points dans l'image.

D'autres travaux [25][26][27] intègrent dès la planification un critère relatif à la localisation. Il s'agit de choisir, dans la trajectoire, des points de passage pour lesquels l'environnement offre une configuration favorable concernant la prise de mesure et leur interprétation. Dans le cadre du projet VAHM les déplacements doivent offrir un confort maximal à la personne et la procédure de planification est déjà établie [28]. Nous recherchons donc un mode de localisation qui assure en toute circonstance un positionnement du fauteuil acceptable pour les tâches qui lui sont confiées. Nous serons amenés à distinguer deux cas de figure selon que le fauteuil est à l'arrêt ou en mouvement.

## 2. méthode

Le prototype du robot VAHM qui était initialement implanté sur une base mobile Robuter<sup>TM</sup> est actuellement transféré sur un fauteuil électrique Power Push<sup>TM</sup> (fig. 1).

Le fauteuil électrique est équipé de 16 capteurs ultrasons Polaroid<sup>TM</sup>, de deux codeurs incrémentaux sur chaque roue motrice et d'un microordinateur. Le système de communication homme-machine est constitué d'un écran où la machine affiche



Figure 1. – Le prototype du VAHM

ses informations et requêtes, et d'un interrupteur permettant à l'utilisateur de donner ses instructions ; le mode d'actionnement de l'interrupteur dépend des possibilités de l'utilisateur. L'étude de l'interaction entre l'homme et la machine menée au sein du laboratoire vise à rendre cette communication la plus conviviale et la plus efficace possible [6]. Ainsi les demandes de déplacement sont exprimées de manière simple et intuitive par des formulations du type « aller dans la cuisine » ou « se placer devant la télévision » qui sont sélectionnées dans un menu.

Lorsque la personne demande au fauteuil d'atteindre un objectif dans un univers modélisé, il est nécessaire, pour que le déplacement s'exécute correctement, que le fauteuil soit localisé au départ afin de planifier son mouvement à partir de ce point, puis que la position soit contrôlée en cours de mouvement pour s'assurer que la trajectoire est correctement suivie. Nous décrivons dans cet article les approches définies pour réaliser la localisation statique, à l'arrêt, et la localisation dynamique, en cours de mouvement, dans l'environnement connu du fauteuil. Deux procédures distinctes sont nécessaires car le contexte et les contraintes sont différents dans les deux cas :

– à l'arrêt, les seules informations disponibles sont les mesures ultrasonores et une indication de l'utilisateur concernant la zone dans laquelle il se trouve. Le temps de traitement peut être de l'ordre de la minute et la précision requise est de l'ordre de 10 cm en position et 7° en orientation. En effet cet ordre de grandeur est acceptable pour établir la planification du déplacement et pour initialiser la position odométrique qui sera ajustée par la seconde procédure.

– en cours de mouvement la localisation consiste en un recalage de la position odométrique grâce aux mesures ultrasonores. Pour assurer une exécution correcte de la trajectoire le temps de traitement autorisé est de quelques secondes et la précision requise est de l'ordre de 5 cm en position et 3° en orientation.

L'articulation des deux modes de localisation suivant l'état du fauteuil est décrite dans le schéma ci dessous (fig. 2).

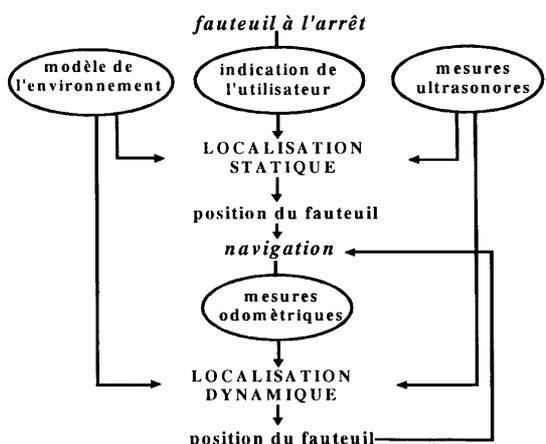


Figure 2. – Deux modes de localisation du VAHM

### 3. localisation statique

#### a) principe

L'environnement est connu et modélisé, il s'agit ici de trouver la position du fauteuil à partir des mesures des capteurs ultrasons et d'une indication donnée par l'utilisateur. Cette dernière est fournie par une formulation simple comme, par exemple, « je viens d'entrer au salon » et délimite les positions possibles à une aire de recherche de 1.5m\*1.5m en position et 90° en orientation. La connaissance *a priori* de la place du fauteuil est imprécise et une interprétation détaillée des données ultrasonores est nécessaire pour définir l'espace libre autour du robot et le mettre en correspondance avec l'environnement d'évolution du fauteuil.

Aux représentations sous forme de droites employées lorsque de nombreuses données doivent être référencées [15][19] nous préférons les grilles d'occupation qui explicitent toutes les indications sur l'occupation de l'espace issues de chaque mesure [8][9] et constituent une description appropriée des mesures ultrasonores acquises sur notre prototype. A chaque prise de mesure nous créons une grille locale centrée sur le fauteuil et composée de cellules positives pour l'espace occupé et négatives pour l'espace libre. Une grille globale est enregistrée au préalable et décrit l'environnement suivant le même code. La correspondance entre les deux grilles, pour une position et une orientation données du fauteuil  $(x, y, \theta)$ , est mesurée par la somme cumulée des produits des cellules superposées dans les deux grilles, notée  $S(x, y, \theta)$ . La procédure de localisation (fig. 3) calcule, sur l'aire de recherche, la meilleure place d'une grille par rapport à l'autre c'est-à-dire la valeur de  $(x, y, \theta)$  pour laquelle  $S$  est maximum.

Les paragraphes suivants détaillent la manière dont les différentes étapes de cette procédure sont réalisées. Le contexte du

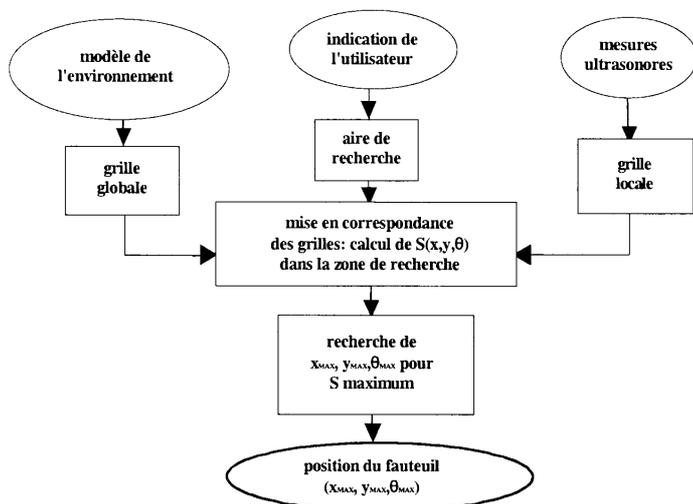


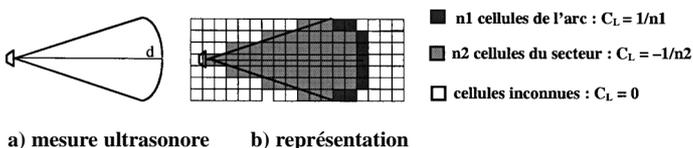
Figure 3. – Localisation statique

projet nous impose une méthode simple qui puisse être implantée sur le microcalculateur embarqué et dont le déroulement ne requiert pas plus d'une minute pour ne pas imposer une attente trop longue à la personne. Compte tenu de ces contraintes nous évitons les représentations sophistiquées coûteuses en ressources et en temps qui conduisent potentiellement à une bonne précision mais seraient inexploitable sur notre prototype.

**b) Représentation de l'environnement et des mesures ultrasonores**

La grille globale décrit l'espace de travail à partir d'une connaissance précise de l'environnement dans lequel le fauteuil se déplace. Les cellules vides prennent la valeur -1, les cellules inconnues la valeur 0, et les cellules situées à la limite de l'espace occupé la valeur 1. Les cellules situées à l'intérieur des obstacles sont considérées comme inconnues car les capteurs ultrasons ne perçoivent que la limite de l'espace occupé et, de leur point de vue, le fait que l'intérieur d'un obstacle soit occupé ne constitue pas une information.

Les mesures ultrasonores sont enregistrées dans la grille locale qui est centrée sur le robot. Pour un capteur donné, une mesure  $d$  signifie qu'un obstacle se trouve dans son cône d'émission à la distance  $d$  du capteur et qu'il n'y a pas d'obstacle dans ce même cône avant la distance  $d$ . Nous représentons une telle mesure en donnant des valeurs positives aux cellules de la grille situées dans la « région occupée » sur l'arc et des valeurs négatives aux cellules situées dans la « région vide » sur le secteur. Le modèle de référence pour une telle représentation [8] définit des profils de probabilité pour chaque région et les valeurs des cellules varient suivant leur proximité avec l'axe acoustique du capteur. Pour que la création de la grille soit rapide nous préférons donner une valeur identique à toutes les cellules d'une même région. Une fois la grille locale établie, l'objectif est de chercher la position et l'orientation pour lesquelles elle se superpose au mieux avec la grille globale. Si la valeur affectée aux cellules de la grille locale ne dépendait pas de la mesure qu'elles représentent, une mesure représentant une grande distance serait plus importante pour la mise en correspondance des grilles qu'une mesure représentant une petite distance parce qu'elle couvre un plus grand nombre de cellules. Pour que toutes les mesures aient le même poids, nous donnons aux cellules des valeurs  $C_L$  inversement proportionnelles au nombre de cellules dans une région donnée (fig. 4). Si un arc regroupe  $n1$  cellules, elles prendront la valeur  $C_L = 1/n1$  et si un secteur regroupe



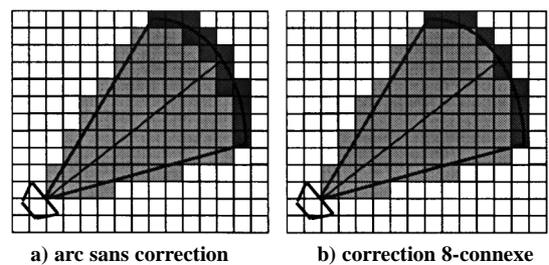
a) mesure ultrasonore    b) représentation  
Figure 4. – Représentation d'une mesure ultrasonore

$n2$  cellules elles prendront la valeur  $C_L = -1/n2$ . Les cellules inexplorées gardent la valeur 0.

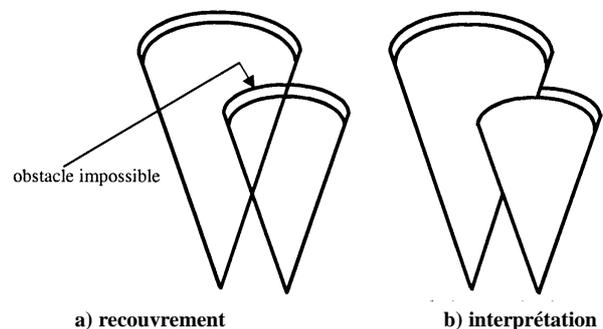
Une autre question concerne le nombre de cellules positives couvertes par l'arc. En effet il peut varier en fonction de l'orientation de l'axe acoustique du capteur [29]. Afin que le nombre de cellules dans l'arc ne dépende pas de l'orientation du modèle nous employons un modèle « 8-connexe » pour la discrétisation de l'arc (fig. 5). Le principe de ce modèle est que toutes les cellules, à l'exception des deux extrémités ont exactement deux cellules adjacentes dans l'arc ; une cellule adjacente étant une des huit cellules voisines dans la grille.

Nous avons défini le mode d'enregistrement pour un capteur unique mais les cônes d'émission de deux capteurs voisins peuvent se superposer. Dans ce cas nous sommes sûrs que l'obstacle détecté par la plus petite valeur ne peut pas être dans le cône d'émission du capteur ultrason renvoyant la plus grande valeur. C'est pourquoi nous supprimons cette partie de l'arc en écrasant les cellules correspondantes avec des cellules vides. Pour les cellules situées à l'intersection de cellules libres provenant de deux capteurs, nous donnons la valeur provenant du capteur détectant la plus petite distance puisque c'est la plus précise des deux. Ainsi nous donnons la priorité aux petites mesures pour la détection des espaces libres et aux grandes mesures pour la détection des obstacles (fig. 6).

Une fois les données ultrasonores enregistrées nous devons considérer la surface du robot. Elle correspond à toutes les cellules couvertes par la projection du robot sur le sol. Nous savons que ces cellules ne contiennent pas d'obstacles, nous leur affectons donc une valeur négative. Pour le choix de cette valeur deux



a) arc sans correction    b) correction 8-connexe  
Figure 5. – Arc 8-connexe



a) recouvrement    b) interprétation  
Figure 6. – Recouvrement de cônes

considérations sont prises en compte. D'une part, ces cellules sont forcément vides et ne doivent pas être négligeables. D'autre part, la perception de l'environnement nécessaire à la localisation est assurée par les mesures ultrasonores et leur influence doit être prépondérante. Nous donnons donc à chaque cellule couverte par le robot la valeur  $-c/n$  où  $c$  est le nombre de capteurs et  $n$  le nombre de cellules couvertes par la surface du robot. La somme des valeurs absolues des cellules est  $c$  pour le robot et  $2c$  pour les mesures ainsi pour la localisation le poids relatif des données est d'1/3 pour le robot et de 2/3 pour les mesures.

### c) mise en correspondance de grilles

L'objectif est de déterminer la translation et la rotation de la grille locale par rapport à la grille globale pour laquelle la plus grande quantité de cellules de même type se superposent ce qui définit la position et l'orientation du fauteuil (fig. 7).

Pour cela nous considérons la quantité  $S(x, y, \theta)$  définie par :

$$S(x, y, \theta) = \sum_{i,j} C_L(i, j) * C_G(k, l) \quad \text{avec} \begin{cases} k = x + i \cos\theta + j \sin\theta \\ l = y - i \sin\theta + j \cos\theta \end{cases}$$

Les  $C_L(i, j)$  sont les valeurs des cellules de la grille locale, les  $C_G(k, l)$  sont les valeurs des cellules correspondantes de la grille globale,  $(x, y)$  mesure la translation et  $\theta$  la rotation de la grille locale par rapport à la grille globale.

Cette somme est incrémentée si les deux cellules ont le même signe, décrémentée si elles sont de signes opposés et maintenue constante si l'une des deux cellules est nulle.  $S(x, y, \theta)$  est évaluée pour toutes les valeurs de  $x, y$  et  $\theta$  situées dans l'aire de recherche. La position du fauteuil est déterminée par la valeur du triplet  $(x_{MAX}, y_{MAX}, \theta_{MAX})$  où  $S$  est maximale.

L'aire de recherche a une dimension de 1,5 m sur 1,5 m pour la position et de  $90^\circ$  pour l'orientation. Compte tenu des contraintes de précision de la procédure, la taille des cellules de la grille est fixée à 10 cm sur 10 cm et le pas de recherche est

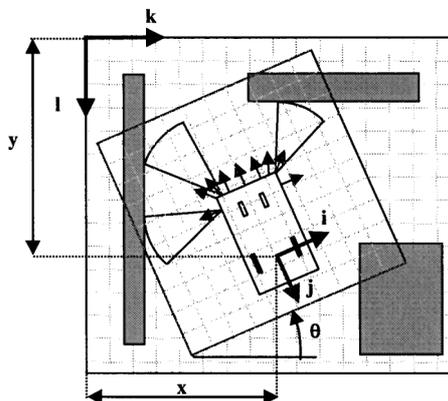


Figure 7. – Mise en correspondance des grilles

d'une cellule en translation et de  $5^\circ$  en orientation. Le calcul de  $S(x, y, \theta)$  sur toute l'aire de recherche requiert l'exécution de  $3.10^7$  opérations. Afin de ramener la charge de calcul dans des limites raisonnables nous avons établi une méthode de recherche hiérarchisée utilisant les grilles définies pour différentes résolutions [30] pour cela nous créons un niveau supérieur où la taille des cellules est de 20 cm sur 20 cm.

Les grilles sont enregistrées pour ces deux niveaux de définition et leur mise en correspondance est réalisée en deux étapes. La grille locale de faible résolution (20 cm) est recherchée dans la grille globale du même niveau sur toute l'aire de recherche afin de déterminer  $x_{MAX2}, y_{MAX2}$  et  $\theta_{MAX2}$ . Puis le traitement du niveau inférieur permet de préciser le résultat. L'aire de recherche est alors centrée sur  $x_{MAX2}, y_{MAX2}$  et  $\theta_{MAX2}$  et a une taille de 40 cm sur 40 cm en position et de  $30^\circ$  en orientation, la position  $(x_{MAX1}, y_{MAX1})$  et l'orientation  $(\theta_{MAX1})$  délivrées à ce niveau (grille non comprimée) indiquent la place et l'orientation du fauteuil. Par ce moyen le nombre de calculs nécessaires est divisé par 10 et les essais réalisés montrent que le temps de traitement est réduit d'1/3. Il est alors, en moyenne, de 45s sur un PC 486 ce qui est acceptable pour l'application ; les essais réalisés en simulation montrent qu'en utilisant un calculateur plus puissant (Pentium III à 450 MHz) il peut être ramené à 4s [31].

### d) résultats

Cet algorithme est implanté sur notre prototype. Nous avons testé ses performances pour 100 positions différentes dans l'appartement reconstitué au laboratoire pour des mesures obtenues expérimentalement par les capteurs ultrasons et pour des mesures simulées. Ces dernières sont déterminées à partir d'un plan de l'environnement et d'une position donnée du robot, par le calcul des données que les capteurs sont supposés délivrer. Nous admettons pour cela qu'ils renvoient la distance au premier obstacle rencontré dans leur cône d'émission.

Compte tenu de la précision requise pour notre application (10 cm en position et  $7^\circ$  en orientation) sur les 100 essais réalisés nous obtenons 80 % de bons résultats à partir des mesures réelles prises sur le fauteuil et 100 % dans le cas des valeurs simulées. La figure 8 donne un exemple de test en conditions réelles. A gauche le fauteuil est représenté sur sa place exacte, à droite sur la position donnée par l'algorithme. Le temps de traitement a été de 51s et la valeur de  $S(x, y, \theta)$  est 32 à son maximum. Étant donné la taille des cellules l'écart observé entre la position obtenue et la position réelle n'est pas représentatif d'une erreur mais de l'imprécision liée à la méthode qui est tolérable dans ce contexte.

Les problèmes rencontrés en conditions réelles proviennent des mesures erronées des capteurs ultrasons dues aux phénomènes parasites de réflexions multiples et de diaphonie. Dans un avenir proche notre fauteuil sera équipé d'un déclenchement en séquence des capteurs ultrasons afin de limiter ces inconvénients.

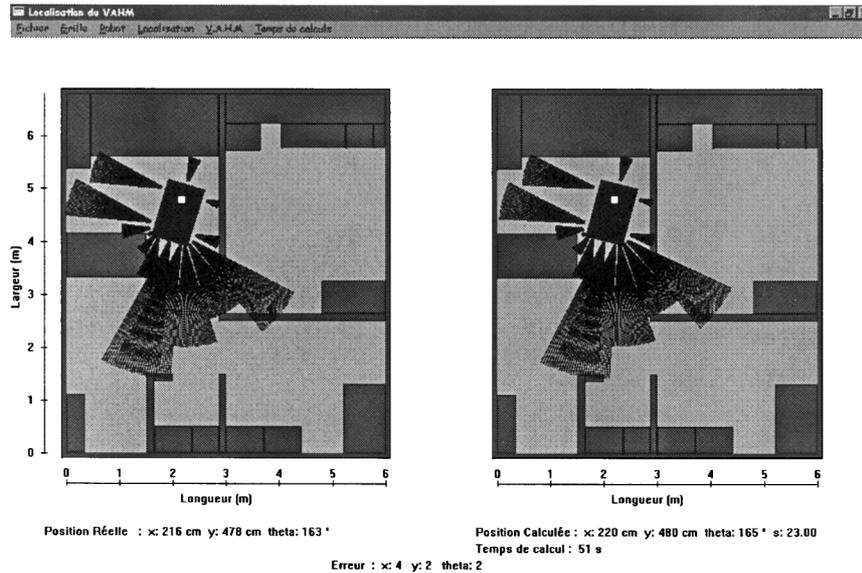


Figure 8. – Exemple de localisation en conditions réelles

La présence de la personne sur le fauteuil permet une validation *a posteriori* afin d'éliminer les mauvais positionnements : le résultat de la procédure de localisation est affiché à l'écran et le pilote peut juger s'il est cohérent ou non. Il a alors la possibilité, le cas échéant, de signaler la présence d'une erreur. Bien que la procédure de localisation demande confirmation à l'utilisateur, cette tâche est moins lourde pour le pilote que s'il devait déterminer seul la place exacte du fauteuil.

## 4. localisation dynamique

Lorsqu'une trajectoire planifiée est en cours d'exécution, une seconde fonction est utilisée pour localiser le fauteuil durant le mouvement. Dans ce cas, le déplacement du fauteuil depuis sa position initiale connue, est évalué à partir des mesures des codeurs incrémentaux. Ceci détermine sa position odométrique. Le problème de la localisation dynamique consiste alors à ajuster régulièrement cette position en se repérant par rapport à l'environnement ; son exécution en cours de mouvement impose un temps de traitement bref.

### 4.1. Recalage à partir des capteurs U.S.

#### a) Introduction

Nous avons décrit (§1.b) différentes approches employant les mesures de capteurs extéroceptifs comme données complémentaires aux mesures odométriques. Dans notre contexte le réajuste-

ment se fait en cours de mouvement environ tous les 50 cm. Il doit donc traiter de faibles dérives et s'exécuter instantanément. La méthode des moindres carrés est un moyen rapide de rechercher la transformation à apporter à la position odométrique pour obtenir la meilleure association entre les mesures et l'environnement [16]. Partant de ce principe nous réalisons la localisation dynamique en construisant une carte ponctuelle locale des obstacles perçus par les capteurs ultrasons autour du robot, puis en recherchant de manière itérative le petit ajustement de la position odométrique qui associera au mieux (selon le critère des moindres carrés) cette carte ponctuelle avec la carte globale de l'environnement. La figure 9 décrit le principe de la localisation dynamique en notant  $(X_{EST}, Y_{EST}, \theta_{EST})$  la configuration estimée du fauteuil initialisée par l'odométrie et  $(T_x, T_y, T_\theta)$  l'ajustement en position et en orientation calculé à chaque itération.

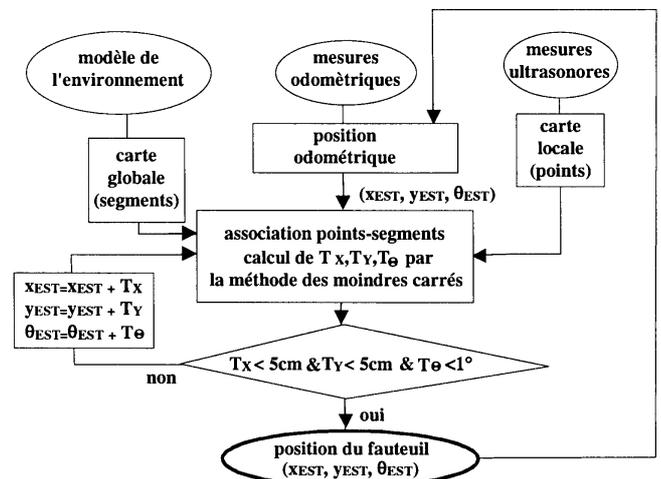


Figure 9. – Principe de la localisation dynamique

b) définition des cartes

La carte globale décrit précisément l'environnement du robot par des segments de droite qui délimitent l'espace occupé en deux dimensions au niveau des capteurs. La carte locale représente les seize mesures de distance des capteurs ultrasons autour du fauteuil en supposant que chaque mesure est effectuée dans l'axe acoustique du capteur [32]. Nous considérons donc comme point d'impact de l'onde le lieu où l'obstacle a la plus forte probabilité de se trouver. Cette hypothèse simplificatrice permet de donner rapidement une représentation minimale des mesures. La position du fauteuil ( $X_{EST}, Y_{EST}, \theta_{EST}$ ) est initialisée par la position odométrique puis mise à jour à chaque itération de l'algorithme de recalage.

A chaque donnée  $d$  d'un capteur ultrason, correspond un point  $P$  de la carte locale dont les coordonnées ( $X_P, Y_P$ ) sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} X_P = X_{EST} + r \sin(\theta_{EST} + \gamma) + d \sin(\theta_{EST} + \beta) \\ Y_P = Y_{EST} + r \cos(\theta_{EST} + \gamma) + d \cos(\theta_{EST} + \beta) \end{cases}$$

où  $\gamma, \beta$ , et  $r$  définissent la place des capteurs sur le fauteuil.

Dans une représentation idéalisée chaque point de la carte locale serait situé sur un segment de la carte globale, mais en raison de l'incertitude existant sur la position odométrique et de l'imprécision des mesures ultrasonores, il existe un décalage entre les points et les segments. L'objectif de l'algorithme est d'évaluer ce décalage pour tous les éléments de la carte locale et de chercher le petit ajustement de la position du fauteuil qui placera au mieux chaque point sur un segment.

c) mise en œuvre du recalage

L'algorithme se décompose en 4 étapes principales :

1) Pour chaque point de la carte locale trouver le segment correspondant dans la carte globale.

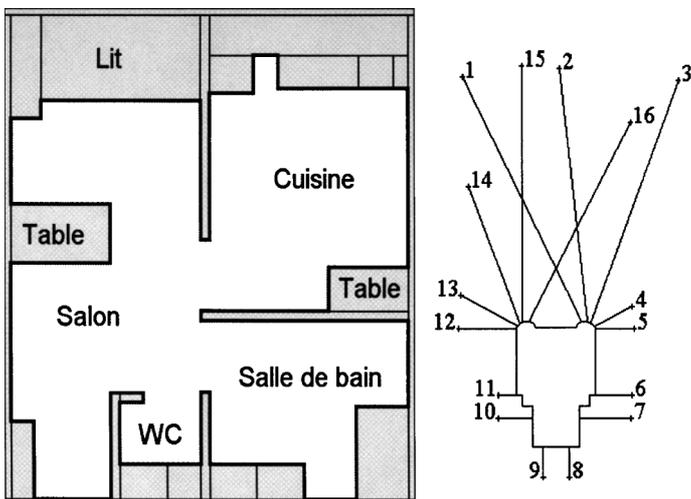


Figure 10. – Carte globale et carte locale

- 2) Calculer le déplacement du robot (translation  $T_X, T_Y$  et rotation  $\alpha$ ) qui minimise la somme des distances point-segment au carré.
  - 3) Définir la nouvelle position du robot et calculer la nouvelle carte locale autour de celle-ci.
  - 4) Répéter les opérations 1-2 et 3 jusqu'à ce que le déplacement calculé à l'étape 2 soit insignifiant ( $T_X$  et  $T_Y < 5$  cm,  $\alpha < 1^\circ$ ).
- La mesure  $l_i$  de la distance entre un point  $P_i$  et un segment est définie par :

$$(1) \quad l_i = \overrightarrow{S_i P_i} \cdot \vec{u}_i$$

où  $S_i$  est un point quelconque sur le segment du modèle global et  $\vec{u}_i$  est le vecteur orthogonal à ce segment.

L'écart entre un point et un segment est mesuré par la distance entre le point et l'axe du segment. Cette grandeur, utilisée par la suite, ne peut être employée pour définir la mise en correspondance entre les points et les segments. En effet si le point est éloigné du segment mais proche de son axe (fig. 11), cette mesure est faible alors que le point doit être associé à un autre segment.

Dans le cas de la figure 11,  $l_1$  est plus petit que  $l_2$  bien que le point  $P$  soit plus proche du segment 2 que du segment 1. Pour associer correctement les éléments des deux cartes, le test de correspondance utilise comme critère l'appartenance du point à l'ellipse entourant le segment. Ici le point est à l'intérieur de l'ellipse entourant le segment 2. Il lui est donc associé et notre objectif dans la suite de l'algorithme est de réduire  $l_2$ . Ainsi nous considérons l'environnement comme un ensemble d'ellipses. Dans la carte locale nous maintenons uniquement les points situés à l'intérieur d'une ellipse, les autres points sont éliminés.

Si nous considérons  $n$  points dans la carte locale,  $l_i$  définie par l'équation (1) mesure la distance point-segment pour  $i$  de 1 à  $n$ . Pour chaque point de la carte locale une rotation  $\alpha$  et une translation  $T$  transforment  $P_i$  en  $P'_i$  et  $l_i$  en  $l'_i$ , nous recherchons la transformation  $(\alpha, T)$  qui minimise tous les  $l'_i$ .

La transformation qui annule une valeur  $l'_i$  est celle par laquelle le point  $P_i$  sera placé sur le segment qui lui est associé. Elle est définie par [31] :

$$(2) \quad (\vec{T} + \alpha \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}) \cdot \overrightarrow{C P_i} \cdot \vec{u}_i = -l_i$$

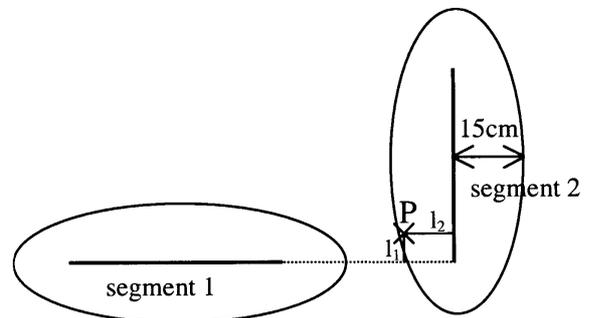


Figure 11. – Association entre point et segment.

Comme (2) est établie pour chaque point, nous traitons un système surdéterminé de  $n$  équations et trois inconnues, c'est pourquoi nous calculons les paramètres  $(T_x, T_y, \alpha)$  en minimisant la somme des  $l'_i$  au carré. La méthode des moindres carrés permet de calculer une première estimation  $(\hat{T}_x, \hat{T}_y, \hat{\alpha})$  et une nouvelle carte locale autour de la nouvelle position du fauteuil. L'écart entre les points de la carte locale  $P'_i$  et les segments de la carte globale peut encore être significatif, et la procédure est répétée pour réduire cet écart. A l'étape suivante  $S_i$  et  $u_i$  ne sont pas changés mais  $P_i$  est remplacé par  $P'_i$ . Une nouvelle transformation est calculée, qui est composée à la précédente. Les itérations sont réalisées jusqu'à ce que le déplacement ne soit plus significatif (translation inférieure à 5 cm et rotation inférieure à 1°). En appliquant tous les ajustements calculés à la position odométrique, nous définissons la position estimée du fauteuil.

d) *essais*

Dans le but de tester l'algorithme de correction de position, le fauteuil a parcouru une trajectoire, dans l'appartement reconstruit au laboratoire, au cours de laquelle sa position a été calculée tous les 50 cm. Pour estimer la validité du résultat, à chaque correction de la position nous arrêtons le fauteuil afin de mesurer manuellement sa position réelle qui sera comparée à la position délivrée par l'algorithme. Sur l'ensemble des 60 essais réalisés [33] l'ordre de grandeur de l'erreur sur la position odométrique est de 20 cm pour la position et 10° pour l'orientation et nous obtenons après recalage une erreur moyenne de 3 cm et 7°.

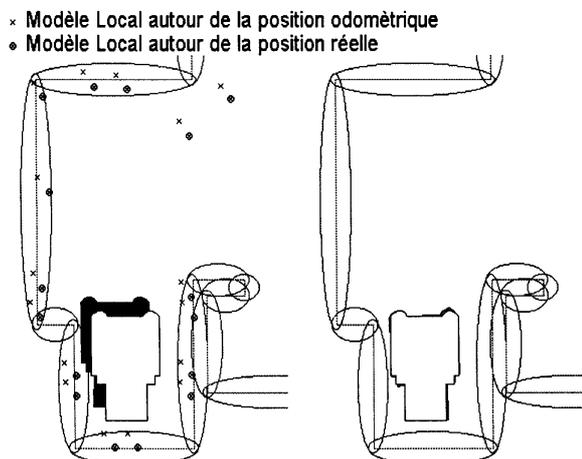
Le temps de traitement requis est de l'ordre d'1 seconde. L'exemple ci-dessous (fig. 12) illustre un des essais réalisés. Partant d'une estimation odométrique pour laquelle l'orientation est bonne mais la position est décalée de 15 cm, la procédure ajuste totalement la position. Les valeurs estimées de X et Y données par la procédure correspondent aux valeurs réelles. La figure de gauche représente les points de la carte locale autour de la position réelle (fauteuil blanc) et de la position odométrique

(fauteuil noir). La seconde image montre la position estimée en blanc qui se superpose pratiquement à la position réelle.

Sur l'ensemble des essais, nous sommes confrontés aux mêmes problèmes liés aux mesures aberrantes des capteurs (diaphonie et specularité) que pour la méthode précédente, cependant le fait d'éliminer de la carte locale les mesures qui ne sont pas associées à un segment permet de limiter l'influence de ces valeurs parasites. En dehors de ce problème spécifique nous notons que la méthode est plus efficace lorsque les axes des capteurs sont orthogonaux aux segments du modèle, comme dans l'exemple ci-dessus. En effet l'hypothèse selon laquelle le point d'impact du capteur est dans l'axe de ce dernier est bien vérifiée dans une telle configuration, c'est pourquoi elle est la plus favorable pour l'application de la méthode. Par ailleurs en raison de la forme en arc représentant la place possible de l'obstacle perçu dans l'environnement le recalage est peu performant concernant l'orientation (la valeur moyenne de l'erreur de 7° n'est pas satisfaisante). En conclusion nous observons que la précision obtenue sur la position est acceptable alors que la précision en orientation doit être améliorée. C'est pourquoi nous proposons l'usage d'un capteur complémentaire pour la correction de l'orientation du fauteuil : une caméra. Son usage est courant pour la localisation [21][22][23] et l'intérêt d'introduire la vision monoculaire sur notre prototype est son apport potentiel pour d'autres fonctionnalités. En effet la perception visuelle peut compléter les modules de navigation, d'accostage ou d'évitement d'obstacles.

### 4.2. ajustement de l'orientation du robot par vision monoculaire

Le support matériel de cette fonction est une caméra CCD matricielle à objectif fixe solidaire de l'accoudoir du fauteuil qui permettra de réajuster son orientation par une autre perception de l'environnement. Cette opération est réalisée par l'appariement des segments verticaux de l'environnement avec les contours



$X_{réel}$	= 85,0	$Y_{réel}$	= 587,0
$X_{odom}$	= 75,0	$Y_{odom}$	= 575,0
$X_{estimé}$	= 85,0	$Y_{estimé}$	= 587,0
	$\theta_{réel}$	= 0,0	
	$\theta_{odom}$	= 0,0	
	$\theta_{estimé}$	= 1,0	

Avant correction :  
 $\epsilon_p = 15.0$  cm  
 $\epsilon_\theta = 0.0$  deg  
 Après correction :  
 $\epsilon_p = 0.0$  cm  
 $\epsilon_\theta = 1.0$  deg

Figure 12. – Recalage de la position odométrique

verticaux extraits de l'image. Nous exposons, dans ce qui suit, l'approche conçue pour réaliser cette tâche et nous montrons des essais préliminaires réalisés à partir d'une caméra dont la position est connue et pour laquelle nous déterminons l'orientation.

a) principe

A chaque instant de recalage de la position odométrique, l'image est acquise en même temps que les mesures ultrasonores. La position de la caméra ( $X_C, Y_C$ ) est calculée par le réajustement de la position du fauteuil (§3.1). Dans l'image la place d'un contour vertical donné est mesurée par son abscisse  $X_n$ . La connaissance de la position ( $X_{Pm}, Y_{Pm}$ ) de ce segment dans l'environnement permet de déterminer l'angle  $\theta_i$  entre l'axe optique de la caméra et un axe de référence de l'environnement (fig. 13).

En effet l'angle  $\alpha_n$  entre l'axe optique de la caméra et l'axe  $[C, S_{Pm}]$  est calculé à partir de la distance focale  $f$  de la caméra et de l'abscisse  $X_n$  du contour dans l'image. La valeur de  $\theta_{Pm}$  étant calculée,  $\alpha_n$  détermine  $\theta_i$  l'orientation de l'axe optique de la caméra qui est aussi celle du fauteuil. L'approche sera donc fondée sur l'appariement entre les segments et les contours ; c'est-à-dire que pour tout contour vertical perçu dans l'image nous rechercherons le segment vertical de l'environnement qu'il représente.

b) mise en œuvre

Une phase préliminaire de calibration de la caméra, par la scrutation d'une mire d'étalonnage, définit les paramètres de distance focale et d'angle de vue nécessaires à son emploi. Par ailleurs, nous créons un modèle de l'environnement où tous les contours verticaux sont représentés. Il peut s'agir de la limite

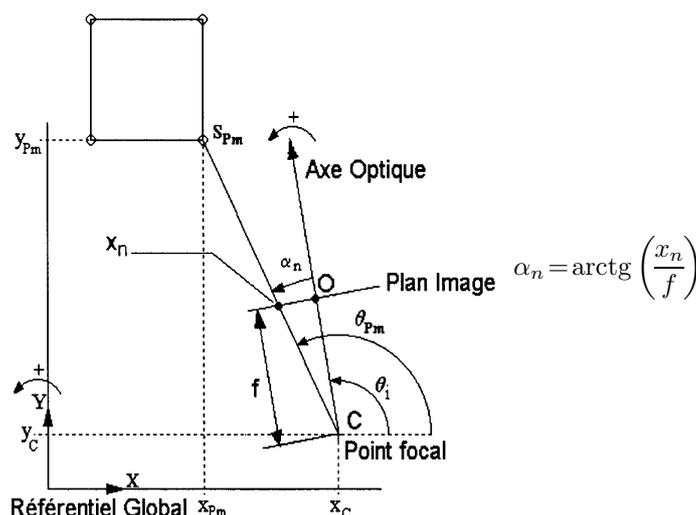


Figure 13. – Orientation de la caméra

des obstacles (élévation verticale du modèle précédent) ou de tout autre contour d'objet de l'environnement (fenêtre, cadre...). L'image acquise par la caméra est restituée par égalisation d'histogramme puis les contours verticaux sont extraits aux moyen d'un filtre de Deriche [34], d'une recherche des maxima locaux, d'un seuillage par hystérésis et d'un suivi de contours. La position du fauteuil et son orientation approximative connues permettent de sélectionner les segments verticaux du modèle de l'environnement se trouvant dans l'angle de vue de la caméra.

La mise en correspondance entre les segments sélectionnés et les contours détectés dans l'image est réalisée à l'aide d'un arbre d'interprétation [35] qui permet d'envisager tous les arrangements possibles des contours avec les segments. Une association entre un contour et un segment définit une orientation du fauteuil selon la méthode décrite au paragraphe précédent. Chaque niveau de l'arbre représente un contour et chaque nœud est une association de ce contour avec un segment de l'environnement. A chaque nœud correspond une orientation de la caméra. Afin de trouver la bonne association entre segments et contours nous estimons la variation d'orientation de la caméra lors du parcours d'une branche de la racine au nœud terminal. Si les différentes valeurs de  $\theta_i$  mesurées pour chaque nœud de la branche sont comprises dans un intervalle restreint (environ 3°) cette branche représente le bon appariement entre contours et segments et la valeur moyenne des  $\theta_i$  obtenus représente l'orientation du fauteuil. Par la suite nous n'explorerons que les branches pour lesquelles une certaine constance en orientation est observée.

c) exemple

Nous avons réalisé 15 essais dans deux environnements différents [33] (un bureau et une chambre), la caméra est placée dans une position connue de l'espace de travail avec une imprécision sur l'orientation variant de 5 à 30°.

La figure ci-après (fig. 14) illustre l'image acquise dans le bureau, l'extraction des contours et leur seuillage.

Le tableau de la figure 15 décrit 3 exemples d'essais réalisés. La caméra est placée en une position connue ( $X, Y$ ) dans un environnement défini par les segments verticaux visibles et nous donnons une orientation estimée  $\theta_{estimée}$  entachée d'erreur. Le résultat de la procédure est donné dans  $\theta_{corrigée}$  que nous comparons à l'orientation exacte de la caméra  $\theta_{mesurée}$ , mesurée manuellement, pour calculer la valeur de l'erreur  $\epsilon$ . Les valeurs obtenues pour  $\theta_{corrigée}$  sont des valeurs moyennes des orientations obtenues sur une branche de l'arbre d'interprétation. Sur cet échantillon l'ajustement de l'orientation est efficace puisque l'erreur se situe dans un ordre de grandeur acceptable.

Sur les 15 essais réalisés pour différentes positions et orientations de la caméra la correction est réussie dans 14 cas et l'erreur subsistant sur l'orientation est inférieure à 3°. Dans l'essai erroné, un seul élément de contour a été détecté dans l'environnement. L'arbre d'interprétation est alors inopérant puisqu'au-

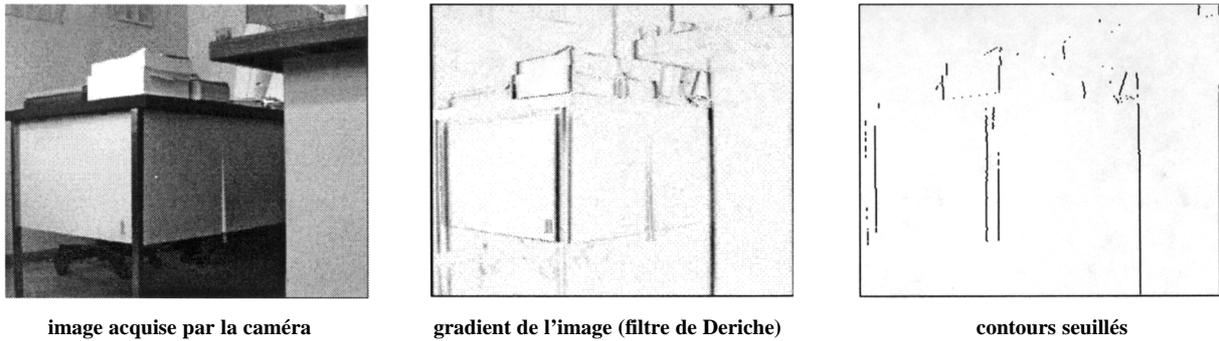


Figure 14. – Création de l'image des contours

X cm	Y cm	$\theta^{\circ}_{\text{estimée}}$	$\theta^{\circ}_{\text{corrigée}}$	$\theta^{\circ}_{\text{mesurée}}$	$\varepsilon^{\circ}$
162	100	95	89.3	90	0.7
222	286	300	312.3	311	1.3
274	202	300	329.7	330	0.3

Figure 15. – Correction de l'orientation en condition réelles

cun indice ne détermine le segment qu'il représente. Le temps de calcul est en adéquation avec l'application s'il y a peu d'appariements (environ 400 ms pour 4 contours détectés). Les améliorations envisagées concernent une diminution du temps requis pour la phase d'exploitation de l'arbre en n'explorant que les branches favorables et une adaptation de l'extracteur de contours par un seuillage dynamique afin de détecter un nombre d'éléments suffisant quelque soit le contexte. Ces premiers essais montrent que la méthode peut s'adapter à notre projet. L'étape suivante consistera à l'associer à la correction de position utilisant les capteurs à ultrasons afin de la tester en conditions réelles.

## 5. conclusion

Deux fonctions complémentaires assurent la tâche de localisation du fauteuil électrique autonome développé dans le cadre du projet VAHM. La localisation statique réalisée en dehors de tout déplacement repose sur une modélisation précise et simple des mesures ultrasonores qui délivre rapidement une représentation exhaustive de l'environnement perçu en terme d'espace libre et d'espace occupé. La position du fauteuil est déterminée à partir de ces données et de la connaissance du lieu d'évolution du fauteuil. Les essais réalisés en simulation et en conditions réelles montrent l'adéquation de la méthode à notre application d'autant qu'une confirmation complémentaire est assurée sous forme d'une validation du résultat par la personne.

La localisation dynamique s'opère lors de l'exécution d'une trajectoire planifiée. Elle consiste à ajuster la position issue des

données odométriques. Nous utilisons pour ce faire la méthode des moindres carrés et un modèle basique des mesures ultrasonores dans lequel la mesure est supposée prise dans l'axe du capteur. Cette seconde fonction est plus rapide que la précédente et plus précise en ce qui concerne la position, en revanche les résultats en orientation sont approximatifs. Nous introduisons alors une caméra comme capteur complémentaire afin de déterminer l'orientation exacte du fauteuil. L'approche développée pour cette fonctionnalité est mise en œuvre et testée.

Nous disposons des outils et fonctionnalités requis pour la localisation du fauteuil électrique autonome.

L'implantation de tous les modules sur le prototype permettra une étude plus approfondie de la fiabilité de cette tâche. Par ailleurs les problèmes rencontrés dans le cadre de notre projet étant très similaires à ceux de la robotique mobile en général, l'approche développée pour traiter la localisation est susceptible d'être exploitée dans d'autres contextes.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Fattal, J.-L. Turlan, E. Peruchon, P. Rabischong, « La robotique mobile au service des personnes handicapées », Revue Française de Mécanique, Vol. 1, pp. 45-47, Mars 1998.
- [2] P. Hoppenot, « Contribution de la robotique mobile à l'assistance aux personnes handicapées », Thèse de doctorat de l'Université d'Evry, novembre 1997.
- [3] S.P. Levine, D.A. Bell, L.A. Jaros, R.C. Simpson, Y.K. Koren, J. Borenstein, « The navchair assistive wheelchair navigation system », IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 7, n° 4, pp. 443-451, 1999.
- [4] U. Borgolte, H. Hoyer, C. Buhler, H. Heck, R. Hoepler, « Architectural concepts of a semi-autonomous wheelchair », Journal of Intelligent and Robotic Systems 22, pp. 233-253, 1998.
- [5] J.D. Yoder, E.T. Baumgartner, S.B. Skaar, « Initial results in the development of a guidance system for a powered wheelchair », IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 4, n° 3, pp. 143-151, 1996.
- [6] G. Bourhis, Y. Agostini, « The VAHM robotized wheelchair: system architecture and human-machine interaction », Journal of Intelligent and Robotic Systems 22, pp. 39-50, 1998.
- [7] J. Borenstein, J. Evans, « The OmniMate mobile robot – design, implementation, and experimental results », Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3505-3510, April 1997.

- [8] A. Elfes, « Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation », IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 233-249, 1987.
- [9] D. Pagac, E. Nebot, H.F. Durrant-Whyte, « An evidential approach to map-building for autonomous vehicles », IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 14, n° 4, pp. 623-629, 1998.
- [10] A.C. Schultz, W. Adam, B. Yamauchi, « Integrating exploration, localization, navigation, and planning with a common representation », Autonomous Robots 6, pp. 293-308, 1999.
- [11] J.L. Crowley, « World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging », Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 674-680, 1989.
- [12] J.J. Léonard, H.F. Durrant-Whyte, « Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons », IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, n° 3, pp. 376-382, 1991.
- [13] A. Arsenio, I. Ribeiro, « Active range sensing for mobile robot localization », IROS'98, Victoria, Canada, pp. 1066-1071, 1998.
- [14] F. Chevallier, I. Lecœur Taibi, J.L. Crowley, « Estimation de la position d'un robot mobile par odométrie et vision monoculaire », Traitement du Signal, Vol. 12, n° 3, pp. 255-267, 1995.
- [15] P. Malley, P. Aubry, « A low-cost localisation system based on a map matching technique », Intelligent Autonomous Systems, pp. 72-77, 1995.
- [16] J.J. Cox, « Blanche – An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle », IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, n° 2, pp. 193-204, 1991.
- [17] G. Von Wichert, « Mobile robot localization using a self-organized visual environment representation », Robotics and Autonomous Systems 25, pp. 185-194, 1998.
- [18] K. Ebihara, T. Otani, E. Kume, « Position localization for mobile robots using a colour image of equipment at nuclear plants », Robotica, Vol. 14, pp. 677-685, 1996.
- [19] M. Drumheller, « Mobile Robot Localization Using Sonar », IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 9, n° 2, pp. 325-332, March 1987.
- [20] M. Kieffer, « Estimation ensembliste par analyse par intervalles. Application à la localisation d'un véhicule », Thèse de doctorat, Université Paris XI-Orsay, janvier 1999.
- [21] S. Atiyya, G.D. Hager, « Real-time vision-based robot localization », IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, n° 6, pp. 785-800, 1993.
- [22] K.S. Roh, W.H. Lee, I.S. Kweon, « Obstacle detection and self localization without camera calibration using projective invariants », IROS'97, pp. 1030-1035.
- [23] B. Marhic, E.M. Mouaddib, C. Pegard, N. Hutin, « Localization based on invariant-models recognition by SYCLOP », IROS'99, pp. 793-798.
- [24] E. Brassart, C. Pegard, M. Mouaddib, « Localization using infrared beacons », Robotica, Vol. 18, pp. 153-161, 2000.
- [25] M. Khalib, B. Bouilly, T. Simeon, R. Chatila, « Indoor navigation with uncertainty using sensor based motions », Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3379-3384, 1997.
- [26] H. Takeda, C. Facchinetti, J.-C. Latombe, « Planning the motions of mobile robot in a sensory uncertainty field », IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, n° 10, pp. 1002-1015, 1993.
- [27] A. Lambert, « Planification de tâches sûres pour robot mobile par prise en compte des incertitudes et utilisation des cartes locales », Thèse de doctorat, Université Technologique de Compiègne, 1998.
- [28] A. Pruski, S. Rohmer, « Robust path planning for non holonomic robots », Journal of Intelligent and Robotic Systems 18, pp. 329-350, 1997.
- [29] A. Courcelle, O. Horn, « Ultrasonic data representation: application to mobile robot localisation », IROS'98, Victoria, Canada, pp. 1559-1564, Oct. 98.
- [30] O. Horn, A. Courcelle, « Localisation statique d'un fauteuil électrique autonome », RAIRO-APII-JESA, Volume 31, n° 5/1997, pp. 867-878.
- [31] A. Courcelle, « Localisation d'un robot mobile : application à l'aide à la mobilité des personnes handicapées moteur », Thèse de doctorat de l'Université de Metz, janvier 2000.
- [32] G. Bourhis, O. Horn, Y. Agostini, « Location and high level planning for a powered wheelchair », Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 2629-2634, 1994.
- [33] M. Kreutner, « Localisation du VAHM : Estimation de l'orientation d'un fauteuil électrique autonome par vision monoculaire », Rapport de D.E.A. Institut National Polytechnique de Lorraine, septembre 1999.
- [34] R. Deriche, « Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector », International Journal of Computer Vision, Vol. 1, n° 2, pp. 167-187, 1987.
- [35] E. Krotkov, « Mobile Robot Localization Using a Single Image », Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, pp. 978-983, 1989.

Manuscrit reçu le 21 février 2000

### LES AUTEURS

#### Odile HORN



Odile Horn est diplômée de l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique (ENSEM) de Nancy et a obtenu son doctorat d'automatique en 1989 à l'INPL dans le domaine du traitement d'image. Puis ses travaux ont porté sur l'emploi des réseaux neuronaux pour la vision en tant que maître de conférences à l'École pour les Études et la Recherche en Informatique et Électronique (EERIE) à Nîmes en 1990-1991. Elle est actuellement maître de conférences à l'université de Metz et fait partie du Laboratoire d'Automatique des Systèmes Coopératifs. Ses travaux de recherche s'articulent autour du thème de la perception en robotique mobile.

#### Alain COURCELLE



Alain Courcelle est titulaire d'un DEA de production automatisée de l'université de NANCY I. Il a obtenu son doctorat en automatique en janvier 2000 à l'université de METZ au sein du Laboratoire d'Automatique des Systèmes Coopératifs. Ses domaines de recherche concernent la localisation des robots mobiles et en particulier le mode d'utilisation des capteurs à ultrasons dans ce domaine.

#### Michel KREUTNER



Michel Kreutner est titulaire d'un DEA d'automatique et traitement numérique du signal de l'Institut National Polytechnique de Lorraine depuis septembre 1999. Il prépare une thèse au Laboratoire d'Automatique des Systèmes Coopératifs de l'Université de Metz, ses travaux de recherche portent sur la vision pour la robotique mobile.