

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

THESE

Présentée par

SLIMANE Nouredine

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'ETAT DE L'UNIVERSITE DE BATNA

SPECIALITE : CONTROLE

Discipline : Robotique

SYSTEME DE LOCALISATION POUR ROBOTS MOBILES

Soutenue le : 23 / 11 / 2005 devant le jury composé de :

Dr. CHAHDI Mohamed	Pr. Université de Batna	Président
Dr. BENMAHAMMED Khier	Pr. Université de Sétif	Examineur
Dr. DJEGHABA Messaoud	Pr. Université d'Annaba	Examineur
Dr. LOUCHENE Ahmed	M.C. Université de Batna	Examineur
Dr. BOUGUECHAL N-Eddine	Pr. Université de Batna	Rapporteur

REMERCIEMENTS

Je voudrai tout d'abord remercier monsieur CHAHDI Mohamed, professeur à l'Université de Batna d'avoir accepter de présider mon jury de soutenance. Cette responsabilité, spontanément acceptée, démontre sa loyauté envers ses anciens collègues du département d'électronique et son attachement à leurs travaux.

Je remercie sincèrement monsieur BENMAHAMMED Khier, professeur à l'université de Sétif, pour avoir accepter de participer à ce jury de thèse en tant qu'examineur, malgré un emploi du temps chargé, et aussi pour les grandes qualités qu'il possède et qu'il a su conserver : dévouement, honnêteté et simplicité.

Je tiens à remercier monsieur DJEGHABA Messaoud, professeur à l'université d'Annaba, d'avoir bien voulu accepter de participer à ce jury de thèse en tant qu'examineur.

Je remercie également monsieur LOUCHENE Ahmed, maître de conférences à l'université de Batna, pour l'intérêt qu'il a montré pour mon travail et pour sa participation au jury.

J'exprime toute ma gratitude à monsieur BOUGUECHAL Nour-Eddine , mon directeur de thèse, pour m'avoir encadré durant ces quelques années et dont les commentaires ont permis l'amélioration substantielle du manuscrit original. Il a su guider efficacement mes travaux de recherche tout en me laissant une liberté très appréciable.

J'adresse mes remerciements à monsieur Etienne COLLE, Professeur à l'université d'Evry et Directeur du Laboratoire des Systèmes Complexes, qui m'a accueilli dans son laboratoire au sein duquel j'ai finalisé ma thèse.

Je ne peux citer toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de cette thèse ou simplement à l'ambiance qu'ils ont apportée ces dernières années, mais l'amitié des Docteurs OUNISSI Abdelhamid et BENYOUCEF Moussa, leur bonne humeur et leur disponibilité ont rendu ce travail agréable à réaliser au quotidien.

Enfin mes dernières pensées vont à l'ensemble des personnes de ma famille qui m'ont toujours encouragé à poursuivre cette voie et soutenu dans les moments difficiles, à mon père, à mes enfants et plus particulièrement à ma femme.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1. GENERALITES SUR LA ROBOTIQUE MOBILE	5
1. INTRODUCTION.....	5
1.1. Historique	5
1.2. Définition	6
2. PRESENTATION GENERALE DES ROBOTS MOBILES	6
3. CLASSIFICATION	6
4. APPLICATIONS.....	7
5. ARCHITECTURE DES ROBOTS MOBILES	8
5.1. La structure mécanique et la motricité	8
5.1.1. Les mobiles à roues	8
5.1.2. Les mobiles à chenilles	8
5.1.3. Les mobiles marcheurs.....	8
5.1.4. Les robots rampants	9
5.1.5. La motricité et l'énergie	9
5.2. Les organes de sécurité	9
5.3. Traitement des informations et gestion des taches	10
5.3.1. La navigation.....	10
5.3.2. La modélisation de l'espace.....	11
5.3.3. La planification de trajectoires.....	12
6. LES METHODES DE LOCALISATION	12
6.1. La localisation du mobile	12
6.1.1. La localisation relative ou à l'estime	13
6.1.1.1. L'odométrie.....	13
6.1.1.2. Les systèmes inertiels.....	13
6.1.2. La localisation absolue.....	13
6.1.2.1. Repères artificiels.....	14
6.1.2.1.1. Les balises	14

6.1.2.1.2. Le marquage de l'espace.....	14
6.1.2.2. Repères naturels	15
6.1.2.2.1. Exemples de méthodes utilisant des amers naturels	15
6.1.3. La localisation partielle.....	16
6.1.3.1. Le gyroscope	16
6.1.3.2. Le magnétomètre.....	16
6.1.4. Conclusion.....	16
6.2. La localisation de l'environnement.....	16
6.2.1. Les systèmes télémétriques	17
6.2.2. L'analyse d'images	17
6.2.3. La mise en correspondance	17
7. CONCLUSION	18
Chapitre 2. CAPTEURS UTILISES EN ROBOTIQUE MOBILE.....	19
1. INTRODUCTION.....	19
2. LES SYSTEMES DE PERCEPTION.....	20
3. GENERALITES SUR LES CAPTEURS	20
3.1. Définition d'un capteur	21
3.2. Classification des capteurs	21
4. DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS	21
4.1. Les capteurs internes	21
4.1.1. Les capteurs de déplacement.....	22
4.1.1.1. Les odomètres	22
4.1.1.2. Les accéléromètres	22
4.1.2. Les capteurs d'attitude	23
4.1.2.1. Les gyroscopes	23
4.1.2.2. Les gyromètres	23
4.1.2.3. Les gyrocompas	24
4.1.2.4. Le magnétomètre ou compas magnétique.....	24
4.1.3. Autres types de capteurs proprioceptifs	24
4.1.3.1. Capteurs à effet Doppler	24
4.1.3.2. Capteurs d'attitude : compas, inclinomètres	25

4.1.4. Conclusion.....	25
4.2. Les capteurs externes	25
4.2.1. Les capteurs télémétriques	26
4.2.1.1. Les capteurs laser	26
4.2.1.2. Les capteurs à infrarouge	27
4.2.1.3. Les capteurs à ultrasons	27
4.2.1.3.1. La réflexion de l'onde.....	27
4.2.1.3.2. La zone aveugle	29
4.2.2. Les systèmes de vision	30
4.2.2.1. La stéréovision	31
4.2.2.2. Les capteurs à triangulation active (lumière structurée).....	32
4.2.2.3. La vision omnidirectionnelle	32
4.2.3. Autres capteurs.....	33
5. LA COOPERATION MULTICAPTEURS	33
5.1. Combinaison d'une caméra et d'un faisceau lumineux	33
5.2. Combinaison de deux caméras.....	33
5.3. Combinaison de plusieurs capteurs à ultrasons	34
6. CONCLUSION	34
Chapitre 3. LES DIFFERENTES METHODES DE LOCALISATION.....	35
1. INTRODUCTION.....	35
1.1. Une définition de la localisation	35
1.2. Les deux grandes familles de systèmes de localisation	36
1.2.1. La localisation relative	36
1.2.2. La localisation absolue.....	36
1.2.3. Comparaison des deux familles	36
2. TECHNIQUES DE LOCALISATION	37
2.1. Localisation relative : l'odométrie	37
2.1.1. Modélisation des erreurs d'odométrie	38
2.1.2. Réduction des erreurs systématiques	39
2.2. Localisation par capteurs inertiels.....	40
2.2.1. Modélisation des termes de dérive.....	40
2.2.2. Conclusion.....	41
2.3. Localisation par corrélation entre images	41

2.4. Localisation absolue	41
2.4.1. Nature des repères	42
2.4.1.1. Repères actifs	42
2.4.1.2. Repères passifs	42
2.4.1.3. Comparaison	42
2.4.2. Types de mesure.....	42
2.4.2.1. La multilatération	43
2.4.2.2. La triangulation	44
3. METHODES DE NAVIGATION	44
3.1. Navigation à l'estime	44
3.1.1. Navigation par odométrie.....	44
3.1.2. Navigation inertielle.....	44
3.2. Localisation absolue sur balises	44
3.2.1. Localisation par trois balises	45
3.2.2. Localisation par deux balises	46
3.2.3. Localisation par une balise.....	47
3.2.4. Avantages et inconvénients de la localisation sur balises.....	48
3.3. Localisation absolue sur cartes de l'environnement	48
3.4. Localisation par analyse d'images vidéo	48
3.5. Localisation par système multicapteur.....	49
4. LOCALISATION ET MODELISATION SIMULTANEEES DE L'ENVIRONNEMENT	49
4.1. Les approches métriques	50
4.1.1. Les méthodes de modélisation géométriques	50
4.1.2. Les méthodes de modélisation basées sur les grilles d'occupation ..	51
4.2. Les approches topologiques	52
4.3. Remarques sur les méthodes de modélisation.....	53
5. CONCLUSION	53
6. TRAVAUX SUR LA LOCALISATION.....	54
6.1. La localisation relative : étude de l'odométrie.....	54
6.2. Travaux réalisés.....	55
6.3. La localisation globale	56
6.3.1. Introduction	56
6.3.2. Dispositif utilisé	57

6.3.3. Détermination de la position	57
6.3.4. Travaux réalisés	59
7. CONCLUSION	61
Chapitre 4. ALGORITHMES DE LOCALISATION	62
1. INTRODUCTION.....	62
2. LA FUSION MULTISENSORIELLE	62
2.1. Introduction	63
2.2. Etapes de la fusion.....	65
2.3. Modèles de fusion	66
2.4. Mise en correspondance de données	66
3. ESTIMATION DE LA POSITION D'UN ROBOT MOBILE PAR ODOMETRIE	66
3.1. Introduction	66
3.2. Détermination de la position par odométrie.....	67
3.3. Erreurs de localisation relative.....	69
4. ALGORITHME DE RECALAGE.....	70
4.1. Introduction	70
4.2. Présentation du système réel	71
4.3. Equation de mesures.....	73
4.4. Estimation de la position réelle	74
4.5. Présentation de l'algorithme de recalage	74
4.5.1. Le filtre de Kalman étendu.....	75
4.5.1.1. Phase de prédiction	76
4.5.1.2. Phase de mise en correspondance	76
4.5.1.3. Phase d'estimation	77
5. TRAVAUX DE SIMULATION ET RESULTATS	78
6. CONCLUSION	84
Chapitre 5. COMMANDE DES ROBOTS MOBILES	85
1. INTRODUCTION.....	85
2. CONTROLE DE DEPLACEMENTS DES ENGINS	85

2.1. Observabilité et observation en robotique mobile	85
2.2. Contrôle basé sur les modèles géométriques	86
2.2.1. Commande par analyse de Lyapunov	86
2.2.2. Commande par mode glissant	87
2.3. Contrôle basé sur les modèles dynamiques	88
3. CONTROLEUR DE NAVIGATION	88
3.1. Introduction	88
3.2. Etude théorique	89
3.2.1. Système continu	89
3.2.2. Système discret.....	90
3.3. Formulation du filtre de Kalman discret	91
3.4. Commande adaptative avec mode de glissement des servomoteurs.....	91
4. CONCEPTION DU CONTROLEUR DE NAVIGATION	93
5. RESULTATS DE SIMULATION ET CONCLUSION	94
CONCLUSION GENERALE.....	99
BIBLIOGRAPHIE.....	103

INTRODUCTION

Les robots mobiles sont largement utilisés dans les environnements industriels, le plus souvent pour des tâches répétitives en suivant un chemin bien défini matérialisé parfois par des lignes sur le sol ou par l'utilisation d'amers artificiels. Cependant actuellement il y'a une forte tendance à élargir les milieux où évoluent les robots à des environnements domestiques. Les types d'applications possibles sont innombrables. Cela peut aller des tâches de nettoyage et d'entretien, à une assistance à une personne handicapée dans des tâches d'exploration et de préhension. On parle alors, de façon générale, de robotique d'intérieur.

Un tel cadre d'utilisation requiert que le système robotisé dispose d'un niveau minimum d'autonomie et de facilités de navigation. Pour cela, le système doit obligatoirement accomplir trois tâches de base qui sont la localisation, la planification et la navigation. Il faut toute fois noter que les deux dernières tâches sont tributaires de la bonne exécution de la première.

En effet la localisation est l'une des fonctions essentielles qui permet aux robots mobiles de se mouvoir en respectant les règles élémentaires de sécurité et d'évoluer, de façon générale, vers une autonomie totale. C'est pourquoi, depuis l'origine des travaux entrepris en matière de robotique mobile, la localisation de l'engin dans son environnement a constitué une voie de recherche privilégiée qui conditionne les résultats expérimentaux et les applications en milieu industriel et/ou domestique. Elle consiste à calculer et à maintenir à jour la connaissance de la position et de l'orientation du robot dans un repère absolu lié à l'environnement. On se restreint dans notre travail au cas de systèmes navigant sur un plan.

Actuellement la localisation des robots mobiles est un thème de recherche ouvert puisque aucune méthode globale n'est susceptible de générer des algorithmes suffisamment robustes, rapides et fiables pour être appliqués à tous types de problèmes.

Dans notre travail concernant l'élaboration d'un système de localisation pour robots mobiles, nous abordons le problème d'un robot évoluant dans un environnement d'intérieur à priori partiellement connu. Pour réaliser la localisation du robot mobile dans de telles conditions, la première étape sera donc de le doter d'un moyen de perception de l'environnement et d'analyse de ces informations. Ce moyen de perception doit notamment être rapide, précis et permettant une étendue de mesure la plus vaste possible. De plus, il doit être d'un encombrement réduit pour pouvoir être facilement installé sur le robot mobile. Accroître les capacités de perception des robots permet d'augmenter leur autonomie ou encore d'assister l'homme dans des situations où cela améliore sa sécurité ou lui permet de percevoir ce que ses sens ne voient pas.

La performance du système de localisation final en terme de temps de calcul et de précision dépend donc de celle de chacune des étapes de calcul en ligne mais aussi du choix effectué quant au modèle des capteurs et à celui de l'environnement.

Le présent travail a pour but la mise en œuvre d'un système de localisation basé sur des capteurs à moindre coût utilisant des algorithmes de type récursifs. Le modèle de l'environnement est construit hors ligne. L'objectif du travail est d'optimiser chacune des étapes de traitement pour qu'elles répondent au mieux aux exigences du contexte. Les principaux apports sont d'une part l'adaptation de méthodes numériques de calcul des paramètres de localisation du robot mobile et d'autre part le développement d'une stratégie efficace de commande du robot lors d'un suivi de trajectoire, utilisant ces mêmes paramètres.

Le manuscrit est organisé comme suit :

Dans un premier temps, nous donnons quelques généralités concernant la robotique mobile en général ainsi que tous les points devant être abordés pour une meilleure compréhension de la navigation en robotique mobile. Ce chapitre commence par une étude des robots mobiles, de leur architecture et des différents concepts nécessaires au problème de la navigation. Nous présentons ensuite une introduction aux différentes méthodes de localisation permettant d'estimer la configuration d'un robot.

La première étape à considérer pour un robot mobile évoluant dans un environnement partiellement connu ou inconnu est la perception de son environnement de travail pour une meilleure localisation. Les capteurs disponibles pouvant être utilisés en robotique mobile sont de plus en plus perfectionnés : caméras, télémètres laser, GPS, ... Néanmoins, la localisation du robot mobile et la perception de l'environnement par un système devant réaliser une tâche complexe telle que saisie d'un objet par un manipulateur, ou contrôle du déplacement du véhicule en milieu encombré, reste un problème très difficile, d'autant plus si ce système de localisation et de perception doit satisfaire des contraintes temps réel (coût optimal) et doit rester le plus général possible afin de traiter d'environnements variés (intérieur ou naturel), évolutifs (scènes dynamiques), connus à priori ou inconnus. On aborde donc au chapitre deux cet aspect de notre étude qui permet d'évaluer les différentes approches qui ont été développées concernant la perception pour la localisation d'un robot mobile. Nous présentons, tant d'un point de vue théorique que d'un point de vue expérimental, les capteurs que nous avons choisis dans notre travail, après une description des différents capteurs pouvant être utilisés pour la perception environnementale. On peut dire déjà que les difficultés se situent à deux niveaux:

- d'une part au niveau sensoriel, afin d'extraire des données acquises par les capteurs, une information exploitable pour décrire la scène perçue au niveau géométrique (primitives surfaciques par exemple) ou photométrique (régions uniformes selon un critère de luminance, couleur,...).
- d'autre part, au niveau perceptuel, afin de réaliser une certaine fonction impliquant des connaissances et modèles liés à la tâche ou appris par fusion de plusieurs descriptions de scène : reconnaissance et localisation d'un objet ou construction incrémentale d'un modèle d'environnement.

Le chapitre trois présente les différentes méthodes de localisation pouvant être utilisées en robotique mobile. Elles sont amplement détaillées avec leurs avantages et inconvénients. Deux types de méthodes ont été considérées dans notre travail. La première classe présentée est dite locale. Elle repose sur un niveau d'abstraction très faible et utilise des données brutes; la position du robot est calculée de façon incrémentale, par cumul de déplacements élémentaires. Cette première méthode, appelée localisation relative, considère en fait la cinématique du robot pour évaluer sa position. Les positions produites par ces méthodes locales sont cependant sujettes à des dérives inexorables. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes de la seconde classe dite globale. Celles-ci permettent, dans certaines circonstances, de réduire la dérive des méthodes locales. Une méthode basée sur le calcul des distances robot-balises est présentée. Cette méthode repose sur l'utilisation de capteurs ultrasonores. Des résultats sont présentés et commentés. L'usage de ces méthodes est cependant limité pour des raisons liées essentiellement à la faible fiabilité du suivi de trajectoires et à l'imprécision dans les opérations d'accostage pour le robot mobile. Il est donc impératif d'adopter un principe de localisation absolue qui offre des résultats suffisamment fiables pour en permettre l'application la plus large.

Au chapitre quatre on aborde la dernière catégorie qui regroupe les méthodes absolues. Un modèle de fusion de données à travers un filtre de Kalman étendu est présenté. L'algorithme de recalage proposé utilise les informations odométriques et les informations délivrées par une caméra CCD panoramique. Une méthode de triangulation est utilisée pour l'estimation de pose du robot.

Dans le chapitre cinq, on analyse les problèmes posés par l'intégration des diverses méthodes à bord d'un robot dans le but de doter celui-ci d'un éventail de fonctionnalités, éventuellement redondantes. Une démonstration de navigation, réalisée grâce à un modèle de robot est détaillée. L'intégration a été réalisée à travers le formalisme du filtrage de Kalman et a abouti à la précision du cadre nécessaire aux fonctionnalités de localisation. Notamment, les problèmes du datage des données et de fusion des informations de position sont pris en compte. Durant l'exécution d'une tâche, un robot mobile est amené à interagir avec son environnement local. Cette interaction peut prendre différents aspects : actions de la part du robot sur son environnement (assemblage, manutention...), réactions vis-à-vis d'événements provenant de celui-ci (évitement d'obstacles, coopération avec d'autres systèmes automatisés...). Le contrôle de cette interaction entre le robot et son environnement local est indispensable tout au long de l'exécution d'une tâche. Elle doit se traduire par la prise en compte explicite d'informations perceptuelles d'une part dans la constitution de boucles de commande robustes (aspect continu) et d'autre part dans la détection des événements (perturbations par exemple) nécessitant une modification du comportement du système (aspect réactif). Dans les deux cas, il s'agit d'exploiter des données sensorielles pour adapter au mieux le comportement du système aux conditions de la tâche qu'il réalise. Le robot choisit ainsi lui même sa stratégie d'action en fonction de la tâche à réaliser et en fonction de son environnement. Pour accomplir cette opération, le robot doit être doté de capteurs permettant d'appréhender, en temps réel, son environnement. L'ensemble des informations perçues par les capteurs et relatives à l'environnement doit ensuite être analysé par le robot afin d'en déduire certaines valeurs prises comme modèle. Elles seront ensuite utilisées comme base de référence

dans l'évaluation de l'action à engendrer par le robot pour réaliser la tâche qui lui est spécifiée. Pour cela, on propose un contrôleur de navigation à commande adaptative avec mode de glissement qui utilise les informations de localisation pour réagir aux différentes perturbations apparaissant lors de l'évolution du robot dans son environnement. Ce contrôleur synthétise en temps réel les signaux de commande adéquats qui agissent sur les actionneurs (servomoteurs). Des résultats de simulation sous l'environnement MATLAB-Simulink d'un suivi de trajectoires, utilisant les paramètres de localisation, d'un robot mobile en temps réel sous différentes conditions d'évolution sont présentés dans ce chapitre.

On termine notre travail par une conclusion et des perspectives futures.

C HAPITRE 1

Généralités sur la robotique mobile

1. INTRODUCTION

1.1. Historique

Le concept de robot mobile autonome est apparu vers la fin des années soixante, de deux sources totalement différentes : tout d'abord des recherches menées au *Stanford Research Institute* sur les possibilités d'équiper des machines de capacités de déduction et de réaction logique à des événements extérieurs. On a ainsi construit Shakey, machine à roues reliée à un ordinateur et équipée d'une caméra lui permettant d'acquérir des images de son environnement. Elle évolue dans un univers de cubes et de pyramides de tailles et de couleurs différentes. Shakey a pour mission de prendre un objet et de le porter ailleurs, quelque soit sa position ; chaque mission dure près de cinquante minutes.

D'autre part, l'industrie nucléaire a besoin de machines permettant d'agir à distance dans des environnements encombrés et inaccessibles à l'homme. L'entreprise américaine *Général Electric* développe alors un quadrupède pour essayer de résoudre ce problème, tandis que les projets Luna et Mars Rover s'échafaudent dans le but d'explorer des planètes sans que l'homme ne prenne part au voyage.

Pendant plusieurs années, laboratoires, industriels, informaticiens et mécaniciens vont continuer leurs travaux en parallèle. On accède ainsi côté industriel à la télé-opération et à une partie de la robotique classique, tandis que du côté informatique, on assiste à de grands progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle. Ainsi, vers la fin des années soixante-dix, trois pôles géographiques principaux se distinguent (France, Japon, Etats-Unis). La synthèse de tous les travaux réalisés jusqu'alors donne enfin naissance aux robots mobiles autonomes (du robot domestique au robot militaire).

L'industrie de production, les sociétés d'exploitation minière, les expéditions de recherche sous-marine... Les domaines d'utilisation de robots autonomes sont très variés, allant de la production en chaîne dans une usine de voitures à l'exploration d'autres planètes, comme c'est le cas avec Mars Pathfinder, robot mobile autonome d'exploration de la planète Mars.

C'est dans cet environnement de plus en plus automatisé que se fait sentir le besoin d'outils capables, non seulement d'effectuer des tâches répétitives ou encore impossibles à l'homme (porter des charges lourdes, découpage ultra précis, ...), mais aussi de manifester une certaine autonomie de déplacement dans des milieux hostiles à l'homme. On en voit désormais les

applications sur des chantiers tels que le désamiantage d'immeubles, la décontamination radioactive, les expériences en milieu dangereux... Aussi a-t-on besoin de robots mobiles autonomes capables de se déplacer d'un point à un autre sur une simple demande de l'utilisateur, qui n'a ainsi plus besoin d'être un expert en pilotage. Le meilleur exemple de planification complexe de la trajectoire est fourni par les drones, ces robots volants destinés aussi bien à l'espionnage militaire qu'aux études botaniques nécessitant des prises de vues aériennes.

1.2. Définition

Etymologiquement, le mot robot vient du tchèque *robota* qui signifie travail ; il désigne un système automatique asservi à une unité de commande informatisée. Un robot est un ensemble de mobiles associés dont les mouvements sont commandés numériquement et synchronisés. Chaque mouvement élémentaire est un axe de commande numérique. Cependant un robot n'est qu'une machine programmable qui ne fait qu'exécuter ce que l'homme lui a appris.

2. PRESENTATION GENERALE DES ROBOTS MOBILES

Les robots mobiles ont une place particulière en robotique. Leur intérêt réside dans leur mobilité qui ouvre des applications dans de nombreux domaines. Comme les robots manipulateurs, ils sont destinés à assister l'homme dans les tâches pénibles (transport de charges lourdes), monotones ou en ambiance hostile (nucléaire, marine, spatiale, lutte contre l'incendie, surveillance...).

L'aspect particulier de la mobilité impose une complexité technologique et méthodologique qui s'ajoute en général aux problèmes rencontrés par les robots manipulateurs. La résolution de ces problèmes passe par l'emploi de toutes les ressources disponibles tant au niveau technologique (capteurs, motricité, énergie) qu'à celui du traitement des informations par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle ou de processeurs particuliers (vectoriel, cellulaires).

L'autonomie du robot mobile est une faculté qui lui permet de s'adapter ou de prendre une décision dans le but de réaliser une tâche malgré un manque d'informations préliminaires ou éventuellement erronées. Dans d'autres cas d'utilisation, comme celui des véhicules d'exploration de planètes, l'autonomie est un point fondamental puisque la télécommande est alors impossible par le fait de la durée du temps de transmission des informations.

3. CLASSIFICATION

Une classification est proposée dans la littérature qui définit le degré d'autonomie du robot mobile.

- Véhicule télécommandé par un opérateur qui lui impose chaque tâche élémentaire à réaliser.
- Véhicule télécommandé au sens de la tâche à réaliser. Le véhicule contrôle automatiquement ses actions.
- Véhicule semi-autonome réalisant sans l'aide de l'opérateur des tâches prédéfinies.

- Véhicule autonome qui réalise des tâches semi-définies. Ce type de véhicule pose des problèmes d'un niveau de complexité élevé de représentation des connaissances, de capacité décisionnelle et de génération de plans qui sont résolus à bord dans la mesure du possible.

L'ensemble des problèmes particuliers liés à la conception de tels robots sont :

- La conception mécanique liée à la mobilité
- La détermination de la position et de la latitude (orientation)
- La détermination du chemin optimal pour atteindre le lieu de la tâche.

4. APPLICATIONS

Le tableau ci-après résume de manière non exhaustive les diverses applications des robots mobiles.

Industrie nucléaire	- surveillance de sites - manipulation de matériaux radio-actifs - démantèlement de centrales
Sécurité civile	- neutralisation d'activité terroriste - déminage - pose d'explosif - surveillance de munitions
Militaire	- surveillance, patrouille - pose d'explosifs - manipulation de munitions
Chimique	- surveillance de site - manipulation de matériaux toxiques
Médecine	- assistance d'urgence - aide aux handicapés physiques, aux aveugles
Lutte contre l'incendie	- localisation d'une source d'incendie - détection de fumée - suppression de flammes
Sous-marine	- pose de câbles - recherche de nodules - recherche de navires immergés - inspection des fonds marins
Agricole	- cueillette de fruits - traite, moisson, traitement des vignes...
Construction BTP	- projection mortier - lissage du béton
Nettoyage	- coque de navire - nettoyage industriel
Espace	- exploration
Industriel	- convoyage - surveillance

Tableau 1-1 : Applications des robots mobiles

5. ARCHITECTURE DES ROBOTS MOBILES

L'architecture des robots mobiles se structure en quatre éléments :

- La structure mécanique et la motricité
- Les organes de sécurité
- Le système de traitement des informations et gestion des tâches.
- Le système de localisation.

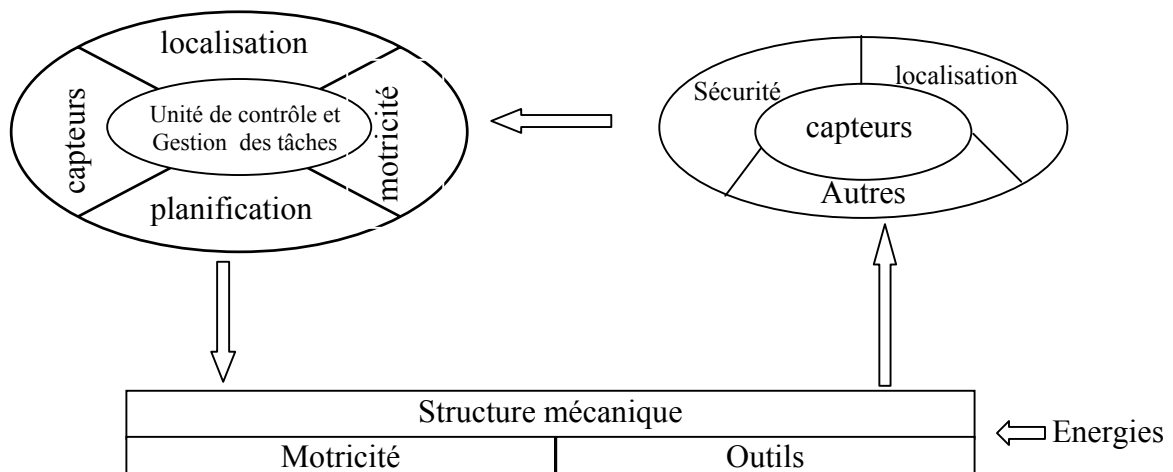


Figure 1-1 : Architecture d'un robot mobile

5.1. La structure mécanique et la motricité

On peut dénombrer quatre types de structures mécaniques assurant la motricité.

5.1.1. Les mobiles à roues

La mobilité par roues est la structure mécanique la plus communément appliquée. Cette technique assure selon l'agencement et les dimensions des roues un déplacement dans toutes les directions avec une accélération et une vitesse importante. Le franchissement d'obstacles ou l'escalade de marches d'escalier est possible dans une certaine mesure. Toutes les configurations (nombre, agencement, fonction) des roues sont appliquées.

5.1.2. Les mobiles à chenilles

L'utilisation des chenilles présente l'avantage d'une bonne adhérence au sol et d'une faculté de franchissement d'obstacles. L'utilisation est orientée vers l'emploi sur sol accidenté ou de mauvaise qualité au niveau de l'adhérence (présence de boue, herbe...).

5.1.3. Les mobiles marcheurs

Les robots mobiles marcheurs sont destinés à réaliser des tâches variées dont l'accès au site est difficile, dangereux ou impossible à l'homme. Leur anatomie à nombreux degrés de liberté permet un rapprochement avec les robots manipulateurs. La locomotion est commandée en

termes de coordonnées articulaires. Les méthodes de commande des articulations définissent le concept d'allure qui assure le déplacement stable de l'ensemble. Les différentes techniques étudiées se rapprochent de la marche des animaux et notamment de celle des insectes.

L'adaptation au support est un problème spécifique aux marcheurs. Il consiste à choisir le meilleur emplacement de contact en alliant l'avance et la stabilité avec l'aide de capteurs de proximité, de contact ou de vision.

5.1.4. Les robots rampants

La reptation est une solution de locomotion pour un environnement de type tunnel qui conduit à réaliser des structures filiformes.

Le système est composé d'un ensemble de modules ayant chacun plusieurs mobilités. Les techniques utilisées découlent des méthodes de locomotion des animaux.

- Le type scolopendre constitue une structure inextensible articulée selon deux axes orthogonaux.
- Le type lombric comprend trois articulations, deux rotations orthogonales et une translation dans le sens du mouvement principal.
- Le type péristaltique consiste à réaliser un déplacement relatif d'un module par rapport aux voisins.

5.1.5. La motricité et l'énergie

Les déplacements des robots sont réalisés par des moteurs de types électrique, thermique ou hydraulique.

L'énergie électrique la plus fréquemment employée offre l'avantage d'une commande aisée. Par contre le transport et la génération présentent des difficultés. Plusieurs méthodes sont employées :

- Par batteries qui sont soit rechargées périodiquement de manière automatique ou manuelle, soit par un échange avec d'autres lorsqu'elles sont déchargées.
- Par groupe électrogène embarqué dont l'inconvénient constitue la masse élevée. L'énergie de base est alors thermique.
- Par cordon ombilical qui réduit l'autonomie du robot.

L'énergie thermique est essentiellement employée par des véhicules de forte puissance comme énergie de base pour la traction ou pour activer un compresseur hydraulique.

5.2. Les organes de sécurité

Un robot, selon la tâche qui lui est confiée, peut être amené à travailler au voisinage du personnel. A ce titre, il est obligatoire qu'il soit doté d'organes garantissant la sécurité. Des capteurs sont disponibles tout autour du mobile afin de détecter un obstacle sur un domaine le plus étendu possible. Deux types de capteurs sont employés : les capteurs proximétriques assurant la détection avant collision (ultra-son, hyper fréquence, infrarouge...) et les capteurs de contact détectant une collision ou un choc avec l'environnement (contact électrique sur pare-chocs, résistance variable, fibre optique...). Ce sont des dispositifs redondants par rapport aux capteurs précédents. L'organisation de la sécurité est représentée sur le schéma de la figure 1-2.

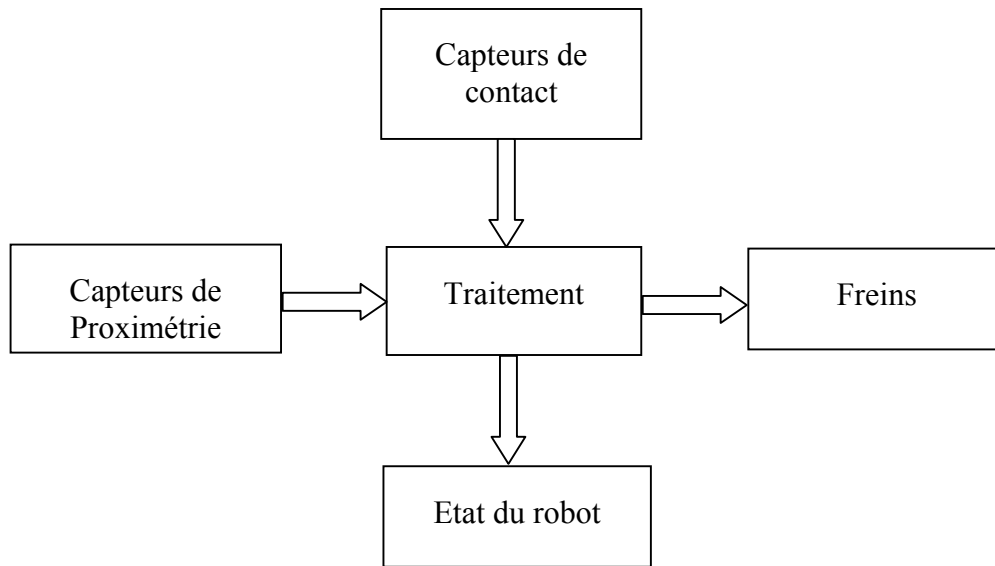


Figure 1-2 : Synoptique de la sécurité

Il comporte également un système de vérification permanente de l'état de fonctionnement des autres organes.

Le traitement de la détection s'effectue selon plusieurs cas. Si le capteur à contact est sollicité, le robot s'immobilise soit définitivement soit tant que le contact persiste, ou il effectue un mouvement opposé au contact. Par contre si un proximateur détecte une présence, la stratégie consiste soit à immobiliser le robot en attendant que la personne s'éloigne, soit à ralentir le mouvement si la personne n'est pas trop proche, soit à choisir un autre chemin qui l'éloigne de la personne.

5.3. Traitement des informations et gestion des tâches

L'ensemble de traitement des informations et gestion des tâches constitue le module information central qui établit les commandes permettant au mobile de réaliser un déplacement et d'activer les divers organes en accord avec l'objectif. Nous nous limiterons au problème de génération de plan qui consiste à établir la manière dont le robot se déplace par rapport à des connaissances à priori (statiques) ou obtenues en cours d'évolution (dynamiques).

La génération de plan repose sur trois concepts :

- La stratégie de navigation
- La modélisation de l'espace
- La planification.

5.3.1. La navigation

La navigation est une étape très importante en robotique mobile [Ell96]. Bien entreprise, elle permet une large autonomie à un robot mobile. Le système de navigation comporte plusieurs modules qui peuvent être traités différemment et parmi lesquels on distingue celui de la localisation et celui de l'évitement d'obstacles. Un modèle de navigation utilisant des amers est présenté dans [Bec95]. Dans notre travail, on s'intéresse plutôt à la localisation. On a choisi de

réaliser un système de localisation permettant au robot de se mouvoir de manière autonome (sans intervention humaine) dans un milieu plan partiellement connu. Cette étude d'un cas simple de robotique fera ressortir les difficultés posées par la mise au point de mécanismes d'automatisation nettement plus sophistiqués, à savoir : le choix des capteurs, leur positionnement et la localisation du mobile [Had98], [Ant01]. La détection et l'évitement des obstacles [Ohy97] est l'étape fondamentale de l'évolution d'un robot en territoire inconnu [Ein97]. On dispose à cet effet de plusieurs types de capteurs : caméras [Xi96]; un programme d'analyse des images étant alors nécessaire, capteurs laser [Mar84], capteurs infrarouge et capteurs à ultrasons [Bla95], [Yen96].

On utilise en général un capteur à ultrasons qui permet de renseigner sur la présence d'un obstacle sur le chemin d'évolution.

Une fois les obstacles repérés, le robot peut effectuer plusieurs actions, par exemple : cartographier le site sur lequel il évolue [Gui00], [Bor02], vérifier si sa distance à l'obstacle est supérieure ou non à une distance limite, et dans le cas contraire, éviter l'obstacle [Hua96]. Un exemple d'évitement d'obstacles est présenté sur la figure 1-3.

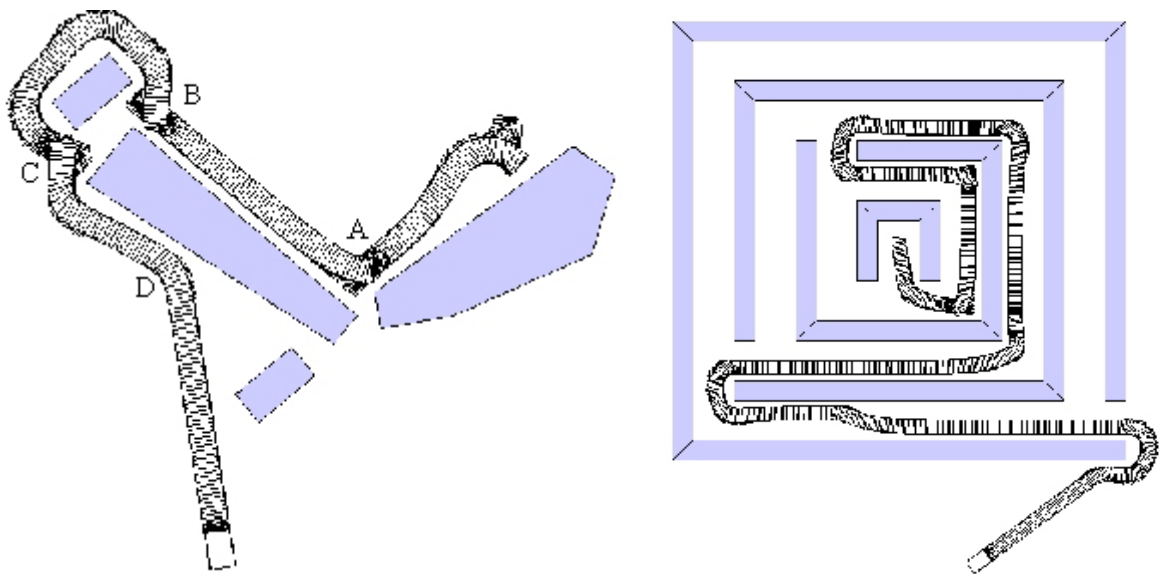


Figure 1-3 : Navigation de robot mobile en environnement encombré

5.3.2. La modélisation de l'environnement

La connaissance du milieu dans lequel évolue le robot mobile n'est établie en général qu'après avoir effectué une campagne de mesure de l'ensemble des éléments constituant l'environnement [Raf94]. Cette procédure fastidieuse peut être évitée si le robot construit lui-même son modèle d'environnement de manière dynamique [Cha85]. Par contre, la planification de trajectoire n'est

pas utilisable tant que le robot ne dispose pas d'un modèle de l'espace d'évolution ce qui handicape très fortement l'utilisation du robot. A partir de cette base d'informations et d'une loi évaluant les erreurs de représentation, le planificateur peut générer des sous-trajectoires faisables dans certaines parties et modifier les sous-trajectoires dans d'autres parties à l'aide des informations locales issues de la mesure des capteurs d'environnement. Lors de l'exécution d'une trajectoire, le robot acquiert des informations qui vont permettre de reconstituer le plus fidèlement possible le modèle de l'environnement de manière récursive à l'aide d'un algorithme approprié.

5.3.3. La planification de trajectoire

On voit ainsi au travers de cette première approche assez théorique apparaître un problème essentiel : *la planification de la trajectoire*. Différentes approches sont envisageables selon que le robot évolue en milieu connu ou inconnu :

- L'évolution en territoire cartographié simplifie évidemment la tâche des concepteurs : une fois la carte de la zone d'évolution rentrée dans la mémoire d'un ordinateur communiquant avec le robot ou bien dans une mémoire intégrée au robot lui-même [Her96], des algorithmes de routage permettent de diriger le robot.

- Il en va tout autrement dans le cas de l'évolution en territoire inconnu. Le robot doit alors analyser son environnement au moyen de différents capteurs, détecter sa position par rapport à son but, et décider de sa trajectoire [Lam96]. Cette localisation peut s'effectuer par différentes méthodes : triangulation de signaux émis par des balises déposées au cours du déplacement ou/et repérage d'obstacles à distance et construction d'une carte du site, mesures odométriques et estimation de la position [Bul96].

On applique ensuite des algorithmes complexes pour diriger le robot [Bri96]. Ceux-ci peuvent amener des résultats plus ou moins heureux, le principal problème étant la non-convergence de certaines boucles de déplacement [Lau01]. Si aucun algorithme de secours n'a été prévu, l'intervention humaine est alors nécessaire.

6. LES METHODES DE LOCALISATION

La localisation instantanée est un des points les plus importants et les plus délicats des robots mobiles. Elle permet de définir le positionnement :

- Du mobile dans l'environnement.
- D'éléments particuliers de l'environnement par rapport au mobile.

6.1. La localisation du mobile

La localisation consiste à définir la position en termes de coordonnées d'un point du mobile par rapport à un référentiel de base. Les techniques employées sont de deux types :

- La localisation relative, basée sur l'utilisation de capteurs proprioceptifs.
- La localisation absolue, basée sur l'utilisation de capteurs extéroceptifs.

L'attitude (angle) d'un axe du mobile avec une direction fixée constitue une seconde information sur la localisation.

6.1.1. La localisation relative ou à l'estime

La localisation relative ou localisation à l'estime consiste à évaluer la position, l'orientation, et éventuellement la vitesse du robot mobile par intégration des informations fournies par des capteurs dits proprioceptifs. L'intégration se fait par rapport au point de départ du robot. Ces données peuvent être des informations de déplacement (odomètre), de vitesse (vélocimétrie) ou d'accélération (accéléromètre). Ces systèmes permettent d'obtenir un flux relativement important au niveau de l'obtention des estimations de position. Cette caractéristique intéressante a favorisé l'utilisation de ces systèmes de localisation en robotique mobile. L'inconvénient de ces méthodes par intégration réside dans l'accumulation des erreurs de mesure et de calcul. Une telle technique n'est en général pas utilisée seule.

6.1.1.1. L'odométrie

La technique de l'odométrie est la plus utilisée pour la localisation des robots mobiles à roues. Elle permet de déterminer la position et le cap d'un véhicule par intégration de ses déplacements élémentaires, et ce, par rapport à un repère lié à sa configuration initiale. L'algorithme de localisation est basé sur le comptage des impulsions générées par des codeurs durant une période d'échantillonnage connue. Les avantages de l'odométrie résident dans sa simplicité de mise en œuvre et dans son coût faible : ces caractéristiques en font un système de localisation couramment utilisé en robotique mobile. L'inconvénient est une précision très médiocre sur des distances importantes, ce à cause des erreurs cumulatives. Une étude intéressante d'intégration poussée de l'odométrie a été réalisée par Borenstein dans [Bore96b]. Il y propose une méthode originale IPEC (Internal Position Error Correction), permettant d'obtenir une estimation odométrique fiable sans avoir recours à un système de localisation absolue ou à un système de navigation inertielle.

6.1.1.2. Les systèmes inertiels

La mesure des accélérations ou des vitesses (angulaires et linéaires) permet, par intégration, de déterminer la position et l'attitude. La vélocimétrie est une méthode qui consiste à mesurer directement la vitesse du véhicule et à l'intégrer pour obtenir le déplacement. La vitesse de rotation instantanée, dans la majorité des cas, est obtenue avec des gyromètres. La vitesse linéaire est quant à elle généralement obtenue par l'utilisation d'un radar Doppler dirigé vers le sol. Les méthodes de localisation inertielle utilisent aussi les informations d'accélération suivant des axes prédéterminés ; le calcul de la position est effectué alors par double intégration de ces informations. Le coût de ces systèmes et la divergence des calculs due à l'accumulation des erreurs rendent ces systèmes peu attractifs en robotique mobile. Ils interviennent notamment pour enrichir des informations issues d'autres techniques de mesure.

6.1.2. La localisation absolue

La localisation absolue est une technique qui permet à un robot de se repérer directement dans son milieu d'évolution, que ce soit en environnement extérieur (mer, terre, espace), ou en environnement intérieur (ateliers, immeubles, centrales nucléaires....). Ces méthodes de localisation sont basées sur l'utilisation de capteurs extéroceptifs. Elles assurent la mesure de la position et de l'orientation du mobile à tout instant. Ces méthodes sont nombreuses et variées

[Dev92], [Ald94] et [Hua97]. Dans certains cas, leur emploi nécessite des contraintes qui ne sont pas toujours compatibles avec la mobilité du robot.

Pour répondre à la problématique qu'est la localisation d'un robot dans son environnement, deux types de stratégies sont utilisables :

- ✓ La première consiste à utiliser des points de repère naturels
- ✓ La deuxième à utiliser des points de repères artificiels.

Il est à noter que quelque soit le cas de figure, la localisation absolue nécessite toujours une représentation de l'environnement. Le robot possède donc une banque de données regroupant les caractéristiques des références externes qui est appelée carte de l'environnement.

6.1.2.1. Repères artificiels

6.1.2.1.1. Les balises

Les repères artificiels sont des balises caractéristiques qui sont ajoutées au milieu d'évolution du robot et dont les positions sont connues. L'inconvénient de ce type de techniques réside essentiellement dans son manque de souplesse et dans sa lourdeur d'utilisation. En effet un domaine d'évolution vaste nécessitera un investissement lourd en équipement. En outre tout changement de configuration de l'environnement impliquera une remise en cause du réseau de balises. En revanche cette technique a le gros avantage d'être précise, robuste et surtout de satisfaire la contrainte temps réel. Le principe consiste à émettre un ou plusieurs signaux (lumineux, électromagnétique ou acoustique) de une ou plusieurs balises simultanément afin d'en déduire des caractéristiques géométriques permettant le calcul de la localisation. Deux types de balises sont à considérer :

- Les balises actives qui génèrent un signal ou qui le traitent. Elles sont généralement interactives avec le système de perception de l'engin mobile puisque ce sont elles qui émettent l'onde captée par l'équipement de mesure. Les deux principaux types d'organes de transmission utilisés sont les émetteurs de sources lumineuses et les antennes émettrices hyperfréquences. Ces ondes peuvent être émises en continu ou être déclenchées par ordre provenant de l'équipement embarqué sur le mobile.
- Les balises passives qui réfléchissent le signal. On appelle balises passives des repères artificiels n'échangeant pas de signaux avec le système de perception. Comme précédemment ce type de méthode est basé sur le repérage de balises artificielles placées à des positions connues dans le milieu d'évolution du robot. La différence se situe au niveau de l'identification de la balise qui doit être faite par le système de perception. Ainsi le problème de la mise en correspondance est généralement facilité par un codage au niveau du marquage de la balise. Ces systèmes ont l'avantage d'être moins lourds à installer que les systèmes précédents.

6.1.2.1.2. Le marquage de l'espace

La technique du marquage consiste à disséminer sur l'environnement (sol, mur, plafond...) des marques permettant de donner au mobile des informations assurant l'aide au guidage. Ces informations sont souvent corrélées avec une carte de l'environnement.

✓ **Le marquage continu**

- Les chariots filoguidés
- Les peintures réfléchissantes

✓ **Les marques discrètes**

- les points lumineux
- un point rétro – réflecteur
- les marques codées.

Il est à noter que le point commun de toutes ces méthodes est le calcul de la configuration du robot basée systématiquement sur une des deux méthodes :

- la multilatération (triangulation par télémétrie)
- la triangulation (triangulation par goniométrie)

6.1.2.2. Repères naturels

Cette technique consiste à utiliser les éléments caractéristiques de l'environnement pour estimer la position du robot. L'intérêt de cette méthode est donc sa souplesse d'utilisation puisqu'elle ne nécessite pas d'aménager le milieu d'évolution du robot. Pour la problématique de la localisation, une connaissance de l'environnement sera nécessaire. Il s'agira d'une représentation cartographique qui intégrera la position des amers qui serviront à localiser le robot. Suivant le niveau sémantique adopté pour décrire l'environnement, plusieurs types de représentations cartographiques pourront être gérés. Ces types seront détaillés ultérieurement au chapitre trois dans la section qui concerne la génération incrémentale de carte.

La fonction localisation peut se décliner en deux étapes :

- ✓ la construction du modèle sensoriel. Elle consiste à conditionner les mesures capteur.
- ✓ La mise en correspondance de ce modèle avec la carte de l'environnement. Elle consiste à apparier les observations avec des primitives cartographiques. Il s'agit là de l'étape prépondérante permettant d'estimer la configuration du robot.

6.1.2.2.1. Exemples de méthodes de localisation utilisant des amers naturels

Nous pouvons regrouper les systèmes de navigation utilisant des amers naturels par rapport aux capteurs extéroceptifs utilisés. Les méthodes de localisation basées sur l'utilisation de télémètre consiste généralement, après segmentation, à effectuer une mise en correspondance par rapport aux parois de l'environnement. Les précurseurs par rapport à ce type d'approche sont Drumheller [Dru87] et Crowley [Cro89] qui utilisent des capteurs à ultrasons. De nombreuses extensions ont été données à ces travaux, comme par exemple [Sab94] où une caractérisation des paramètres géométriques de balises naturelles de type parois ou arêtes permet de localiser le robot. Citons enfin les travaux de Durieu [Dur96] qui propose une méthode de localisation à erreur bornée qui utilise des données ultrasonores.

La télémétrie laser, plus précise que celle à ultrasons, est très souvent utilisée et permet de rendre plus robuste la phase de mise en correspondance. Ainsi l'appariement de segments laser avec ceux répertoriés au sein d'une carte de l'environnement est géré dans [Gui95] pour la localisation absolue d'un robot dans son environnement.

Enfin les systèmes de vision, qu'ils soient monoculaires, omnidirectionnels ou stéréoscopiques, par la densité et la pertinence des informations sensorielles qu'ils fournissent, sont eux aussi fréquemment utilisés pour la localisation absolue. Le principe général sera alors de mettre en correspondance des points d'intérêt extraits de l'image tels que des droites radiales [Wal97], des droites horizontales [Arr00], des coins [Has92], des balises naturelles. Une mise en correspondance directe de zones d'intérêt de l'image peut être aussi gérée, comme dans [Mal01] par une minimisation d'une distance entre une image 3D locale et le modèle.

6.1.3. La localisation partielle

Le gyroscope et le magnétomètre sont deux systèmes qui assurent l'évolution de l'attitude du mobile par rapport à une référence.

6.1.3.1. Le gyroscope

Le gyroscope est constitué d'un solide en rotation autour d'un point fixe. Seuls interviennent des moments puisque la résultante des forces est nulle. On montre que les variations du moment cinétique sont colinéaires au moment résultant de toutes les forces extérieures appliquées, ce qui implique que l'axe de rotation conserve sa position si aucune force extérieure ne lui est appliquée. L'hypothèse des forces intérieures nulles est difficilement applicable dans le cas réel. Les frottements notamment induisent des moments parasites qui entraînent une dérive inévitable. Des systèmes très sophistiqués avec des réductions de frottements sont utilisés notamment sur les avions mais leur coût est trop élevé pour une utilisation rationnelle en robotique mobile. Les gyroscopes les plus abordables ont une dérive d'une dizaine de degrés par heure.

6.1.3.2. Le magnétomètre

Un magnétomètre est un système qui mesure le champ magnétique terrestre pour servir de référence angulaire d'une orientation. Il est sensible à l'environnement. Une masse métallique au voisinage a pour effet de modifier le champ magnétique local. Des méthodes de compensation permettent de limiter les influences notamment celles dues au mobile lui-même.

6.1.4. Conclusion

Comme nous pouvons le constater, il existe de nombreuses méthodes de localisation du mobile. Aucune n'est actuellement universelle. Le choix de la technique est dicté par le type de tâche à réaliser.

6.2. La localisation de l'environnement

La localisation de l'environnement présente un intérêt sur plusieurs plans :

- Aide à la navigation pour la détermination de la présence d'obstacles sur une trajectoire prédéfinie.
- Détermination de la localisation du mobile par corrélation entre des caractéristiques de l'environnement et une carte mémorisée.
- Reconnaissance des lieux lors d'un apprentissage.

Plusieurs techniques sont employées :

- Extraction de la profondeur ou distance de l'environnement par rapport au mobile soit par un système télémétrique soit par stéréoscopie.
- Extraction de caractéristiques particulières liées à l'environnement (ex :couleurs, formes...)
- Utilisation de technique par contact direct.

6.2.1. Les systèmes télémétriques

Les systèmes employés le plus fréquemment sont du type télémétrique. Son principe, développé dans le chapitre deux, consiste soit à mesurer le temps de vol ou le déphasage d'une onde (acoustique ou optique) soit à appliquer une méthode de triangulation.

6.2.2. L'analyse d'images

La détermination des paramètres particuliers s'effectue par l'analyse d'une ou plusieurs images. La stéréoscopie notamment assure la détermination de l'information de profondeur (ou distance) de l'environnement. Les caractéristiques de forme (ex : droites représentant les bords d'une route) de couleur ou texture sont également employées. Ces informations assurent la détermination locale de l'environnement.

6.2.3. La mise en correspondance

La robustesse de la phase de localisation dépend de celle de mise en correspondance. Elle consiste à appairer les observations issues du ou des capteurs avec les éléments de la carte de l'environnement. En raison de son aspect combinatoire, c'est un problème complexe à résoudre et généralement coûteux en temps de calcul. On cherche donc à mettre en correspondance des primitives singulières ou des groupements de primitives (modèles) de l'environnement avec une image de celui-ci. Dans ce cadre, le terme image est à considérer au sens large ; c'est une représentation sensorielle de l'environnement issue d'un capteur. Plusieurs méthodes sont utilisées, parmi lesquelles on peut citer :

- ✓ Les méthodes de prédiction et vérifications qui consistent dans un premier temps à générer des hypothèses d'appariement, ce par rapport à un historique sur les observations ou par rapport à des contraintes relatives à l'environnement. Dans un deuxième temps, ces hypothèses sont infirmées ou confirmées par une vérification des hypothèses par rapport aux observations. Dans ce cas l'odométrie permet de fournir une prédiction à partir de laquelle il est possible de générer un vecteur prédictif qui sera ensuite vérifié à l'aide des observations. [Lev97] et [Dur95]
- ✓ Les méthodes basées sur les arbres de recherches. Le principe de la recherche dans un arbre d'interprétation nécessite dans un premier temps la construction d'un arbre représentant l'ensemble des appariements possibles entre les primitives du modèle et celles détectées dans l'image. La seconde étape consiste alors à trouver le chemin optimal en profondeur dans cet arbre en déterminant à chaque niveau un appariement entre primitives en utilisant des contraintes ou des fonctions de coût [Bai00]. L'utilisation de ces facteurs

discriminants est justifiée afin de limiter le caractère combinatoire de cette technique. Un des précurseurs ayant utilisé cette approche pour la localisation est Drumheller [Dru87].

- ✓ Les méthodes utilisant les invariants géométriques. Ces méthodes caractérisent certaines configurations géométriques de primitives par une quantité qui reste inchangée aux points de vue et aux projections. Les valeurs de ces quantités, les invariants, sont directement utilisées pour effectuer la mise en correspondance. Ce type de méthode de mise en correspondance est utilisé dans de nombreux travaux sur la localisation, comme par exemple dans [Sch96], [Roh97] et [Tso98].

7. CONCLUSION

Les deux grandes familles de méthodes de localisation, relative et absolue, possèdent chacune des avantages et des inconvénients. C'est pour cette raison qu'une grande partie des systèmes de navigation intègre les deux solutions pour donner lieu à des algorithmes de recalage de l'estimation odométrique par l'estimation absolue. Là encore parmi toutes les méthodes décrites, un système de localisation se démarque par rapport aux contraintes de robustesse, de précision et de gestion temps réel imposées par la navigation des engins mobiles : il s'agit de celles basées sur le repérage de balises artificielles. Néanmoins, le manque de flexibilité de ces méthodes est un inconvénient relativement lourd. Une solution pouvant être dégagée consiste à développer des méthodes de localisation qui se basent sur des amers naturels « les plus observables possibles ».

Dans toutes les méthodes des sections précédentes, celles qui utilisent des repères artificiels supposent que ces repères sont déjà installés dans l'espace de travail. Cependant, si l'on désire pouvoir utiliser ces repères pour la localisation en tout point de l'espace de travail et si l'on veut minimiser le nombre de balises utilisées, leur placement est un problème compliqué. Une méthode optimale de positionnement de balises artificielles est décrite dans [Tas95]. Pradalier dans [Pra01] a aussi défini une méthodologie permettant un placement optimal des amers dans l'espace de travail afin d'assurer les capacités de localisation dans la majeure partie de l'espace des configurations et cela en proposant de résoudre le problème du placement dans un polygone simple puis de répliquer ce polygone simple sur tout l'espace de travail.

Ainsi, la notion de balises naturelles verticales est à même de répondre à ce problème d'observabilité au sens de la perception, et est donc par la même en mesure d'augmenter de manière significative la robustesse de l'étape de localisation. La coopération de capteurs adaptés à la détection de ce type de balises naturelles sera de nature à renforcer cette robustesse.

C HAPITRE 2

Capteurs utilisés en robotique mobile

1. INTRODUCTION

La robotisation des tâches s'oriente d'une manière générale vers une plus grande prise d'initiatives de la part du robot par rapport à un système automatisé. Le robot choisit ainsi lui-même sa stratégie d'action en fonction de la tâche à réaliser et en fonction de son environnement. Pour accomplir cette opération, le robot doit être doté de capteurs permettant d'appréhender, en temps réel, son environnement. Ces capteurs, qualifiés d'extéroceptifs ou de proprioceptifs, constituent une source d'informations qui était réservée à l'homme, à savoir un sens de la vue, du toucher, de l'odorat, de l'ouïe et du goût. L'ensemble des informations perçues par les capteurs et relatives à l'environnement doit ensuite être analysé par le robot afin d'en déduire certaines valeurs prises comme modèle. Elles seront ensuite utilisées comme base de référence dans l'évaluation de l'action à engendrer par le robot pour réaliser la tâche qui lui est spécifiée.

Dans notre travail concernant l'élaboration d'un système de localisation pour robots mobiles, nous abordons le problème d'un robot évoluant dans un environnement à priori partiellement connu. Le robot dispose donc d'informations, quant au point initial, point final, la forme et la longueur de la trajectoire, lui permettant d'établir un lien entre sa position courante et le point d'arrivée final. Pour réaliser la localisation du robot mobile dans de telles conditions, la première étape sera donc de le doter d'un moyen de perception de l'environnement et d'analyse de ces informations. Ce moyen de perception doit notamment être rapide, précis et permettant une étendue de mesure la plus vaste possible. De plus, il doit être d'un encombrement réduit pour pouvoir être facilement installé sur le robot mobile. Ce chapitre abordera cet aspect de notre étude qui permettra d'évaluer les différentes approches qui ont été développées concernant la perception pour la localisation d'un robot mobile. Nous présenterons, tant d'un point de vue théorique que d'un point de vue expérimental, les capteurs que nous avons choisis dans notre travail, après une recherche bibliographique très poussée. Nous présentons ici un panorama des capteurs et des méthodes de traitement des mesures utilisés pour le résoudre. Parmi les techniques décrites, certaines sont arrivées à maturité et ont fait leurs preuves sur des robots utilisés en site réel, dans des applications diverses. D'autres en sont encore au stade expérimental et sont en cours de validation sur des prototypes de laboratoire.

2. LES SYSTEMES DE PERCEPTION

La fonction perception consiste globalement à saisir un certain nombre d'informations sensorielles dans le but d'acquérir une connaissance et une compréhension du milieu d'évolution. Comme nous l'avons précédemment précisé, elle est le préalable indispensable aux étapes suivantes qui sont généralement, pour un robot mobile, les étapes de localisation et de mise à jour de carte de l'environnement (figure 2-1).

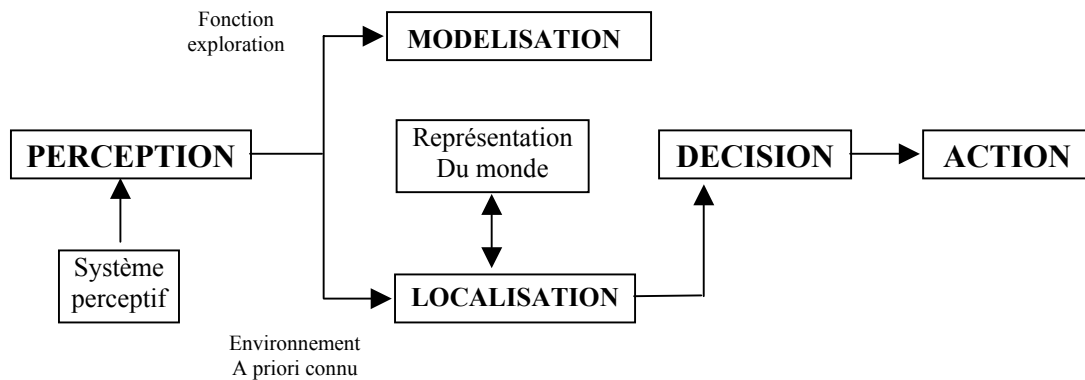


Figure 2-1 : Chaîne fonctionnelle d'un système de navigation

Plusieurs constats peuvent être faits sur cet organe essentiel de la chaîne fonctionnelle de la navigation. Le premier consiste à noter que le choix d'un système de perception est souvent dépendant du milieu d'évolution du robot mobile ainsi que des fonctionnalités mises en œuvre sur le robot pour qu'il puisse remplir sa mission.

Le second se révèle être générique et consiste à affirmer qu'un système de perception constitué d'un unique capteur sera rarement suffisant pour percevoir correctement l'environnement. Le système de perception d'un robot mobile intégrera le plus souvent plusieurs capteurs qui seront de types complémentaires pour un enrichissement des informations sensorielles, ou de types redondants pour répondre au problème de fonctionnement en mode dégradé. Dans ce cadre, des méthodes de fusion de données seront généralement employées pour conditionner ces informations sensorielles.

Enfin le troisième constat qui pourra être dressé est celui du coût de l'intégration de capteurs sur le véhicule autonome. La précision désirée et une fréquence d'acquisition élevée seront autant de facteurs qui augmenteront le coût d'un capteur. Il s'agit donc là d'une contrainte qui pèsera inévitablement sur le choix d'un système de perception.

3. GENERALITES SUR LES CAPTEURS

L'importance des capteurs dans un tel travail est le contrôle rigoureux du robot mobile, donc la connaissance et de l'état de l'environnement et de l'état du système lui même, c'est ce qui permet un bon suivi de la trajectoire prédéfinie et une meilleure orientation au travail alloué.

3.1. Définition d'un capteur

Le capteur est un instrument qui permet de détecter l'information contenue dans un objet ou issue d'un phénomène. Ce dispositif est soumis à l'action d'une mesurande non électrique, et fournit un signal électrique à sa sortie. Il va assurer la mesure permanente des grandeurs réelles en question.

3.2. Classification des capteurs

La classification des capteurs est réalisée suivant les phénomènes qu'ils mesurent : force, énergie, distance, champ magnétique etc....

Par conséquent, la classification peut être élaborée suivant que les capteurs utilisent un phénomène physique générateur de tension ou de courant, on parle alors de capteurs actifs, ou qu'ils nécessitent une source d'alimentation pour pouvoir traduire la variation du phénomène en tension, ce sont alors des capteurs passifs. Ils peuvent se classer aussi selon la forme de l'information qu'ils délivrent (analogique ou numérique). La figure suivante montre les deux types de capteurs qu'on doit trouver sur un robot mobile et qui sont :

- Les capteurs externes (extéroceptifs) qui permettent de fournir certaines connaissances de l'environnement de travail.
- Les capteurs internes (proprioceptifs) qui renseignent sur l'état du robot et qui permettent de connaître la trajectoire suivie par le robot.

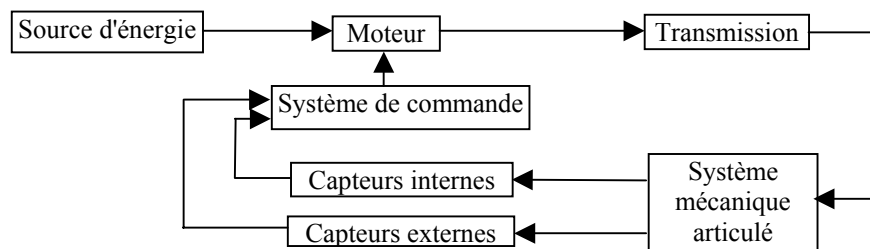


Figure 2-2 : Boucle de commande

Il existe une troisième classe de capteurs non inclus dans les boucles d'asservissement, dont l'intérêt est de veiller sur l'état du robot lui-même que sur l'environnement. Ce sont des capteurs de sécurité qui se déclenchent en cas de mal fonctionnement ou de panne des boucles internes ou externes. Ce type de capteur génère un ordre d'arrêt du robot lorsque le dépassement de certaines valeurs a lieu.

Bien entendu il faut distinguer entre ce que mesure (ou peut mesurer le capteur) et l'utilisation de cette mesure. Ainsi on peut mesurer une position avec une caméra ou avec un potentiomètre. Dans chaque cas il y aura un capteur mieux adapté qu'un autre pour avoir accès à cette information.

4. DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS

4.1. Capteurs internes

Dans les procédures mécaniques, ces capteurs fournissent, par intégration, des informations élémentaires sur les paramètres cinématiques du robot, permettant ainsi un contrôle permanent

de la bonne exécution du mouvement. Les informations sensorielles gérées dans ce cadre sont généralement des vitesses, des accélérations, des angles de giration ou des angles d'attitude.

On peut regrouper ces capteurs internes en deux familles :

- ✓ Les capteurs de déplacement qui comprennent les odomètres, les accéléromètres, les radars Doppler et les mesureurs optiques. Cette catégorie permet de mesurer des déplacements élémentaires, des variations de vitesse ou d'accélération sur des trajectoires rectilignes ou curvilignes.
- ✓ Les capteurs d'attitude, qui mesurent deux types de données : les angles de cap et les angles de roulis et de tangage. Ils sont principalement constitués par les gyroscopes et les gyromètres, les capteurs inertiels composites, les inclinomètres et les magnétomètres. Ces capteurs sont en majorité de type inertiels.

4.1.1. Les capteurs de déplacement

4.1.1.1. Les odomètres

Les odomètres permettent de fournir une quantification des déplacements curvilignes du robot en mesurant la rotation de ses roues. Le calcul de la position relative du robot est réalisé par intégration des rotations élémentaires des roues.

Les odomètres sont généralement composés de codeurs incrémentaux qui permettent de mesurer les angles de rotation avec une précision qui dépend de la résolution du codeur. Des méthodes fondamentales sont utilisées pour la mesure de position. Dans une première méthode, le capteur est lié à la partie mobile du robot (ex : les roues dans notre cas) et fournit un signal dont la variation traduit la position. Il existe des codeurs digitaux absolus où la position est déterminée par la lecture optique d'une graduation codée en binaire portée par un disque solidaire. Dans la seconde le capteur délivre une impulsion à chaque déplacement élémentaire : la position est déterminée par comptage des impulsions émises, ou décomptage selon le sens du déplacement. Il s'agit de capteur incrémental. L'information de déplacement nécessitera la connaissance du diamètre des roues, de l'entraxe des roues, de la structure mécanique et cinématique du véhicule. Une méthode de calcul sera détaillée au chapitre suivant.

Il faut noter cependant que ce capteur est fortement utilisé en robotique mobile puisqu'il présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et surtout d'être peu coûteux.

4.1.1.2. Les accéléromètres

Un accéléromètre fournit, en sortie, une tension proportionnelle à l'accélération linéaire dans une direction fixée par sa géométrie. Généralement, trois accéléromètres sont associés aux axes du repère du robot. La valeur mesurée selon l'axe vertical comprend l'effet de la gravité, qui doit être compensé afin de pouvoir accéder à l'accélération verticale propre du robot. Pour cela, il est nécessaire soit de stabiliser la plate-forme inertielle dans le plan horizontal, soit d'utiliser des capteurs supplémentaires, les inclinomètres, qui fourniront une estimation de la verticale locale permettant la compensation des mesures. La première solution se révèle coûteuse et délicate lors de la mise en œuvre ; de ce fait, elle est peu utilisée en robotique. La seconde solution est simple,

du point de vue de la mise en œuvre, mais présente l'inconvénient de ne fournir une information fiable qu'en régime quasi statique. En effet, la bande passante des inclinomètres est très basse (de 0 à 2.5 Hz) vis-à-vis de celle des accéléromètres (de 100 à 1000 Hz). En raison de leur mode de calcul (double intégration de la mesure), les positions obtenues à partir d'accéléromètres sont entachées d'erreurs, principalement liées aux vibrations et à une mauvaise estimation de la verticale. Ces erreurs se manifestent sous la forme d'une dérive (couramment de l'ordre de 1 à 8 cm/s).

En raison de l'importance de ces dérives, les mesures de position et d'orientation estimées à partir de mesures brutes provenant de capteurs inertiels (gyromètres et accéléromètres) sont inutilisables sans un filtrage qui prend en considération une modélisation des termes de dérive.

4.1.2. Les capteurs d'attitude

Les capteurs d'attitude permettent d'estimer les paramètres intrinsèques du robot que sont les angles de cap, de roulis et de tangage. Ces capteurs sont principalement de type inertiel. Ils ont pour point commun d'être généralement coûteux et sensibles au bruit, d'où une intégration moins fréquente dans les systèmes embarqués que les odomètres.

4.1.2.1. Les gyroscopes

Les gyroscopes permettent de mesurer une variation angulaire. Ils sont intéressants en robotique mobile parce qu'ils peuvent compenser les défauts des odomètres. Une erreur d'orientation odométrique peut entraîner une erreur de position cumulative qui peut être diminuée voire compensée par l'utilisation conjointe de gyroscopes [Bore96a]. Les gyroscopes très précis sont trop onéreux pour être utilisés en robotique mobile. Cependant, les gyroscopes à fibre optique, connu pour leur grande précision, ont vu leur prix chuter et sont donc devenus une solution attractive pour la navigation en robotique mobile.

4.1.2.2. Les gyromètres

Le gyromètre est un capteur qui permet de mesurer une vitesse angulaire. Deux technologies sont actuellement disponibles, permettant un rapport coût/performance compatible avec des applications robotiques : les gyromètres piézoélectriques et les gyromètres à fibres optiques. Dans le premier cas, le principe de mesure exploite la variation d'amplitude d'un oscillateur piézoélectrique, induite par la force de Coriolis due au mouvement de rotation appliqué au capteur. Ce type de capteur à faible coût présente des dérives de l'ordre de $0.2^\circ/\text{s}$, dont l'influence sur le calcul de l'orientation peut être limitée grâce à l'utilisation de techniques de filtrage temporel. Il faut également noter que ces capteurs sont sensibles aux variations de températures. Les capteurs à fibre optiques, plus récents, sont basés sur la différence de trajets optiques entre deux faisceaux laser qui se propagent en sens opposés dans une boucle circulaire de fibres optiques. Lorsque la boucle est immobile, les trajets optiques sont identiques. Soumise à un mouvement de rotation, la différence de trajet optique est alors proportionnelle à la vitesse angulaire (effet Sagnac). Là encore, les mesures d'orientation fournies par l'intégration des vitesses angulaires sont entachées d'erreurs croissantes avec le temps, mais dans un rapport environ cinquante fois plus faible que dans le cas des capteurs piézoélectriques (de l'ordre de

0.005 °/s). En contrepartie, en raison de leur principe de mesure, ils possèdent une vitesse minimum de fonctionnement assez élevée, de l'ordre de 0.05 °/s. A titre d'exemple, en considérant un robot mobile admettant une erreur angulaire de 1° au terme d'un déplacement linéaire de 10 m, cette erreur ne sera observable par un gyromètre à fibre optique que si la vitesse d'avancement du robot est supérieure à 0.5 m/s.

4.1.2.3. Les gyrocompas

Le gyrocompas est un capteur qui permet de mesurer le cap. Il est composé d'un gyroscope et d'un compas magnétique. Le gyrocompas conserve le nord magnétique durant tout le déplacement du véhicule, après l'avoir initialement déterminé de façon autonome.

4.1.2.4. Le magnétomètre ou compas magnétique

Le magnétomètre qui est aussi appelé compas magnétique mesure la direction du champ magnétique terrestre pour déduire l'orientation du robot. Parmi toutes les technologies adoptées pour ce type de capteur, la mieux adaptée pour la robotique mobile est celle dite à vanne de flux. Elle a l'avantage de consommer peu d'énergie, de n'avoir aucune pièce mobile, d'être résistante aux chocs et vibrations et d'être peu coûteuse. Toutefois, les mesures sont perturbées par l'environnement magnétique du robot (comme par exemple les lignes d'énergie ou les structures en acier). Ceci rend difficile l'utilisation de ce capteur en milieu intérieur. Néanmoins, ce capteur a par exemple été intégré avec succès dans un système de localisation basé sur le filtrage de Kalman étendu [Har96].

La caractéristique principale de ce capteur est sa précision moyenne qui, sur un long trajet, est relativement bonne.

4.1.3. Autres types de capteurs proprioceptifs

Au cours de ces dernières années, l'application à la robotique mobile de capteurs mettant en œuvre d'autres principes de mesure s'est accrue, principalement en raison de la diminution des coûts et de la meilleure intégration des algorithmes de traitement. Parmi ceux dont l'utilisation semble très prometteuse, on peut citer les capteurs à effet Doppler et les capteurs d'attitude (compas, inclinomètres).

4.1.3.1. Capteurs à effet Doppler

Ils permettent de mesurer une vitesse relative entre le véhicule et une surface (par exemple le sol) en utilisant l'effet de décalage en fréquence entre une onde émise et le faisceau réfléchi sur la surface durant le déplacement (effet Doppler-Fizeau). Ces techniques sont couramment utilisées en aviation et dans le domaine maritime, mais commencent juste à être appliquées à la robotique, notamment la robotique agricole. Les capteurs utilisent des ultrasons ou des ondes hyperfréquences et permettent d'estimer la vitesse avec une résolution d'environ 2 cm/s, pour des gammes de mesures comprises entre 0 et 20 m/s. Ces techniques présentent l'avantage d'être insensibles au glissement des roues, mais leurs performances se dégradent rapidement en cas de mesure de faibles vitesses, contrairement aux capteurs optiques à corrélation. Puisque la mesure s'effectue selon une direction, ces capteurs sont principalement utilisés pour estimer la vitesse d'avancement du véhicule.

4.1.3.2. Capteurs d'attitude : compas, inclinomètres

Les capteurs d'attitude sont très utilisés sur des robots se déplaçant en terrain accidenté [Mal01], afin de mesurer le cap par rapport au nord magnétique, et les angles de roulis et de tangage. Les inclinomètres sont précis à l'arrêt, mais la précision se dégrade lorsque la mesure est acquise durant les mouvements.

4.1.4. Conclusion

Les méthodes fondées sur l'intégration de mesures de déplacement ou de vitesse fournies par des capteurs proprioceptifs présentent toutes l'inconvénient d'introduire des termes de dérives proportionnels à la distance parcourue (odométrie) ou au temps mis pour le parcourir (inertiel). De ce fait, elles ne fourniront une estimation de localisation valable que sur un horizon très court, incompatible avec les missions que l'on peut attendre d'un robot mobile ; ces technologies à faible coût ne suffisent donc pas pour réaliser un système de localisation

Cependant, ces capteurs peuvent, durant un temps limité à la dizaine de secondes, fournir des informations fiables qui pourront être exploitées en complément d'un autre système de localisation. Généralement, ce deuxième système de localisation exploite des informations fournies par des capteurs extéroceptifs (télémétrie, vision); les techniques d'estime (odométrie, inertiel ou optique) sont alors utilisées pour propager une estimée de la position et de l'orientation du robot jusqu'à la prochaine observation valide des capteurs extéroceptifs. De ce fait, elles permettent de diminuer la fréquence des localisations basées sur les capteurs extéroceptifs, toujours très coûteuses en temps de calcul.

4.2. Les capteurs externes

Les capteurs extéroceptifs permettent de percevoir le milieu d'évolution du robot. Ils sont généralement le complément indispensable aux capteurs présentés précédemment. Des méthodes de fusion de données seront alors utilisées pour conditionner et traiter les informations sensorielles de natures différentes. Deux familles de capteurs extéroceptifs embarqués peuvent être identifiées : les capteurs télémétriques et les systèmes de vision. Ces capteurs servent pour les actions suivantes :

- vérification et amélioration de la trajectoire suivie par le robot.
- mesure des interactions entre le robot et l'environnement
- perception de l'environnement.
- prévention et sécurité.

Parmi les capteurs externes qui seront étudiés dans les sections suivantes, on retiendra pour notre part le capteur ultrasonore et le capteur de vision azimutale qui est un capteur de type CCD.

Le capteur ultrasonore fait partie des capteurs de distance à portée moyenne. On le trouve sur tous les robots mobiles. Souvent plusieurs capteurs sont montés autour du robot formant une ceinture de sécurité. Leur rôle principal est la détection des obstacles. Son principe de fonctionnement est comme suit : Un faisceau émis est réfléchi par un obstacle et capté par le capteur. La durée séparant l'émission et la réception est mesurée, ce qui donne la distance.

On propose d'installer le capteur CCD au sommet du robot. On se limite à une acquisition simple des angles d'azimut des différentes balises installées dans l'environnement de travail du robot.

4.2.1. Les capteurs télémétriques

Le fonctionnement des capteurs utilisés classiquement en robotique mobile est présenté dans les sections suivantes. Les lasers d'abord puis les capteurs à infrarouge sont introduits. Les capteurs à ultrasons sont ensuite développés plus abondamment. En effet, en raison de leur coût faible par rapport aux autres capteurs, ils ont été choisis dans notre travail.

4.2.1.1. Les capteurs laser

Le capteur laser est basé sur l'émission d'une onde électromagnétique structurée. Ce capteur permet donc d'obtenir un faisceau d'ondes très concentré, contrairement aux capteurs ultrasonores. Une étude très détaillée de ce type de capteur est proposée dans [Rie00]. Les systèmes laser possèdent de nombreux avantages qui en font des capteurs souvent utilisés dans les applications de robotique mobile [Hor94], [Dub98] :

- ✓ La résolution angulaire : des faisceaux angulairement très fins peuvent être obtenus avec des lentilles d'émission de petite taille, du fait de la courte longueur d'onde émise.
- ✓ La réponse optique des cibles : les longueurs d'ondes courtes permettent d'obtenir un écho pour des angles d'incidence du faisceau sur la cible allant jusqu'à 75°, et améliorent de ce fait la probabilité de détection.
- ✓ La précision sur la mesure de distance par rapport à la portée, pour les télémètres, est importante. Une précision de l'ordre du dixième de millimètre peut être obtenue sur des distances de l'ordre de 30 mètres.

L'inconvénient majeur du laser se situe au niveau de l'électronique de mesure qui doit être capable, étant donnée la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, de mesurer des intervalles de l'ordre de la pS pour des précisions de distance de l'ordre du millimètre. Ceci implique un matériel coûteux et complexe.

En robotique les systèmes laser sont utilisés principalement de trois manières différentes :

- ✓ En télémètre : ils sont alors utilisés, tout comme les capteurs à ultrasons, pour des mesures de distances [Jal92].
- ✓ En goniomètre : ils sont utilisés pour des mesures d'angles [Bon97].
- ✓ En source de lumière structurée : ils sont généralement utilisés pour la modélisation 3D de l'environnement. La source laser sera dans ce cas toujours associée à une caméra et fournira des informations sur la profondeur [Gon04].

Plusieurs principes sont utilisés pour la mesure de distance avec des dispositifs optiques.

Le premier est la triangulation : des mesures d'angles permettent de déterminer la distance de la cible. Les mesures réalisées présentent une résolution correcte et un temps d'acquisition compatible avec la robotique mobile. Mais la précision décroissante avec la distance, il existe des zones d'ombre importantes et le capteur est assez encombrant.

Le second principe est la mesure d'intensité. Une onde lumineuse étant émise et réfléchiée par une cible, un récepteur mesure le niveau du signal qu'il reçoit pour en déduire la longueur de la

course du faisceau. L'inconvénient majeur provient d'une atténuation très différente suivant l'état de surface de la cible. Des systèmes à plusieurs récepteurs commencent à voir le jour qui permettent de s'affranchir en partie de l'état de surface de la cible.

Le troisième est l'interférométrie. Ces mesures à incréments (de part leur nature même) atteignent une très grande précision mais connaissent un problème d'ambiguïté de mesure à un modulo près. Ils doivent donc être couplés avec un autre dispositif pour obtenir une approximation de la distance mesurée. Ces systèmes sont encombrants et sensibles aux vibrations, ce qui les rend peu adaptés à la robotique mobile.

Le dernier est la mesure par temps de vol. Pour de grandes distances, une mesure directe est envisageable. Pour des distances plus courtes, une modulation sinusoïdale ramène à une mesure de déphasage sur l'onde modulée. On peut aussi combiner les deux.

4.2.1.2. Les capteurs à infrarouge

Leur utilisation [Ben02] est similaire à celle des lasers. Les mesures de distance peuvent être faites par triangulation, mesure d'intensité et mesure de temps de vol. On a aussi parfois des angles d'ouverture importants à l'émission.

4.2.1.3. Les capteurs à ultrasons

Contrairement aux autres types de capteurs, ceux-ci émettent une onde qui se propage dans l'air (le plus souvent). Cela augmente beaucoup le temps d'acquisition, la vitesse du son étant très faible devant celle de la lumière. En revanche, la mesure par temps de vol est ici aisée avec une électronique simple. L'atténuation de l'onde est importante dans ce milieu : les distances mesurées restent faibles (quelques dizaines de mètres) mais suffisantes en intérieur.

Deux caractéristiques principales sont à préciser. La première est la réflexion de l'onde sur un objet qui utilise les lois de Descartes. La seconde découle du fonctionnement du capteur en émetteur-récepteur : c'est la zone aveugle.

4.2.1.3.1. La réflexion de l'onde

Seuls les objets perpendiculaires à un rayon émis sont détectables. L'onde émise n'est pas très directive (typiquement entre 20 et 30 degrés de cône d'ouverture). Cela permet de détecter plus d'obstacles, mais on ne dispose alors plus d'information précise sur l'angle de mesure (figures 2.3, 2.4 et 2.5). On sait seulement que l'onde mesurée est réfléchi perpendiculairement à l'obstacle rencontré.

Se posent aussi les problèmes classiques du rebond multiple et de l'écho multiple qui gênent la mesure. Ils sont le plus souvent considérés comme des perturbations (mesure trop grande due à un rebond multiple par exemple). Mais, dans certains cas, un second écho peut permettre de détecter un obstacle derrière un autre (objet derrière un pied de chaise par exemple). Malgré ces inconvénients, ce type de capteurs est très utilisé en robotique mobile d'intérieur. En effet, sa mise en œuvre est simple et il est peu coûteux.

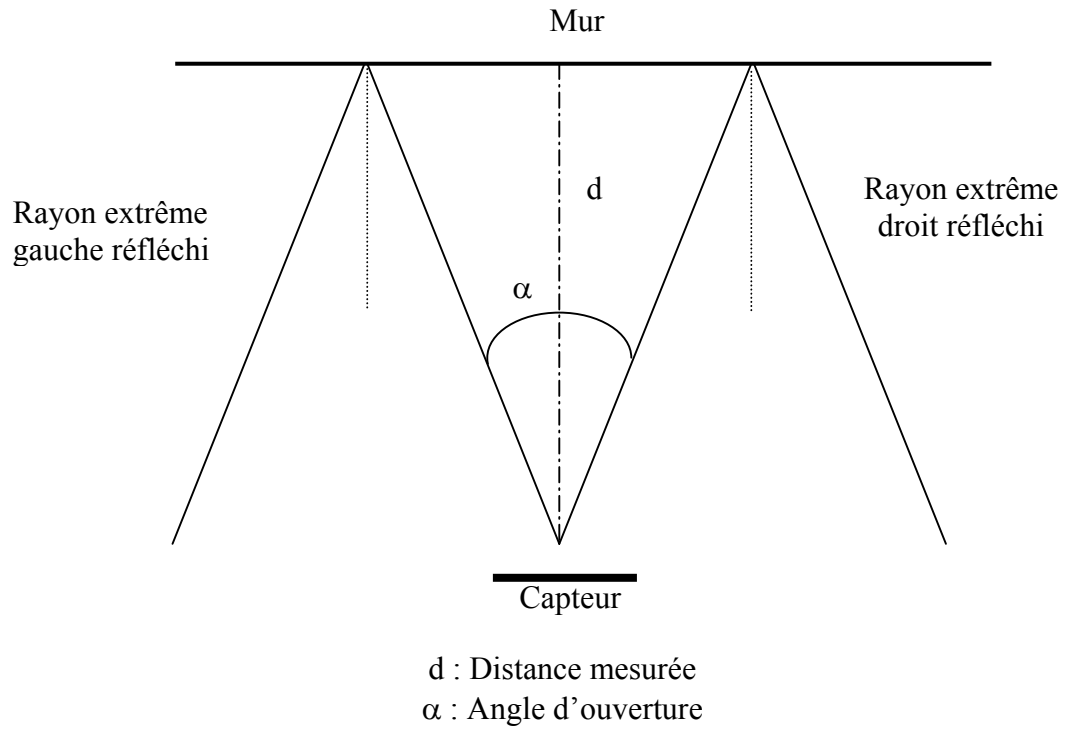


Figure 2-3 : Obstacle perpendiculaire à l'axe du capteur, détecté.

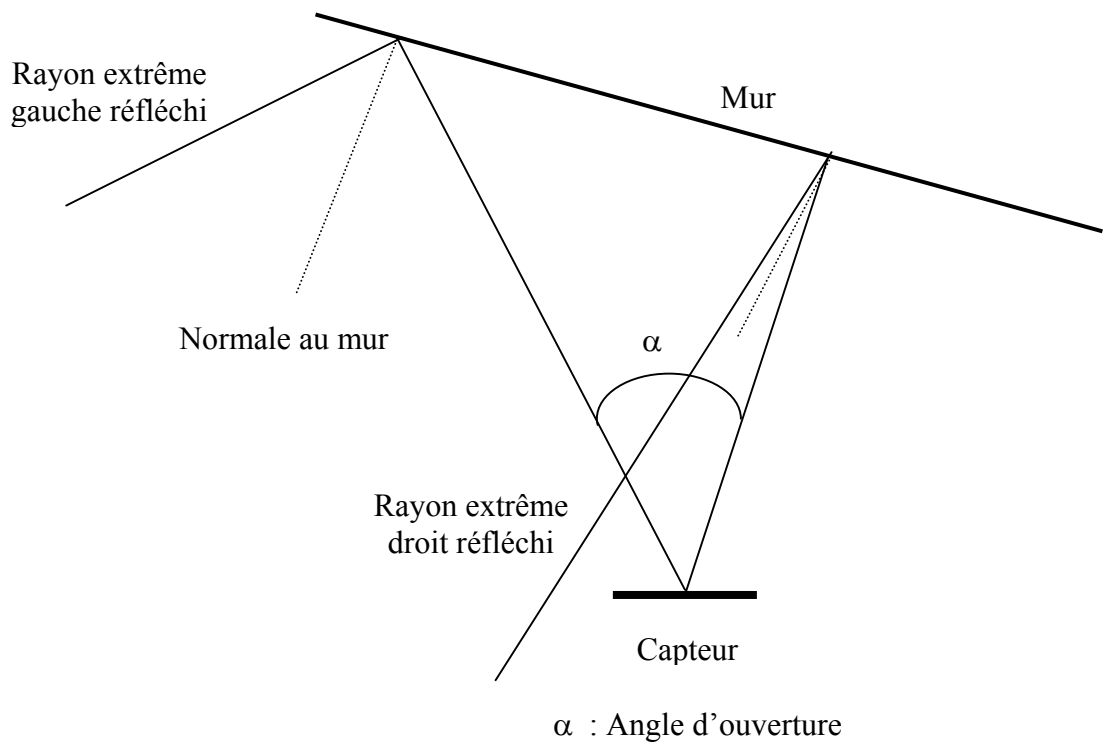


Figure 2-4 : Obstacle en biais non détecté par le capteur.

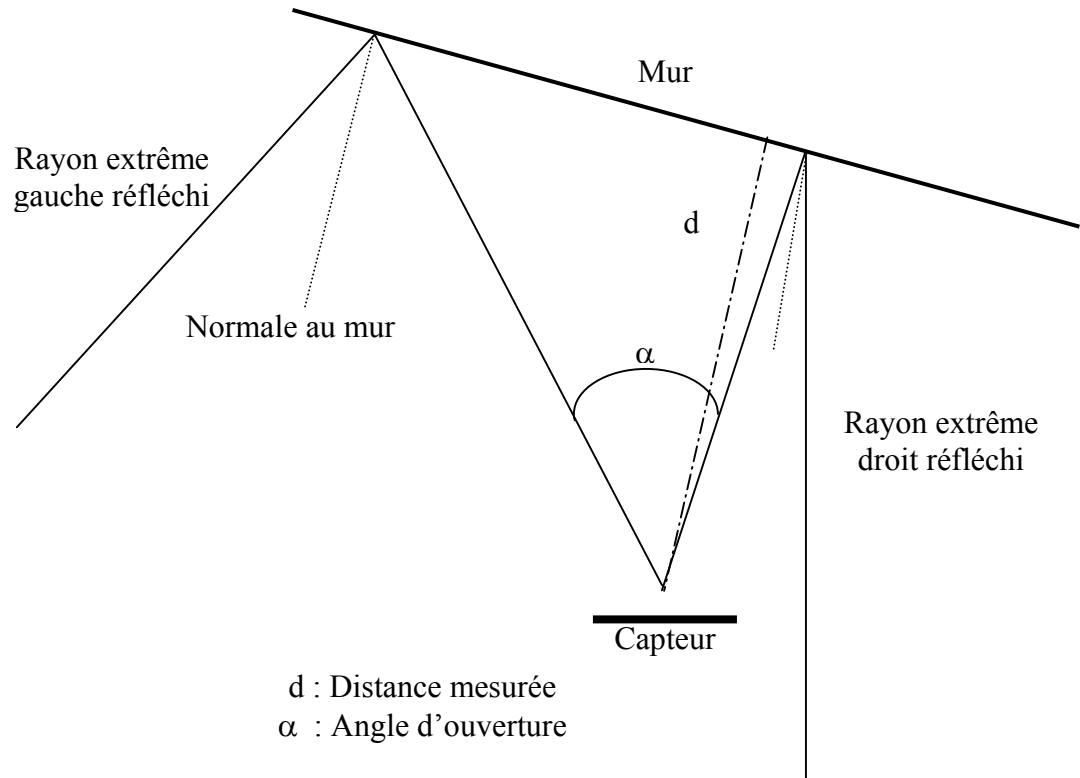


Figure 2-5 : Obstacle en biais détecté par le capteur

Pour affiner ces mesures, on peut utiliser l'amplitude du signal reçu en plus de la mesure du temps de vol. La récupération de l'amplitude permet de distinguer plan ou coin d'un côté et arête de l'autre. Un capteur monté sur une tourelle permet d'acquérir plusieurs valeurs de distances avec les amplitudes correspondantes. Cette dernière évolue en fonction de l'angle de mesure (figure 2-6).

L'amplitude du balayage pendant laquelle la cible est vue et la valeur maximum du signal reçu en comparaison avec le temps de vol donnent des indications précieuses pour distinguer un plan ou un coin d'une arête. θ_n correspond à l'angle de retour maximum d'énergie (perpendiculaire au plan ou « en face » du coin ou de l'arête).

4.2.1.3.2. La zone aveugle

Le capteur utilisé joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur. En émission, la membrane du capteur vibre pour créer l'onde ultrasonore. En réception, elle vibre au retour de l'onde renvoyée par un obstacle. Ainsi, la réception doit être bloquée pendant l'émission sinon, la membrane vibrant, une onde est détectée comprise comme un retour.

Dans le cas du Polaroid, le constructeur bloque la réception pendant 2.38 ms ce qui correspond à une distance de $340 \times 0.00238 = 0.81\text{m}$. La zone aveugle est donc 0.405 m (l'onde fait l'aller-retour). Dans les faits, elle est un peu plus importante et vaut environ 0.44 m.

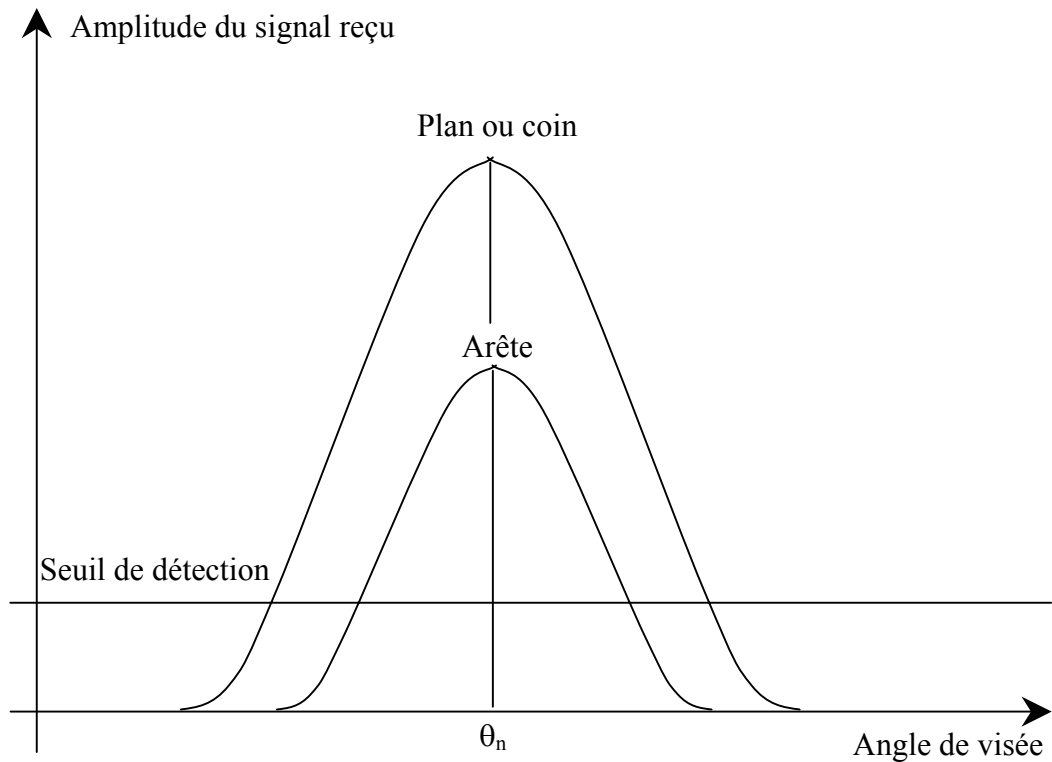


Figure 2-6 : Différenciation plan/corner et arête.

4.2.2. Les systèmes de vision

Les systèmes de vision en robotique sont basés sur l'utilisation d'une caméra CCD. L'arrivée des capteurs CCD (Charge Coupled Device), en 1975, a été déterminante dans l'évolution de la vision : la rapidité d'acquisition, la robustesse et la miniaturisation sont autant d'avantages qui ont facilité leur intégration. Les systèmes de vision sont très performants en termes de portée, précision et quantité d'informations exploitables. Ils sont de plus les seuls capables de restituer une image sensorielle de l'environnement la plus proche de celle perçue par l'être humain.

Une caméra détecte les rayonnements visibles issus de l'environnement : c'est un capteur passif qui ne peut fournir qu'une information 2D. On peut localiser le robot avec une ou plusieurs caméras en repérant des balises ou des amers. Les problèmes d'appariement d'un objet vu par une caméra avec une connaissance à priori de l'environnement ou d'un objet vu par deux caméras sont répandus avec ce type de capteurs. Ces systèmes sont intrinsèquement coûteux et les traitements associés sont assez complexes. Les techniques qui permettront d'obtenir des

informations 3D à partir d'un tel capteur sont généralement liées à l'adjonction d'un autre capteur. Dans ce cadre nous pouvons identifier les techniques suivantes :

4.2.2.1. La stéréovision

La stéréovision consiste à observer une même scène avec deux caméras qui sont éloignées l'une de l'autre et dont on connaît la distance qui les sépare. Connaissant la géométrie exacte du système stéréoscopique, la première étape de reconstruction 3D consiste à mettre en correspondance les deux images. Cette phase réside dans la détermination de couples de points observés dans les deux images, ou dans l'appariement de points d'intérêt. L'information 3D pourra alors être fournie par triangulation.

La stéréovision est basée sur le même principe de reconstitution de la profondeur que la vision chez l'être humain.

La figure suivante décrit plus précisément le principe de la stéréovision. Tout point M visible depuis les deux caméras se projette en P_1 sur le plan image de la première caméra et en P_2 sur le plan image de la deuxième caméra. Inversement, connaissant deux points en correspondance P_1 et P_2 , ainsi que la distance D séparant les centres optiques O_1 et O_2 des deux caméras, les coordonnées du point P sont données par l'intersection de (O_1P_1) et (O_2P_2) .

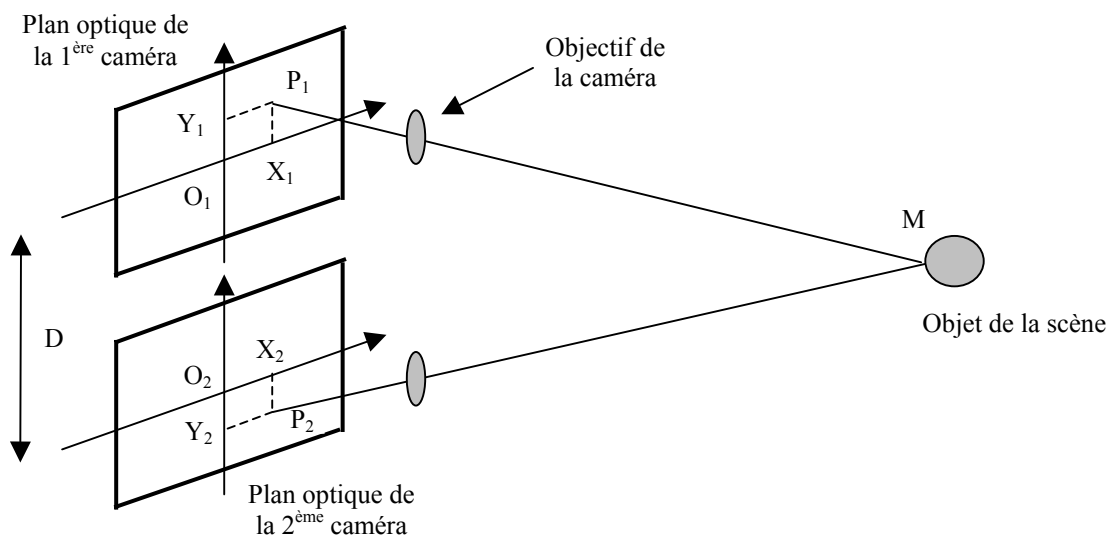


Figure 2-7 : Principe de la stéréovision

La stéréovision apparaît comme un des moyens de perception les plus performants en robotique. Toute la problématique de la stéréovision réside dans la robustesse de la phase de mise en correspondance des informations : elle est souvent liée à de nombreuses ambiguïtés mais aussi à des temps de calcul très importants (aspect fortement combinatoire de l'appariement).

Le principe de stéréovision a par exemple été utilisé pour le très médiatique robot Rocky7 destiné à être envoyé sur la planète Mars. Le robot ne pouvant posséder une carte préétablie de son environnement extra-terrestre d'évolution, celle-ci est construite en utilisant la stéréovision. Rocky7 se sert ensuite de cette carte globale pour apparier la carte locale, obtenue elle aussi par stéréovision, en utilisant une mesure de similarité basée sur la distance de Hausdorff [Ruc95]. La

stéréovision est utilisée dans de nombreuses autres applications robotiques telles que la modélisation 3D de scènes d'intérieur [Gra89], la détection d'obstacles [Lob03] et la cartographie d'environnement [Jun04].

4.2.2.2. Les capteurs à triangulation active (lumière structurée)

L'obtention de la 3D est gérée comme pour la stéréovision, mais on remplace une caméra par un laser qui sera chargé de projeter un motif de lumière structurée. Le principe est d'éclairer l'environnement avec une lumière cohérente et de l'observer avec une caméra sous un certain parallaxe. Connaissant la position de la source lumineuse et celle de la caméra, l'information peut être obtenue par triangulation [Mad98].

Ces capteurs sont utilisés pour obtenir des images de profondeur, mais également pour l'évitement d'obstacles [Hol92], pour la numérisation d'objet 3D [Hor94].

Plusieurs modèles de lumière structurée peuvent être utilisés :

- ✓ Capteur à simple triangulation : les capteurs à simple triangulation acquièrent la distance d'un seul point lumineux à la fois. Une application célèbre est celle du véhicule d'exploration Pathfinder destiné à être envoyé sur la planète Mars.
- ✓ Les capteurs par plan de lumière : la source de lumière projetée n'est plus un point, mais un plan de lumière. Un système de localisation basé sur ce principe a été développé dans [Marl04].
- ✓ Capteurs à plusieurs plans de lumière : il s'agit dans ce cas de projeter un motif tel que des lignes ou de petits disques sur la scène observée (figure 2-8).

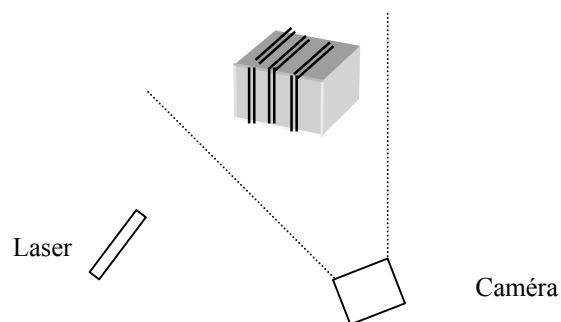


Figure 2-8 : Triangulation par plusieurs plans laser

La technique de triangulation active est plus robuste que la stéréovision car elle permet de faire l'économie de l'étape de mise en correspondance. En revanche la précision n'est pas uniforme sur l'ensemble de l'image : plus un objet est éloigné, plus l'erreur de mesure est importante.

4.2.2.3. La vision omnidirectionnelle

Ces systèmes de perception associent une caméra CCD et un élément permettant d'obtenir une vue sur 360 degrés de l'environnement. A ce titre ils sont de plus en plus utilisés en

robotique mobile au détriment de la vision monoculaire [Del97], [Dro02], [Riz00]. Suivant l'élément ou les éléments ajoutés à une caméra CCD, on pourra distinguer quatre techniques pour obtenir une image omnidirectionnelle.

- ✓ Génération d'images par utilisation de plusieurs caméras

Cette première technique consiste à utiliser plusieurs caméras couvrant un champ de vision égal à 360 degrés : par exemple quatre caméras séparées par des angles de 90 degrés.

- ✓ Génération d'images multiples par rotation d'une caméra

Cette deuxième technique consiste à faire pivoter une caméra autour d'un axe. Cette méthode permet d'avoir une prise de l'environnement avec une seule caméra, mais il faut effectuer une rotation complète avant d'obtenir une vue de 360 degrés.

- ✓ Utilisation de lentille spéciale

Cette troisième méthode consiste à ajouter un ensemble optique sur la caméra CCD afin de dévier les rayons lumineux, comme par exemple l'œil de poisson.

- ✓ Utilisation de miroirs convexes.

4.2.3. Autres capteurs

Il existe aussi d'autres types de capteurs tels ceux de contact qui sont peu utilisés en robotique mobile pour la localisation. Ils peuvent l'être dans d'autres domaines comme la sécurité en cas de contact avec un objet pour arrêter le robot.

5. LA COOPERATION MULTICAPTEURS

Un capteur utilisé seul ne peut relever complètement toutes les caractéristiques de l'environnement. Aussi, il serait astucieux de combiner les mesures faites par différents capteurs pour acquérir une information plus consistante. Une association d'une caméra vidéo et d'un gyroscope par exemple est proposée dans [Muk00]. En vision, l'utilisation d'une caméra et d'un faisceau lumineux, de plusieurs caméras (souvent deux), ou encore d'une caméra et d'une mesure de distance laser permet d'obtenir des renseignements volumiques d'une scène en 3D. Un assemblage judicieux de plusieurs capteurs à ultrasons permet de rectifier en partie leur faiblesse directionnelle.

5.1. Combinaison d'une caméra et d'un faisceau lumineux.

Ce dispositif permet, par triangulation, de déterminer la position de l'objet se trouvant sur le trajet du faisceau lumineux. En effet, connaissant les positions respectives de la source lumineuse et de la caméra, la détection du point lumineux dans l'image caméra donne une information sur la position de l'impact (figure 2-9).

5.2. Combinaison de deux caméras.

Un dispositif identique avec deux caméras permet l'acquisition de données en 3D. Se pose alors le problème de la mise en correspondance des images caméra.

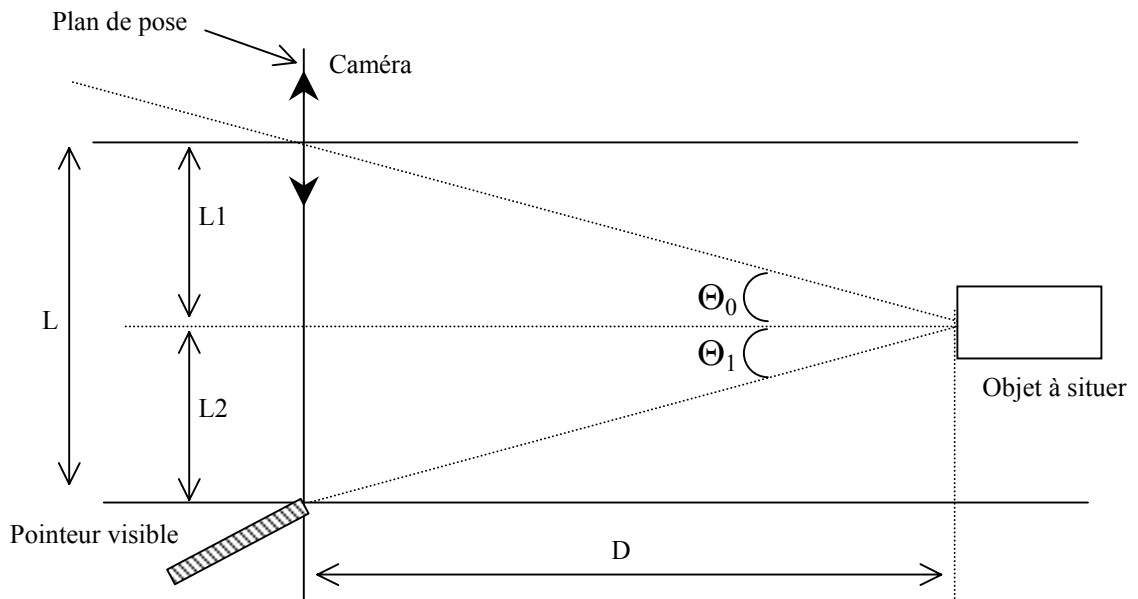


Figure 2-9 : Triangulation- coopération caméra / pointeur visible .

5.3. Combinaison de plusieurs capteurs à ultrasons

Une utilisation simple est proposée dans [Sab94]. Dans un milieu structuré (formes géométriques simples, typiquement en intérieur) trois capteurs alignés font chacun à leur tour une mesure de distance par temps de vol. La comparaison de trois mesures permet de réduire l'incertitude sur l'angle et de classer la cible (coin, plan, cylindre...).

6. CONCLUSION

La première étape à considérer pour un robot mobile évoluant dans un environnement connu ou inconnu est la perception de son environnement de travail pour une meilleure localisation. Comme nous venons de le décrire, nous avons recours à deux capteurs. Ce choix a été guidé par les critères suivants :

Le premier réside dans les performances propres à ces dispositifs. En effet, ces capteurs présentent une rapidité de lecture des informations tout à fait intéressante pour l'application visée.

Le deuxième critère est la facilité avec laquelle ces capteurs peuvent être installés sur un robot mobile, ainsi que leur faible encombrement.

Le troisième critère est le coût relativement faible par rapport à celui d'un gyromètre par exemple.

C

HAPITRE 3

Les différentes méthodes de localisation

1. INTRODUCTION

Afin de pouvoir se localiser dans un environnement, un robot mobile a besoin de capteurs lui donnant des informations sur sa position absolue dans l'espace. Dans un environnement d'intérieur, les robots mobiles utilisent principalement l'odométrie, basée sur des données proprioceptives ce qui permet par intégration du déplacement, de connaître les coordonnées (X, Y, Ψ) d'un point du robot dans un repère absolu.

Pour cela on utilise un système de mesure relative de position tel que les systèmes inertiels ou les systèmes odométriques. Pour ce dernier type les erreurs sur le positionnement sont cumulatives. Néanmoins ces systèmes ont une précision suffisante pour des petits déplacements, les systèmes inertiels sont d'un coût très important, nous utiliserons donc un système odométrique. Afin d'estimer la position et l'orientation du robot, des codeurs optiques sont généralement positionnés sur l'arbre rapide des roues motrices. Cette solution intéressante est néanmoins très sensible aux glissements des roues, ce qui provoque des erreurs importantes sur le positionnement.

A cause des imperfections aléatoires probables de l'état de surface (non-planéité, bosses, fosses, etc.) sur laquelle évolue un robot mobile à roues, ainsi que la variation de la charge portée par celui-ci, il y a des risques que le robot dérive de sa trajectoire pré-définie même si la technique de navigation dans l'espace de travail du robot mobile est adéquate, ceci rend toute localisation relative ou absolue erronée. Une navigation correcte et satisfaisante du robot mobile nécessite une localisation précise.

L'odométrie, qui consiste à intégrer les déplacements élémentaires du véhicule, fait appel uniquement à des informations sur l'état interne du robot et elle nécessite un modèle d'évolution du robot mobile. Ses limites sont dues à l'accumulation des erreurs par l'intégration. La localisation absolue, quant à elle, exploite des informations sur la configuration recherchée du véhicule (position et orientation le plus souvent) par rapport à son environnement.

1.1. Une définition de la localisation

On trouve dans la littérature une définition très générale de la localisation : "fonction consistant à déterminer, dans un repère de travail donné, certains paramètres de position et/ou d'attitude du robot qui sont nécessaires à l'accomplissement de sa mission". Il est à noter l'importance du repère et du lien entre les paramètres à estimer et la mission. Il est en effet clair

que des repères sont indispensables pour se localiser et donc une grande vigilance s'impose quant à leur choix et aux passages des uns aux autres. La mission oriente le choix des paramètres les plus pertinents pour son exécution.

1.2. Les deux grandes familles de systèmes de localisation

Relative ou absolue, la localisation s'opère de manières très différentes. Chacune des deux familles possède des avantages et des inconvénients qui sont comparés.

1.2.1. La localisation relative

Aussi appelée localisation à l'estime, elle permet de déterminer la position courante d'un robot mobile en fonction des positions antérieures et de la mesure de ses déplacements. Les informations utilisées sont fournies par des capteurs proprioceptifs. L'odomètre mesure le déplacement relatif par rapport au sol. Les systèmes inertiels mesurent des accélérations par rapport à un repère galiléen.

1.2.2. La localisation absolue

La détermination de la position courante est réalisée par des mesures effectuées sur des repères de position connue. Ces repères peuvent être artificiels (on les appelle alors balises) ou naturels (on les appelle alors amers). La télémétrie et la vidéo permettent de définir la position de ces repères. Les systèmes magnétiques (boussoles, compas) permettent d'obtenir des indications de direction par rapport au champ magnétique terrestre. Il existe aussi des systèmes gravitationnels (inclinomètres) mesurant une direction par rapport au champ de gravitation terrestre .

1.2.3. Comparaison des deux familles

Chacune de ces familles possède des avantages et des inconvénients. Ils sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau 3-1).

	Localisation à l'estime	Localisation absolue
Dépend de l'origine	oui	non
Fonctionne en continu	oui	non
Dépend de l'environnement	non	oui
La précision dépend de la position	non	oui
Dérive de la précision au cours du temps	oui	non
Système brouillable	non	oui
Erreurs faciles à modéliser	oui	non

Tableau 3-1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des deux familles de localisation

Il apparaît assez clairement que les faiblesses de l'une sont les forces de l'autre et vice versa. Quand la localisation à l'estime dépend de l'origine et qu'une dérive de l'erreur est constatée, la localisation absolue est indépendante de l'origine et son erreur est constante au cours du temps.

On note là des avantages de la seconde sur la première. En revanche, quand la localisation à l'estime ne dépend pas de l'environnement et que sa précision est indépendante de la position, la localisation absolue est fonction de l'environnement et la position du robot en influence la précision. Ce sont là des avantages de la première sur la seconde.

Ce chapitre s'articule autour de cette distinction de familles. Le paragraphe suivant expose différentes techniques de localisation pour chacune d'elles. Puis des travaux sur ce thème sont présentés suivant le même schéma .

2. TECHNIQUES DE LOCALISATION

La localisation relative est d'abord étudiée. Puis différentes techniques de localisation absolue sont présentées. Ces dernières sont plus nombreuses en robotique mobile que les premières ; elles ont donc fait l'objet de développements plus importants. La généralité de ces approches est ensuite limitée au cadre de ce travail.

2.1. Localisation relative : l'odométrie

En fait, la principale méthode de localisation à l'estime utilisée en robotique mobile d'intérieur est l'odométrie. C'est le système le plus utilisé en robotique mobile terrestre pour des dimensions faibles de l'environnement (jusqu'à une centaine de mètres). Son fonctionnement est le suivant :

Soit une base mobile à roues possédant au moins deux roues indépendantes, motrices ou non, non alignées avec la direction de déplacement et équipées de codeurs à incréments (typiquement des codeurs optiques). Ces codeurs permettent de déterminer le déplacement de chacune des deux roues. On appelle ces déplacements dU_g et dU_d (figure 3.1). Ceux-ci sont en fait des longueurs d'arcs de cercle, mais le déplacement étant petit on peut les estimer égales à celles des cordes correspondantes.

On a vu (1.2.1) que cette méthode utilise la connaissance des positions antérieures pour déterminer la nouvelle. On part donc de la position X_n, Y_n, Ψ_n connue et on utilise les valeurs données par les codeurs. On a alors, d'après la figure 3-1, par des relations géométriques simples (Thalès et les relations dans un triangle rectangle) les équations suivantes [Wan88]:

$$\begin{aligned} d\Psi &= (dU_d - dU_g) / 2h \\ dU &= (dU_d + dU_g) / 2 \end{aligned} \quad (3-1)$$

et

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= X_n + dU \cdot \cos [(\Psi_n + \Psi_{n+1})/2] \\ Y_{n+1} &= Y_n + dU \cdot \sin [(\Psi_n + \Psi_{n+1})/2] \\ \Psi_{n+1} &= \Psi_n + d\Psi \end{aligned} \quad (3-2)$$

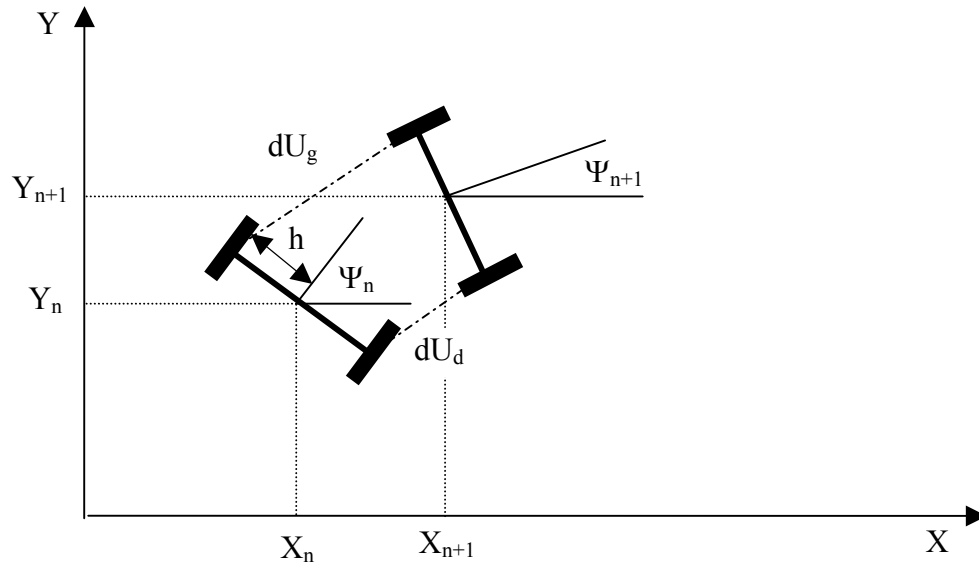


Figure 3-1 : Calcul de la position par odométrie

Il apparaît dans la forme des équations que les erreurs sont cumulées à chaque itération. Si l'on considère en plus les glissements des roues sur le sol et leur gonflage approximatif, on touche les points faibles de cette méthode. Elle est néanmoins très utilisée en robotique mobile d'intérieur de par son extrême simplicité de mise en œuvre. En extérieur, le glissement des roues sur le sol et le caractère non plat du terrain la rend très hasardeuse.

2.1.1. Modélisation des erreurs d'odométrie

On distinguera deux sources d'erreurs pouvant dégrader la précision de la localisation :

✓ Les erreurs systématiques qui sont intégrées à chaque itération sous la forme d'une erreur additive et qui sont de deux natures :

- Des biais sur la valeur des paramètres du robot (roues de rayons différents ou présentant des excentricités, erreurs sur la longueur de l'entraxe des roues).
- Des erreurs de mesure (résolution du codeur, fréquence d'échantillonnage des mesures).

Les erreurs systématiques du premier type peuvent être identifiées et corrigées en utilisant des méthodes de calibrage; celles du second type devront être prises en considération lors de la modélisation de l'odomètre.

✓ Les erreurs occasionnelles qui sont des erreurs liées à la validité des hypothèses qui sous-tendent le modèle de roulement sans glissement du robot sur un sol plan. On peut indiquer les pertes d'adhérence (sol glissant, accélération excessive, virages trop rapides, sol accidenté). Du fait de leur imprédictibilité, les erreurs occasionnelles sont quasi impossibles à compenser sans le recours à des méthodes de positionnement absolu. Martinelli et al. proposent dans [Mart03] une méthode d'estimation de ce type d'erreurs.

Il est courant d'adopter une approche probabiliste pour modéliser les erreurs systématiques. Une analyse des phénomènes physiques à l'origine de ces erreurs étant très difficile à mener, on

considère, en général, que l'écart type sur la mesure de la distance $l(k)$ est constitué d'un terme représentant l'erreur sur la mesure du codeur (de variance σ_q) et d'un terme représentant l'influence des erreurs sur les paramètres, terme modélisé par un bruit blanc dont l'écart type est proportionnel à la distance mesurée ($\varepsilon_o.l(k)$) :

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_q^2 + (\varepsilon_o \cdot l(k))^2} \quad (3-3)$$

En considérant la moyenne de ce modèle simple, il est possible de calculer les écarts types sur l'état $[x(k), y(k), \phi(k)]$ induits par les erreurs sur l'odométrie. Si l'on considère une trajectoire rectiligne et un déplacement constant l entre deux estimations odométriques, on obtient [Opd94] :

$$\begin{aligned} \sigma_\theta(k) &= \frac{\sqrt{2k}}{L} \sigma_o \\ \sigma_x(k) &= \frac{\sqrt{k}}{2} \sigma_o \\ \sigma_y(k) &= \frac{\sqrt{2}}{L} l \sigma_o \sum_{n=1}^k \sqrt{n} \end{aligned} \quad (3-4)$$

On remarque que l'erreur sur la coordonnée $y(k)$ croît plus vite que celle sur $x(k)$. Cela est dû à la corrélation existante entre $y(k)$ et $\phi(k)$. La validité de ces modèles est confirmée par les résultats expérimentaux permettant d'identifier les valeurs des paramètres σ_q (dépendant de la résolution du codeur, typiquement $\sim 10^{-3}$) et ε_o (dépendant de la qualité de construction du robot, typiquement $\sim 10^{-2}$).

2.1.2. Réduction des erreurs systématiques

Dans la pratique, les dérives induites par les erreurs systématiques rendent très peu fiable la localisation par odométrie lorsque le robot a parcouru une certaine distance (de l'ordre d'une dizaine de mètres). Pour réduire l'influence de ces erreurs, une première approche consiste à essayer de les identifier afin d'introduire un terme de compensation dans le processus de localisation. Cette identification, ou calibrage, se fait habituellement en imposant au robot de suivre une trajectoire de référence fixée (par exemple, un carré). En mesurant alors, par un moyen de trajectographie externe, l'écart entre la trajectoire reconstruite par l'odométrie et la trajectoire réelle, il est possible d'observer les erreurs systématiques, et de les corriger. Un exemple de correction de ces erreurs est donné dans [Bore96b]. Une autre approche consiste, lorsque l'on dispose de capteurs extéroceptifs, à utiliser leurs observations afin d'estimer en ligne certains paramètres structurels du robot, tels que le diamètre des roues [Dev93].

Une deuxième approche, visant à réduire les erreurs d'odométrie, consiste à se rapprocher le plus possible des conditions de validité du modèle de roulement sans glissement utilisé dans les équations de l'odométrie [Wan88].

Afin de satisfaire ces contraintes, il est préférable que les roues destinées à l'odométrie soient différentes des roues motrices. Plusieurs systèmes mécaniques mettent en œuvre ce principe : soit des roues très fines situées sur le même axe que les roues motrices [Che95], soit un système de remorque dont les roues sont munies de codeurs (Fer92).

2.2. Localisation par capteurs inertiels

Dans le cas des robots mobiles qui se déplacent sur des sols irréguliers, la localisation par odométrie se révèle trop peu fiable pour être utilisée au niveau de la navigation ou dans des boucles de commande. D'autres principes de mesure de l'état du robot doivent alors être utilisés – par exemple, les mesures inertielles. Les capteurs inertiels utilisés en robotique mobile, notamment en robotique d'extérieur, sont de deux types : les gyromètres qui fournissent une mesure de la vitesse instantanée de rotation, et les accéléromètres, qui fournissent une mesure de l'accélération instantanée en translation. L'association de ces deux types de capteurs constitue une centrale inertielle. On notera que l'obtention de l'orientation du robot nécessite une seule intégration des mesures, comme dans le cas de l'odométrie, alors que la position est obtenue par une double intégration des mesures d'accélération linéaire, ce qui rend l'estimation plus sensible aux bruits de mesures.

En raison de l'importance de ces dérives, les mesures de position et d'orientation estimées à partir de mesures brutes provenant de capteurs inertiels (gyromètres et accéléromètres) sont inutilisables sans un filtrage qui prend en considération une modélisation des termes de dérive.

2.2.1. Modélisation des termes de dérive

Dans [Bar95], on propose de modéliser le biais $\varepsilon(t)$ associé à l'estimation d'une grandeur par un modèle paramétrique non linéaire de la forme suivante :

$$\varepsilon(t) = C_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + C_2 \quad (3-5)$$

où les paramètres (C_1 , C_2 , T) sont caractéristiques du modèle de capteur et de sa localisation sur le robot mobile. Ils sont estimés à partir de mesures expérimentales collectées pour une entrée d'excitation nulle (capteur immobile). Dans [Bar95], pour une centrale composée de trois gyromètres et de trois accéléromètres, les paramètres estimés sont donnés dans le tableau suivant :

Capteur et axe	C_1	C_2	T
Gyro-x	0.0788 °/s	- 0.964 °/s	4.85 min
Gyro-y	0.4469 °/s	- 2.285 °/s	4.15 min
Gyro-z	0.2128 °/s	- 2.924 °/s	3.06 min
Accéléro-x	0.048 m/s ²	- 1.630 m/s ²	21.3 min
Accéléro-y	0.017 m/s ²	- 0.984 m/s ²	0.046 min
Accéléro-z	0.223 m/s ²	- 1.176 m/s ²	220.7 min

Tableau 3-2 : Identification des termes de dérive (extrait de [Bar95])

Le modèle d'évolution de l'erreur est alors représenté par l'équation différentielle :

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_1 + C_2}{T} - \frac{1}{T} \varepsilon(t) \quad (3-6)$$

avec les conditions initiales $\varepsilon(0) = C_2$ et $\dot{\varepsilon}(0) = C_1/T$. En considérant une période d'échantillonnage des mesures T_s , nous obtenons le modèle discret :

$$\varepsilon(k+1) = \frac{T}{T+T_s} \varepsilon(k) + \frac{T_s}{T+T_s} (C_1 + C_2) \quad (3-7)$$

avec $\varepsilon(0) = C_2$

En s'appuyant sur ce modèle d'évolution de la dérive et en supposant que les mesures sont bruitées par un bruit additif v gaussien, décorrélé, de moyenne nulle et de variance σ , il est possible, en utilisant un filtre de Kalman étendu, d'obtenir une estimée de la position et de l'orientation du robot à l'instant k .

2.2.2. Conclusion

L'utilisation de telles techniques de filtrage augmente de manière sensible les performances du système de localisation, principalement en ce qui concerne l'estimation de l'orientation (à titre d'exemple, une erreur de l'ordre de cinq degrés est obtenue au terme d'une dizaine de minutes de déplacement). En ce qui concerne la position estimée à partir des accéléromètres, les performances sont nettement moindres et il est difficile d'obtenir des estimations fiables sur des durées supérieures à une dizaine de secondes. Cela est dû, principalement, à la difficulté de filtrer les erreurs liées aux vibrations du véhicule, mais également à la difficulté de compenser l'influence de la gravité.

Les technologies à faible coût utilisées en robotique ne permettent en général pas de baser un système de localisation uniquement sur des capteurs inertiels.

2.3. Localisation par corrélation entre images

Les capteurs optiques à corrélation exploitent des images du sol acquises généralement par une caméra CCD durant le déplacement du robot. En utilisant une technique de corrélation entre deux images consécutives de la séquence, il est possible de mesurer le mouvement apparent dans l'image, résultant de la projection du mouvement réel. Connaissant la position de la caméra par rapport au sol, il est alors possible de reconstruire une estimée du mouvement réel. Pour souligner qu'il s'agit bien de mesurer des déplacements, cette méthode est souvent appelée odométrie optique ; elle souffre également des dérives inhérentes à toute méthode qui intègre des déplacements élémentaires.

Ces capteurs ont d'excellentes performances dans les gammes de vitesse autour de zéro, ce qui les rend très utiles dans des problèmes de stabilisation en point fixe par rapport au sol, qui sont rencontrés couramment dans des applications de robotique sous-marine ou d'engins aériens de surveillance (hélicoptères, dirigeables). Le principal inconvénient de cette méthode réside dans la nécessité d'avoir des images du sol suffisamment texturées pour permettre un bon fonctionnement de l'algorithme de corrélation; elle est surtout adaptée pour la localisation d'un robot évoluant sur un terrain naturel.

2.4. Localisation absolue

Ce type de localisation requiert une connaissance (à priori ou acquise) de l'environnement d'évolution du robot. Des repères (de type balise ou de type amer) doivent y être déterminés [Ous97]. Des mesures permettent d'obtenir des informations sur les positions relatives du robot et de plusieurs repères en 2D [Lu94] et/ou en 3D [Kle95]. Elles proviennent de différents capteurs. Il peut s'avérer utile de combiner des informations provenant de différents capteurs pour obtenir une connaissance plus appropriée de l'environnement.

2.4.1. Nature des repères

Actifs ou passifs, ils renseignent sur l'environnement avec des modalités de mise en œuvre différentes. Une comparaison est menée qui permettra d'expliquer les choix faits pour notre système.

2.4.1.1. Repères actifs

Il s'agit alors forcément de balises. Celles-ci émettent un signal (onde lumineuse, sonore ...) capté par le robot [Peg91], [Peg93] et [Bra95]. Il contient un code d'identification [Jal92] permettant d'en connaître la position. On peut ensuite, par des méthodes géométriques, déterminer la position du robot par rapport aux balises détectées [Kle92].

Le signal émis peut être continu ou déclenché par le robot. Le traitement est un peu différent puisque dans le premier cas la mesure de distance n'est pas très précise à cause des dérives des horloges internes du robot et des balises. L'avantage d'un tel système est le taux d'échantillonnage élevé.

2.4.1.2. Repères passifs

Ceux-ci se contentent de réfléchir une onde provenant de l'équipement de mesure du robot [Beo95]. Si l'on place un réflecteur artificiel (miroir ou catadioptré par exemple), c'est une balise. On peut imaginer d'y placer un moyen de détermination de la balise (par code barre par exemple). Il est aussi possible de ne pas intervenir sur l'environnement et de se repérer sur des objets y appartenant : ce sont alors des amers. Il est alors beaucoup plus difficile de les différencier séparément les uns des autres; une analyse globale de toutes les mesures faites s'impose. L'avantage de ce type de repère par rapport aux balises actives est le faible coût.

2.4.1.3. Comparaison

Un inconvénient majeur des repères passifs est leur portée. En effet, l'onde de mesure se réfléchit et parcourt deux fois la distance. Elle s'atténue donc plus que dans le cas des balises actives. En revanche, les systèmes actifs sont plus chers.

L'utilisation de balises (actives ou passives) est contraignante de par la transformation de l'environnement qu'elle représente. Mais avec des amers, l'identification devient un problème important qu'il faut traiter globalement (avec l'ensemble des mesures).

2.4.2. Types de mesure

On rencontre deux types de mesure : les distances (télémétrie) et les angles (goniométrie). A chacune correspond une méthode de calcul de la position : multilatération pour la première, triangulation pour la seconde.

2.4.2.1. La multilatération

Elle consiste à déterminer une position à partir d'un certain nombre de distances. En effet, si l'on connaît la distance qui sépare le robot de plusieurs balises, on peut en déduire sa position par l'intersection de cercles (en 2D) ou de sphères (en 3D). En deux dimensions, trois distances d_1 , d_2 et d_3 aux balises B_1 , B_2 et B_3 suffisent sauf cas défavorable (deux balises alignées avec le robot par exemple). L'intersection des trois cercles centrés sur les balises donnent la position M du robot (figure 3.2).

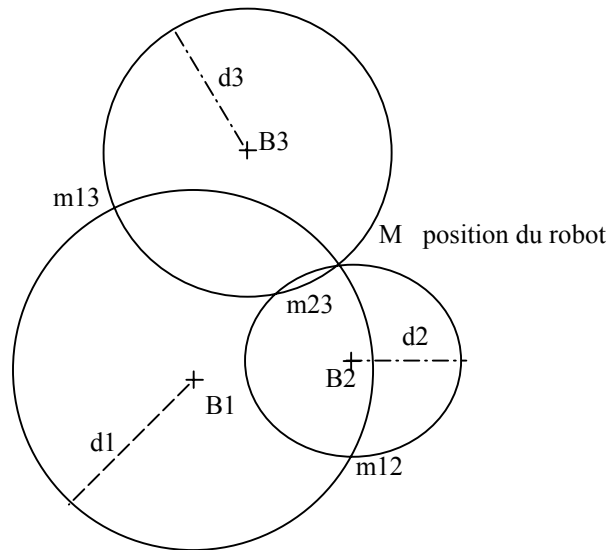


Figure 3-2 : Localisation par mesure de distances robot-balises

Si l'on prend en compte des erreurs de mesure apparaissant à cause d'une précision finie des capteurs, il faut alors considérer des faisceaux de cercles et leur intersection. On obtient ainsi une zone dans laquelle le robot est situé (Figure 3.3).

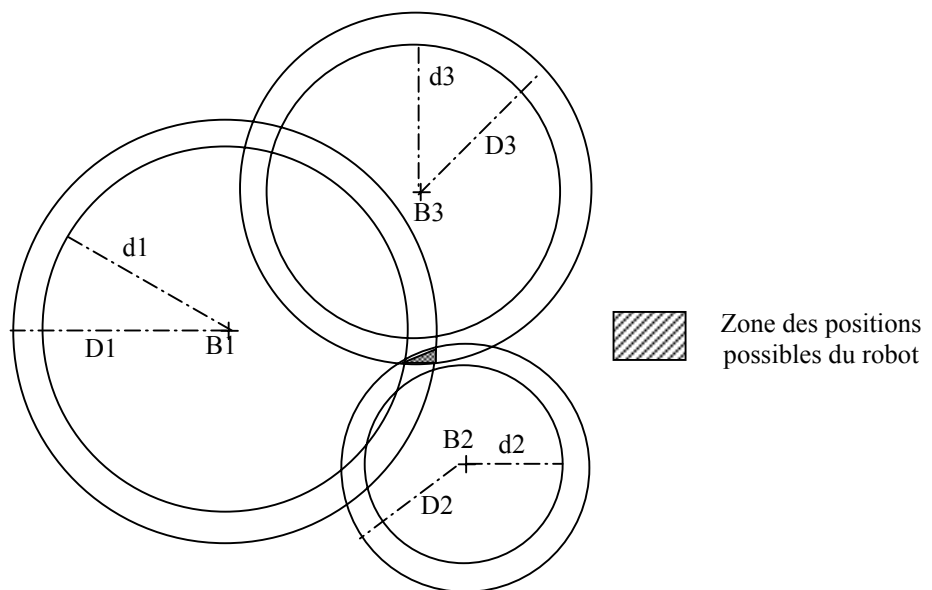


Figure 3-3 : Localisation par mesures réelles de distance à des repères connus.

2.4.2.2. La triangulation

Dans ce cas les mesures utilisées sont goniométriques. Elles peuvent être effectuées grâce à un capteur rotatif embarqué sur le robot ou encore grâce à une caméra panoramique. Deux cas sont possibles : soit l'on dispose de mesures d'angles de gisement absolues et deux balises suffisent [Bet97] (sauf cas défavorable où le robot et les deux balises sont alignés), soit les mesures d'angles ne sont que relatives et il faut trois balises [Mad98] (sauf cas d'alignement de deux balises et du robot).

3. METHODES DE NAVIGATION

3.1. Navigation à l'estime

Elle consiste à déterminer la position par l'intégration de mesure de vitesse ou d'accélération. Les capteurs fournissant ces données sont les odomètres pour la mesure de vitesse ou des variations de position et les accéléromètres ou gyromètres pour des mesures d'accélération.

3.1.1. Navigation par odométrie

Les odomètres sont présents sur l'ensemble des robots mobiles à roues. Cette technique peu coûteuse consiste à fixer sur les roues des codeurs délivrant une impulsion toutes les fractions de tour de roue. L'intégration de ces valeurs permet de déduire la position et l'orientation du mobile par rapport à l'initialisation des compteurs d'impulsion. Comme mentionné plus haut, cette technique délivre des mesures peu fiables dans le temps.

3.1.2. Navigation inertielle

Les techniques inertielles (accéléromètres, gyromètres) plus coûteuses constituent le haut de gamme des systèmes de localisation à l'estime. La connaissance de la position référencée à l'origine du déplacement nécessite une double intégration de l'accélération. Ces calculs entraînent une inévitable accumulation d'erreurs qui constitue une dérive d'estimation dans le temps. Un recalage périodique est alors indispensable.

La technique de localisation à l'estime présente l'immense avantage d'être indépendante de l'environnement. Les seules erreurs qu'elle peut générer sont celles dues à son mode de fonctionnement interne. Par contre, l'inconvénient majeur est l'accumulation d'erreurs due aux différentes intégrations.

3.2. Localisation absolue sur balises

La localisation absolue consiste à déduire de la perception d'éléments caractéristiques de l'environnement la position du mobile. Ces éléments appelés balises se classent en deux catégories :

- Celles qui sont introduites dans l'environnement avec pour objectif de participer à une mesure de localisation : ce sont les balises réelles [Sli01a], [Pra01];
- Celles qui sont déduites de caractères particuliers de l'environnement lui-même (coins, arêtes de mur...) : ce sont les balises virtuelles [Sar89], [Leo91].

3.2.1. Localisation par trois balises

Ce système est constitué [Tsu84]:

- De trois balises passives (rétro réflecteurs) situées sur trois points du référentiel dont les coordonnées sont connues.
- D'un faisceau laser tournant situé sur le mobile.
- D'un récepteur du faisceau réfléchi par les balises proches de la source de lumière.

Trois angles sont ainsi déterminés lors d'une rotation complète de l'émetteur.

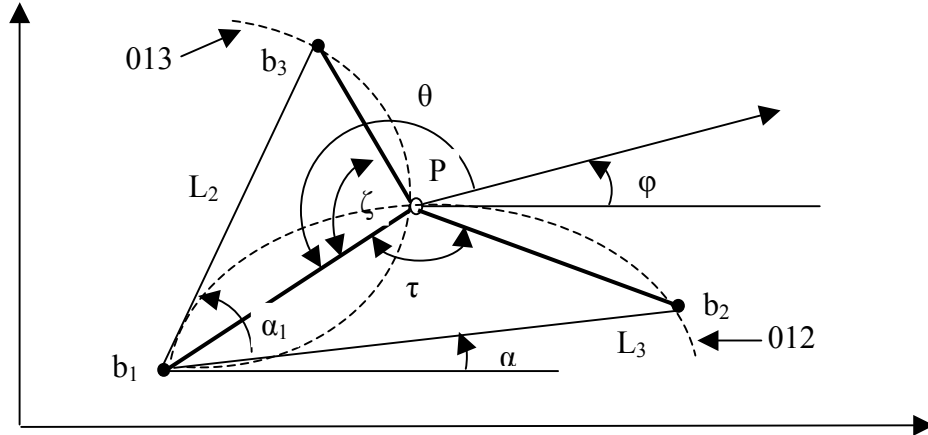


Figure 3-4 : Représentation des différents angles

$$\begin{aligned} \text{Centre 012} \Rightarrow \quad X_{12} &= X_1 + L_3 \sin (\alpha + \zeta) / 2 \sin \zeta \\ Y_{12} &= Y_1 - L_3 \cos (\alpha + \zeta) / 2 \sin \zeta \end{aligned} \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned} \text{Centre 013} \Rightarrow \quad X_{13} &= X_1 + L_2 \sin (\alpha + \alpha_1 + \xi) / 2 \sin \xi \\ Y_{13} &= Y_1 - L_2 \cos (\alpha + \alpha_1 + \xi) / 2 \sin \xi \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\begin{aligned} X_p &= X_1 + K (Y_{13} - Y_{12}) \\ Y_p &= Y_1 - K (X_{13} - X_{12}) \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\text{Avec } K = \frac{2 (X_{12} Y_{13} - X_{13} Y_{12})}{(X_{12} - X_{13})^2 + (Y_{12} - Y_{13})^2} \quad \text{et} \quad \Phi = \Pi + \arctg \left(\frac{Y_p - Y_1}{X_p - X_1} \right) - \theta_1 \quad (3-11)$$

En statique, les erreurs sur la position sont de l'ordre de plus ou moins 2 cm et sur l'orientation de plus ou moins 5 minutes d'arc [Nis86] pour une distance entre balises de 50 m. Lorsque le mobile est en mouvement, la détermination des trois angles n'est pas effectuée simultanément.

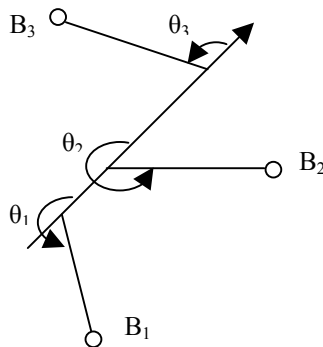


Figure 3-5 : Localisation par trois balises

L'estimation de la valeur réelle des angles est réalisée par la méthode des moindres carrés sur les valeurs lues [Tsu86], [Bol96].

Soit θ^i l'angle mesuré au point i de la trajectoire par rapport à une balise et soit λ_i la distance entre le point 1 noté $p^{(1)}$ et le point i noté $p^{(i)}$. L'algorithme consiste à déclarer que la valeur actuelle de θ^i est une fonction polynomiale de la distance λ_i du point 1 au point i tel que :

$$\theta^i = a_0 + a_1 \lambda_i + a_2 \lambda_i^2 + \dots + a_m \lambda_i^m \quad (3-12)$$

En utilisant les données de mesure entre $p^{(1)}$ et $p^{(i)}$ nous avons

$$\Theta = \Lambda a \quad (3-13)$$

avec :

$$\theta = [\theta^1 \ \theta^2 \ \dots \ \theta^n]^T$$

$$a = [a_0 \ a_1 \ a_m]^T$$

$$\text{et } [\Lambda] = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \dots & \lambda_1^m \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & \dots & \lambda_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & \dots & \lambda_n^m \end{bmatrix}$$

L'estimé optimal de a au sens des moindres carrés est donné par :

$$[\hat{a}] = [\Lambda^T \Lambda]^{-1} \Lambda^T \theta \quad (3-14)$$

D'où en connaissant les distances (par odométrie par exemple) entre P^1 et P^i , nous déterminons l'estimé de l'angle θ^1 par l'expression :

$$\hat{\theta}^1 = [\hat{a}][\lambda] \quad (3-15)$$

avec $[\hat{a}]$ le vecteur déterminé ci- dessus

$$\text{et } [\lambda] = [1, \lambda, \lambda^2, \dots, \lambda^m]^T$$

Les angles θ^2 et θ^3 sont estimés de la même manière.

La technique décrite est intéressante pour sa précision et son coût. L'inconvénient tient dans la nécessité d'évoluer dans un environnement sans obstacle afin de ne pas perturber l'émission des signaux lumineux.

Une méthode analogue consiste à transposer l'émetteur / récepteur sur l'environnement et les trois balises sur le mobile. Les informations sur les angles sont émises vers le mobile par liaison radio pour être traitées. Cette technique est plus coûteuse et moins précise que la précédente.

3.2.2. Localisation par deux balises

La localisation par la présence de deux balises [Bas86], [Beo95] consiste à mesurer la distance du mobile aux balises par temps de vol d'une onde acoustique. La position est calculée par triangulation.

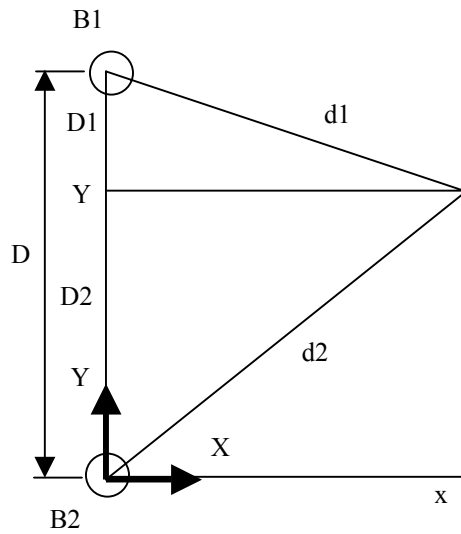


Figure 3-6 : localisation par deux balises

$$y = \frac{D^2 - d_2^2 - d_1^2}{2D} \quad x = (d_2^2 - y^2)^{1/2} \quad (3-16)$$

L'onde acoustique est émise par le mobile. Les balises sont munies d'un récepteur acoustique et d'un émetteur électromagnétique. Lorsque la balise détecte un signal acoustique, elle génère un signal radio permettant au mobile de calculer sa position. La distinction entre les balises est réalisée par différence de fréquence. La portée limite dans l'air est de 25 mètres environ.

3.2.3. Localisation par une balise

Une indétermination est introduite sur la localisation et l'attitude du mobile lors de l'utilisation d'une balise unique. Seule la direction relative au référentiel du mobile peut être évaluée. L'introduction d'informations supplémentaires telle la distance absolue ou la variation de position du mobile est nécessaire.

Dans le premier cas, l'émetteur se trouve soit sur le mobile soit sur l'environnement. La position est déterminée par les coordonnées polaires du faisceau réfléchi. L'angle θ de rotation est mesuré localement ainsi que la distance r par un système télémétrique (mesure du temps de vol ou du déphasage de l'onde lumineuse ou acoustique).

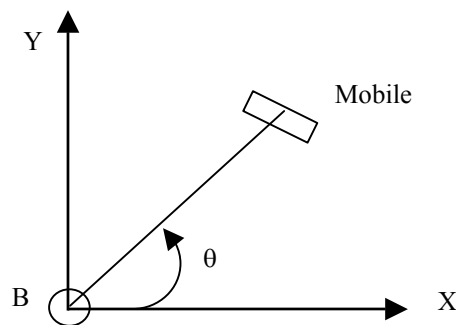


Figure 3-7 : localisation par une balise active

Dans le second cas [Cro87] la position du mobile est estimée en dynamique par un filtrage statistique des mesures angulaires du faisceau réfléchi.

3.2.4. Avantages et inconvénients de la localisation sur balises

Les méthodes de localisation sont très variées mais toujours dépendantes de l'application du robot. La localisation à l'estime est utilisable en environnement extérieur ou intérieur mais la distance de déplacement doit être réduite pour limiter les accumulations d'erreurs. La technique par balisage est employée indifféremment à l'intérieur et à l'extérieur mais contraint le mobile à rester dans une zone prédéfinie.

3.3. Localisation absolue sur cartes de l'environnement

Les robots autonomes disposent fréquemment d'une représentation de l'environnement, dans laquelle il évolue que nous appellerons carte. Une méthode de localisation relative ou absolue consiste à localiser sur la carte l'image perçue par les capteurs d'environnement. Celle-ci est constituée de points d'impacts des capteurs télémétriques optiques ou à ultrasons, d'une représentation d'un ensemble de droites décrites par un faisceau optique ou acoustique tournant ou encore par une nappe laser ou par une image 2D ou 3D recueillie par une ou plusieurs caméras. Le principe de la technique consiste à trouver sur la carte la position du capteur qui donnerait l'information la plus proche de celle acquise par le capteur réel. En connaissant la localisation du capteur sur le mobile, nous pouvons en déduire sa localisation propre. Un des problèmes essentiels de cette technique constitue la gestion des erreurs de mesure. Le filtrage de Kalman intervient là encore fréquemment pour pallier ce problème, mais des techniques de segmentation de l'espace par grille sont également utilisées [Bur96],[Gro01]. A chaque cellule est associée une probabilité d'occupation qui peut dépendre du nombre de fois qu'elle a été déclarée occupée (ou libre), de l'histoire et éventuellement de l'état des cellules voisines. Le second inconvénient constitue le temps de calcul qui est fréquemment long.

Si le robot dispose d'une carte de l'environnement, alors cette méthode semble la plus intéressante. Elle d'identifie à la technique de localisation par balise qui constitue ici la connaissance de l'environnement. Nous pouvons évoquer le terme de balises virtuelles.

La mise en correspondance par carte nécessite la connaissance exacte de la topologie de l'environnement. L'idée maîtresse qui guide la robotique autonome consiste à dire que le mobile construit sa carte au fur et à mesure de l'exploration lui permettant d'évoluer à terme dans des lieux inconnus à l'avance [How96]. Ceci entraîne d'autres problèmes qui sont développés dans [Tom01], [Tom03].

3.4. Localisation par analyse d'images vidéo

L'utilisation de la vision en robotique mobile a toujours séduit les chercheurs du domaine à cause de l'analogie que l'on peut faire avec le système de localisation humain. De plus ce capteur est l'un des plus riches en quantité d'informations véhiculées. En revanche, son utilisation implique un certain nombre de problèmes. Premièrement, une image contient une très grande quantité de données brutes dont seule une partie comporte des informations pertinentes. Dans le cadre d'une application en robotique, il est indispensable de pouvoir identifier les zones

d'intérêt de l'image et de les représenter sous forme d'informations concises. Deuxièmement, l'image représente un environnement 3D sous forme de données 2D. La reconstruction de la notion de profondeur nécessite alors une connaissance pointue de la nature de la transformation reliant les deux domaines.

Le processus classique de localisation grâce à la vision se présente comme une séquence de quatre étapes qui sont :

- Acquisition de l'information capteur. Le robot saisit une image de son environnement à partir de sa position courante.
- Détection de primitives (ou amers). Cette étape correspond généralement aux opérations de traitement d'images telles que l'extraction de contours et la segmentation.
- Mise en correspondance des observations avec le modèle. Trouver, pour chaque primitive de l'image, la primitive correspondante dans le modèle, si elle existe.
- Calcul de la position et de l'orientation de la caméra (donc du robot). Se fait grâce aux correspondances établies dans l'étape précédente.

Un filtrage de Kalman étendu est utilisé dans [Sha97] avec un système de vision omnidirectionnel stéréoscopique pour modéliser des points d'intérêt de l'environnement fournis par des horizontales. Ces points d'intérêt intégrés incrémentalement dans une carte servent à localiser le robot.

3.5. Localisation par système multicapteur

La localisation par un système hybride consiste à fusionner les deux types de localisation, par balise et à l'estime, dans le but de cumuler les avantages et de pallier les inconvénients de chacun pris séparément. Les principaux avantages des systèmes de localisation à l'estime sont le fonctionnement continu ainsi que l'autonomie et les inconvénients sont les accumulations d'erreurs. Les inconvénients des systèmes utilisant des balises sont le fonctionnement non autonome et la perte des balises tandis que l'avantage principal est la précision de la position absolue.

Les techniques de fusion sont multiples mais la méthode de filtrage statistique (filtrage de Kalman) présente de nombreux avantages et est fréquemment employée.

4. LOCALISATION ET MODELISATION SIMULTANÉES DE L'ENVIRONNEMENT

Lorsque la carte de l'environnement du robot n'est pas connue a priori, un module de génération de carte incrémentale doit obligatoirement être intégré au système de navigation. Il s'agit là d'une étape supplémentaire qui consiste à mettre à jour, au fur et à mesure des acquisitions, une représentation du milieu d'évolution du robot [Dis02].

Les méthodes de modélisation incrémentale sont classées en deux grandes familles qui sont fonction du type de représentation choisi :

- ✓ Les méthodes de modélisation métriques, utilisées dans notre travail, qui décrivent explicitement la position géométrique des éléments de l'environnement.

- ✓ Les méthodes de modélisation topologiques [Ran02] basées sur des graphes représentant des informations de plus haut niveau comme certaines places caractéristiques de l'environnement (coins, croisement de deux couloirs, jonctions en T, etc.).

La première catégorie peut être subdivisée en deux sous familles :

- ✓ Les méthodes de modélisation purement géométrique [Seq95] qui gèrent explicitement les positions cartésiennes des primitives cartographiques.
- ✓ Les méthodes probabilistes, appelées encore méthodes de modélisation par grille d'occupation [Gro01], qui décrivent les propriétés métriques par discrétisation de l'environnement en y ajoutant des informations d'incertitude [Bur96].

4.1. Les approches métriques

Les méthodes de modélisation métriques intègre la notion de distance au sein de la carte. Comme nous l'avons mentionné précédemment deux grands types de méthodes métriques se distinguent : les méthodes géométriques et les méthodes probabilistes.

4.1.1. Les méthodes de modélisation géométriques

Ces méthodes de modélisation décrivent explicitement les coordonnées x , y voire z des amers caractéristiques de l'environnement [Le94]. Il s'agit là d'une représentation cartésienne de l'environnement. L'outil le plus couramment utilisé pour gérer la mise à jour de la carte est ici le filtrage de Kalman étendu. En effet l'estimation optimale ou pseudo-optimale au sens de la minimisation du critère quadratique de la configuration du robot peut être étendu à l'estimation des coordonnées (x, y) des primitives cartographiques. En outre cet outil permet de gérer efficacement la notion d'imprécision.

Les précurseurs de ce type d'approche sont là encore Crowley et Durrant-Whyte. Crowley dans [Cro89], propose un algorithme de localisation et de modélisation de l'environnement basé sur le filtrage de Kalman étendu. Les mesures issues de capteurs ultrasonores sont fusionnées avec des données odométriques.

Léonard et Durrant-Whyte dans [Leo92] propose un paradigme de localisation et de mise à jour incrémentale de carte basé sur le filtrage de Kalman étendu. Là aussi des capteurs ultrasonores et des odomètres sont utilisés. Cependant l'étude porte sur une mise à jour incrémentale d'un niveau sémantique plus élevé que précédemment puisque les primitives gérées sont de type RCD (Region of Constant Depth). Le formalisme adopté permet de quantifier les erreurs sous forme d'ellipse d'imprécision.

Le filtrage de Kalman étendu est aussi utilisé dans [Sha97] avec un système de vision omnidirectionnel stéréoscopique pour modéliser les points d'intérêt de l'environnement fournis par des horizontales. Ces points d'intérêt intégrés incrémentalement dans une carte servent à localiser le robot.

Le filtrage de Kalman étendu pour les approches géométriques n'est pas obligatoirement utilisé. Nous pouvons dans ce cadre citer les travaux de Yagi [Yag95] qui à l'aide du capteur de

vision omnidirectionnel COPIS modélise l'environnement sous forme de polygone [Aro98]. Les points correspondent aux amers verticaux et les liens entre les points aux secteurs de niveaux de gris appariés. Dans la même optique les extrémités des segments sont gérés au sein de la carte dans [Gon94].

Tout comme pour la localisation le filtrage de Kalman étendu est un formalisme efficace permettant de fournir une estimation précise, mais il possède l'inconvénient de diverger en cas d'erreur sur l'estimation odométrique.

4.1.2. Les méthodes de modélisation basées sur des grilles d'occupation

Ces méthodes sont basées sur une discrétisation de l'environnement sous forme de grille. Chaque élément de la grille est une cellule qui fournit bien sûr la position d'un amer mais aussi une information sur la probabilité d'existence de l'amer. Ce type de méthode est robuste, mais possède l'inconvénient d'être relativement lourd d'un point de vue mémoire.

La précision est évidemment limitée à la résolution de la grille. Précisons que cette résolution conditionne aussi le coût en temps de calcul : plus cette résolution sera forte, plus les temps de calcul seront importants.

Les premiers travaux à avoir intégré ce type de représentation sont ceux de Moravec et Elfes [Mor88], [Elf87]. Dans ces travaux des capteurs à ultrasons sont utilisés et permettent de déterminer l'état d'une cellule (occupé, indéterminé, libre) en fonction d'un modèle de l'erreur de mesure. Ces travaux ont été et étendus dans de nombreuses autres études tels que [Sch94], [Ols99], [Duc01], [Cou03] et [Mak03].

Burgard dans [Bur96] utilise une grille de probabilité pour représenter l'environnement mais il l'utilise aussi pour se localiser en tirant partie d'informations odométriques et ultrasonores.

Plus récemment, Pagac et Durrant-Whyte dans [Pag98] ont affiner la modélisation sous forme de grille de probabilité en utilisant un modèle décisionnel de fusion et d'intégration de données basées sur la théorie de Dempster-Shafer.

Enfin des travaux récents et porteurs ont été proposés par Fox et Thrun [Fox99], [Thr99], [Thr00] qui se proposent de gérer le paradigme de localisation et modélisation sous forme de grilles probabilistes avec des processus de Markov. Les capteurs utilisés pour reconstruire l'environnement sont des capteurs à ultrasons. Une quantification robuste et fine du modèle d'erreur de mesure est obtenu avec des réseaux de neurones. Le système est globalement vu comme étant entropique et des algorithmes d'optimisation sont utilisés pour augmenter la robustesse du module de génération de carte. La méthodologie développée ici a permis d'obtenir une grande précision de la représentation cartographique sur des environnements de grandes tailles.

Globalement nous avons pu constater que les approches permettent de gérer une représentation de l'environnement avec plus ou moins de précision. Ces cartes intègrent un nombre limité de caractéristiques, comme par exemple une quantification de l'imprécision pour les méthodes géométriques, ou la notion d'état d'une cellule pour les grilles. Pour pouvoir gérer

des caractéristiques de plus haut niveau, telles que la notion de coins, de jonctions, il est nécessaire d'utiliser un type de représentation plus descriptif : l'approche topologique.

4.2. Les approches topologiques

Les méthodes de modélisation topologiques permettent de monter en niveau sémantique par rapport aux représentations précédentes. Le principe est ici de décrire l'environnement sous forme de graphes qui représentent la connectivité entre des lieux caractéristiques et prépondérants de l'environnement au sens de la navigation. Ces lieux doivent correspondre à des places fortes permettant de localiser le robot de façon sûre, robuste et précise. Elles sont généralement significatives d'une densité forte d'amers naturels observables. Ces configurations privilégiées de l'environnement pourront par exemple décrire des coins, des croisements de couloir ou des jonctions en T.

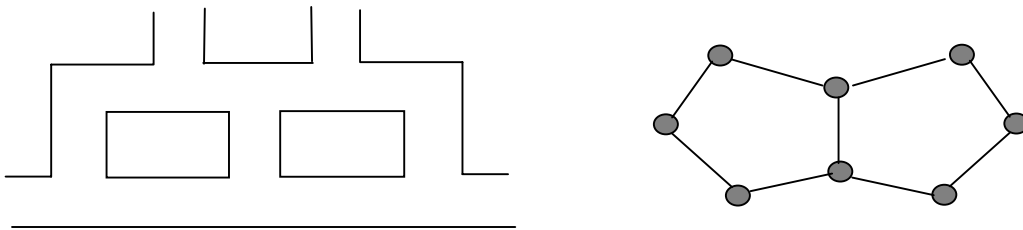


Figure 3-8 : Exemple d'environnement et graphe correspondant

Le modèle construit ici est un graphe dont les nœuds représentent des régions distinctes de l'environnement et les segments ou arcs représentent les chemins entre ces emplacements caractéristiques. Pour se localiser, le robot a seulement besoin de savoir sur quel connecteur il se déplace en quittant une place. Cependant il doit être capable de distinguer facilement les places.

Tout comme le filtrage de Kalman dans les représentations géométriques, le graphe de Voronoï est un outil fortement utilisé pour les représentation topologiques [Nag98], [Ran02]. Un diagramme de Voronoï est défini de la manière suivante :

Soit $S = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$ un ensemble de points du plan. La cellule de Voronoï Cells (p_i) est la région du plan contenant les points r qui sont plus proches de p_i que de n'importe quel autre point $p_j \in S - \{ p_i \}$. Le diagramme de Voronoï VOR (S) est la réunion des Cells (p), pour tous $p_i \in S$.

Thrun dans [Thr98] propose une modélisation hybride métrique-topologique. La carte topologique permet de corriger les désalignements obtenus sur la carte métrique après des déplacements cycliques du robot. Les désalignements sont ici significatifs des erreurs cumulatives sur un trajet important. La carte topologique sert à répertorier les places significatives de l'environnement telles que des coins par exemple. La mise en correspondance de ces places significatives non étiquetées permet de corriger les désalignements dans la carte métrique.

Les systèmes de vision sont des systèmes privilégiés pour construire des graphes de zones significatives au sens de la navigation. Des méthodes propres au traitement d'image permettant

d'établir des corrélations fortes entre des images et une base de données pourront dans ce cadre être utilisées pour déterminer les places significatives. Ainsi l'analyse en composante principale est utilisée par Parra [Par99] pour sélectionner des points d'intérêt dans des séquences d'images. La vision omnidirectionnelle, particulièrement bien adaptée dans ce cas de figure, est aussi utilisée dans [Ran02] où un système de localisation reposant sur une représentation topologique est proposé. Là encore, la méthode repose sur la comparaison de l'image perçue par une caméra panoramique avec des images appartenant à une base de données représentatives des différents lieux de l'environnement.

4.3. Remarques sur les méthodes de modélisation

Les deux types de méthodes de modélisation que nous avons présentées ont des avantages et des inconvénients. Les approches métriques dites probabilistes, sont robustes et relativement efficaces. En outre elles permettent de répondre au problème de divergence lié à l'utilisation du filtrage de Kalman étendu dans des approches dites géométriques. En revanche elles possèdent le gros désavantage d'être lourdes en temps de calcul et limitées en précision. L'autre problème de ces méthodes est leurs niveaux sémantiques faibles qui globalement se limitent à une certitude sur l'existence d'une cellule. La deuxième approche quant à elle permet justement d'intégrer une description de plus haut niveau que dans les approches métriques, ceci en intégrant la notion de places significatives au sens de la navigation. Ces lieux caractéristiques, ainsi que les liens entre ces lieux sont généralement gérés dans un graphe, d'où une combinatoire moindre et une optimisation du paramètre mémoire pour le stockage des données. En outre la quantification précise des contraintes géométriques entre ces places significatives, par exemple pour des petits déplacements du robot, s'avère être un problème.

Nous pouvons finalement constater que ces deux approches sont complémentaires. Il est donc intéressant de pouvoir associer ces deux types de représentation dans un module de génération de carte. Cette approche complémentaire, que l'on peut qualifier d'approche hybride, est de plus en plus intégrée dans des travaux récents [Thr98], [Gass99], [Tom03]. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité d'une telle approche.

5. CONCLUSION

Le paradigme de localisation et modélisation incrémentale de l'environnement nécessite de s'intéresser obligatoirement aux éléments de la chaîne de perception que sont les capteurs, les méthodes de localisation et celles de modélisation. C'est ce que nous avons fait de façon la plus synthétique possible dans cette partie de notre travail. Les constats pouvant être dégagés quant à ces trois modules sont multiples.

Par rapport aux systèmes de perception utilisés en robotique mobile, deux familles de capteurs peuvent être utilisées, comme ça a été discuté au chapitre précédent. C'est pour cette raison qu'un système de navigation sera généralement basé sur l'exploitation des informations sensorielles émanant de ces deux catégories de capteurs. Nous pouvons étendre cette remarque à la problématique spécifique qu'est la perception du milieu d'évolution du robot : l'emploi d'un unique capteur extéroceptif pour cette mission sera généralement insuffisant. Ainsi l'association de plusieurs capteurs extéroceptifs, qu'ils soient complémentaires ou redondants, permet

d'obtenir un modèle sensoriel robuste et hautement descriptif. Enfin parmi les capteurs extéroceptifs à privilégier, les systèmes de vision omnidirectionnelle semblent être particulièrement adaptés pour le problème de la navigation en robotique mobile. Un système de perception embarqué efficace et robuste sera généralement fondé sur la coopération de plusieurs capteurs.

Des remarques similaires peuvent être amenées sur les méthodes de localisation. Les deux grandes familles de méthodes, relative et absolue, possèdent chacune des avantages et des inconvénients. C'est pour cette raison qu'une grande partie des systèmes de navigation intègre les deux solutions pour donner lieu à des algorithmes de recalage de l'estimation odométrique par l'estimation absolue. Là encore, parmi toutes les méthodes décrites, un système de localisation se démarque par rapport aux contraintes de robustesse, de précision et de gestion temps réel imposées par la navigation des engins mobiles : il s'agit de celles basées sur le repérage de balises artificielles. Néanmoins, le manque de flexibilité de ces méthodes est un inconvénient relativement lourd. Une solution pouvant être dégagée consiste à développer des méthodes de localisation qui se basent sur des amers naturels les plus observables possibles. Ainsi, la notion de balises naturelles verticales est à même de répondre à ce problème d'observabilité au sens de la perception, et est donc par la même en mesure d'augmenter de manière significative la robustesse de l'étape de localisation. La coopération de capteurs adaptés à la détection de ce type de balises naturelles, par exemple les systèmes de vision omnidirectionnels, sera de nature à renforcer cette robustesse.

La localisation sans connaissance à priori nécessite d'intégrer un module de construction incrémentale de carte. Nous avons pu remarquer que quelque soit la catégorie de méthode de modélisation employée, l'étape de localisation est indissociable de cette mise à jour. En d'autres termes, toute erreur sur l'estimation de la configuration du robot aura une influence sur celle commise lors de la mise à jour. Cette forte interaction est d'ailleurs à la base du constat, souvent fait dans les travaux portant sur cette problématique, qui souligne les phénomènes d'erreurs cumulatives sur des longs trajets.

6. TRAVAUX SUR LA LOCALISATION

La localisation relative est incarnée en robotique mobile d'intérieur par l'odométrie. Elle est maintenant présentée dans le détail, puis d'autres techniques de localisation absolue sont plus largement étudiées. Elles évitent une dérive incontrôlée du robot.

6.1. La localisation relative : étude de l'odométrie

L'odométrie est un système simple, peu coûteux et facilement réalisable en temps réel. Le désavantage de l'odométrie est son accumulation non bornée d'erreurs. Il existe deux types d'erreurs d'odométrie : les erreurs systématiques, à incréments et donc non bornées, et les erreurs non systématiques.

Les erreurs systématiques ont plusieurs sources : diamètres des roues inégaux, moyenne des deux diamètres différente du diamètre nominal, mauvais alignement des roues, incertitude sur la longueur de l'entraxe, limitation de la résolution des codeurs et limitation de la fréquence d'échantillonnage des codeurs. Elles aboutissent à une accumulation non bornée de l'erreur de

position. Une méthode de prise en compte de ce type d'erreurs est présentée dans [Bor96b] et [Mart01].

Les erreurs non systématiques proviennent de trajets sur un sol inégal, du passage sur des objets inattendus sur le sol ou d'un dérapage des roues dû à un sol glissant, à une accélération trop importante, à un tournant trop brusque, à des forces externes et ou à un contact non ponctuel. Martinelli propose dans [Mart02a], [Mart02b] une méthode d'évaluation de ces erreurs.

Des erreurs sont introduites par le mode de calcul de la position. En effet, le mouvement est approché par une succession de segments de droites. La précision de cette approximation dépend du rapport entre la fréquence d'échantillonnage et la vitesse du robot. Dans le cas étudié, la période d'échantillonnage est inférieure à dix millisecondes et la vitesse à un mètre par seconde. Dans ces conditions, cette erreur est négligeable devant les autres.

6.2. Travaux réalisés

La position au début de l'exécution de la trajectoire est connue et les mesures de rotation des roues (odométrie) permettent d'évaluer approximativement la position du robot. Les figures suivantes montrent clairement la divergence des positions odométriques :

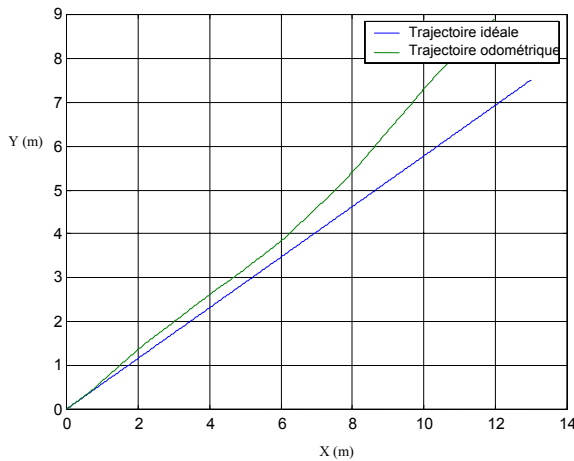


Figure 3-9 : Exemple 1

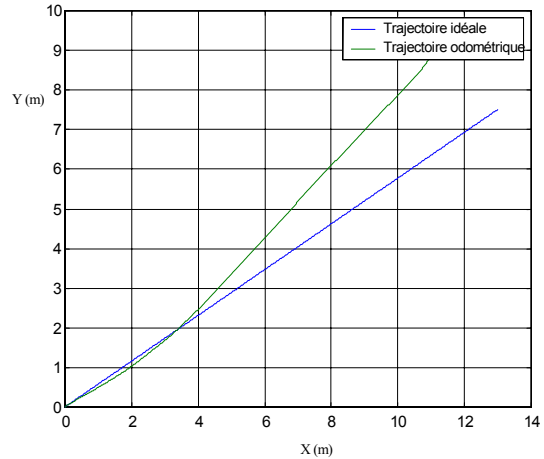


Figure 3-10 : Exemple 2

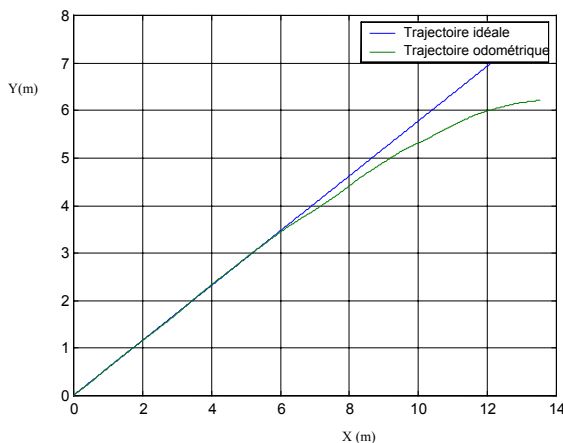


Figure 3-11 : Exemple 3

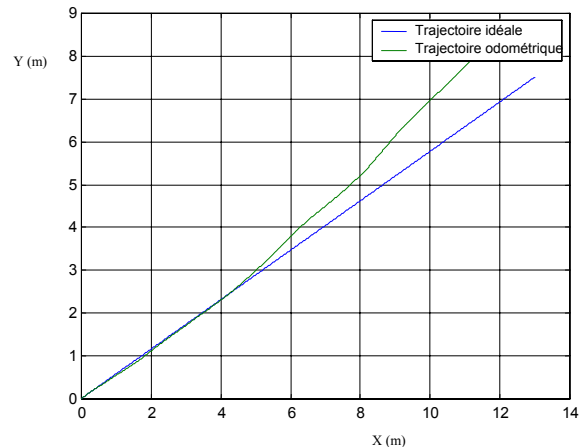


Figure 3-12 : Exemple 4

Les erreurs d'accumulation selon les différents paramètres de localisation sont représentées sur les figures suivantes :

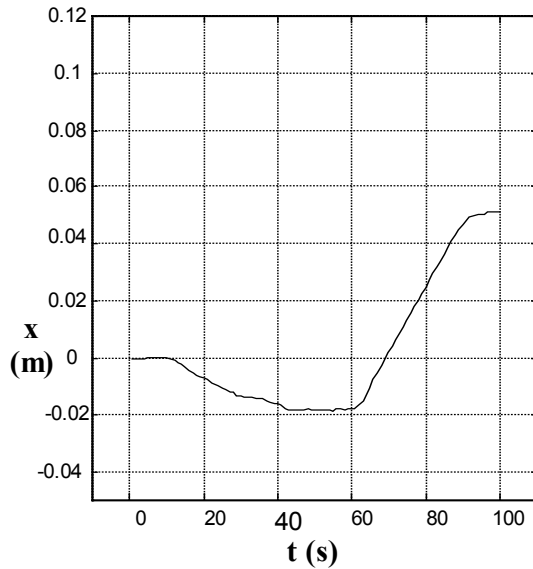


Figure 3-13 : Erreurs d'accumulation sur X

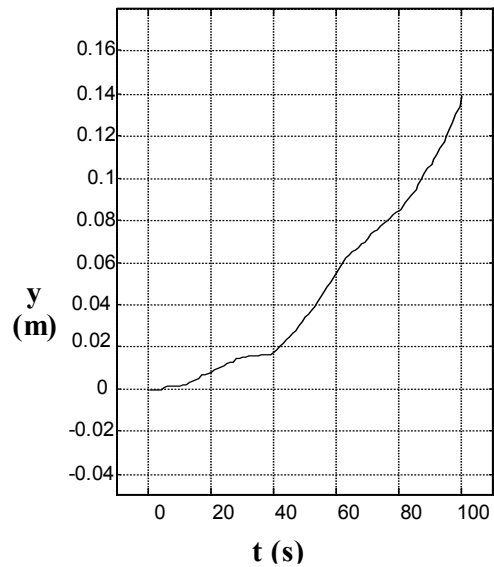


Figure 3-14 : Erreurs d'accumulation sur Y

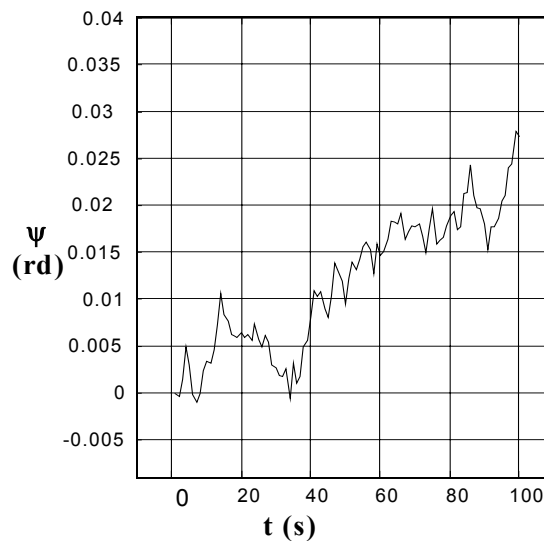


Figure 3-15 : Erreurs d'accumulation sur Ψ

6.3. La localisation globale

6.3.1. Introduction

La localisation des robots mobiles est un thème de recherche ouvert puisque aucune méthode globale n'est susceptible de générer des algorithmes suffisamment robustes, rapides, et fiables pour être appliqués à tous types de problèmes. Notre travail sur ce thème nous a conduit à envisager deux approches selon que l'on veut déterminer le lieu du robot au début d'une trajectoire ou que l'on veut contrôler l'exactitude des déplacements en cours de mouvement.

L'environnement dans lequel le robot se déplace est partiellement connu et représenté par un ensemble de balises parfaitement positionnées, et le robot est muni de capteurs à ultrasons.

6.3.2. Dispositif utilisé

Le dispositif réalisé, détaillé dans [Sli01b], utilise un réseau de balises ultrasoniques disposées dans l'environnement permettant d'extraire, à fréquence régulière, deux informations de positions. La connaissance de la trajectoire suivie entre deux acquisitions de position permettra de déterminer l'orientation du robot mobile

Une mesure des temps de vol des salves ultrasoniques permet de connaître les distances robot-balises (figure 3-11) à une fréquence de 1 Hertz. La position du robot mobile est alors déterminée par un calcul rapide utilisant une méthode de triangulation. L'orientation du robot est établie à partir de deux ou plusieurs relevés de positions de la trajectoire suivie.

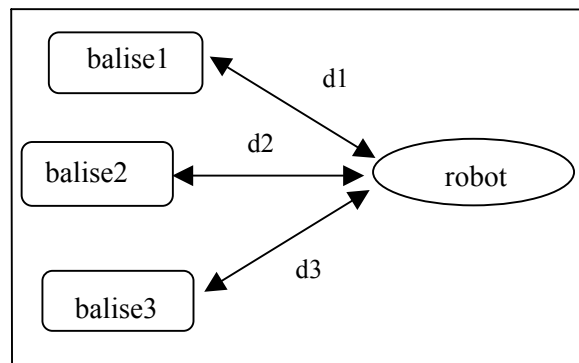


Figure 3-16 : Principe de la localisation.

La disposition des balises dans l'environnement est telle qu'à chaque instant toutes les balises puissent recevoir les salves ultrasoniques émises par le robot mobile. Si les balises sont implantées sur la limite de l'air de navigation, deux balises suffiront alors pour déterminer, sans ambiguïté la position du robot. La disposition de balises en surnombre dans l'environnement permettra une comparaison des mesures, donc une amélioration de la précision de la localisation. La distance robot - balise correspondant à la portée maximum du système est fixée à 30 m ce qui garantit un temps de vol des salves ultrasoniques inférieur à 0,1s. Pour limiter l'utilisation des bandes H.F. une seule fréquence est occupée pour la transmission des accusés de réception des balises vers le robot. Le problème des conflits associés à la réception de plusieurs accusés de réceptions simultanés est résolu en associant à chaque balise un délai dans la transmission de cet accusé. L'ajout des balises permet l'augmentation de l'air de navigation, il entraîne cependant une diminution de la fréquence des localisations. Un temps de 0,1s est en effet associé à chaque balise.

6.3.3. Détermination de la position

A partir des données provenant de la carte embarquée sur le robot qui sont les trois temps de vol associés aux balises, on détermine les différentes distances qui séparent les balises du robot

mobile. Connaissant les coordonnées des trois balises $B_1(x_1, y_1)$, $B_2(x_2, y_2)$, $B_3(x_3, y_3)$ dans le repère de travail et les distances d_1, d_2, d_3 on peut déterminer les coordonnées du robot.

Le robot est situé à l'intersection des trois cercles c_1, c_2 , et c_3 définis par :

c_1 : cercle de diamètre d_1 et de centre (x_1, y_1)

c_2 : cercle de diamètre d_2 et de centre (x_2, y_2)

c_3 : cercle de diamètre d_3 et de centre (x_3, y_3)

On a donc les équations des cercles suivantes:

$$\begin{aligned} X^2 - 2x_1X + x_1^2 + y^2 - 2y_1Y + y_1^2 &= d_1^2 \\ X^2 - 2x_2X + x_2^2 + y^2 - 2y_2Y + y_2^2 &= d_2^2 \\ X^2 - 2x_3X + x_3^2 + y^2 - 2y_3Y + y_3^2 &= d_3^2 \end{aligned} \quad (3-17)$$

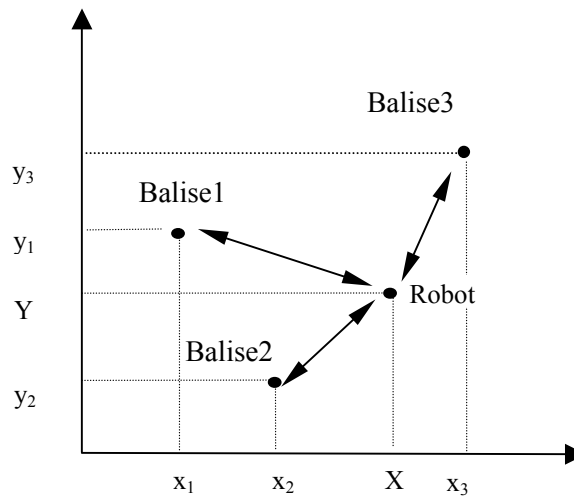


Figure 3-17 : Détermination des coordonnées du robot

Comme on peut le constater deux équations suffisent pour la détermination des points d'intersection. Le point réel est le point d'intersection qui vérifie la troisième équation.

Après le deuxième test on exprime une deuxième position du robot (X', Y') et on peut calculer alors l'orientation du robot à l'aide de l'équation suivante :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Y' - Y}{X' - X} \quad (3-18)$$

Figure 3-18 : Détermination de l'orientation du robot

6.3.4. Travaux réalisés

La procédure de localisation consiste alors à calculer le temps de vol des différentes salves ultrasonores. Ces temps de vol nous permettent d'avoir les différentes distances balises-robot et par une procédure de triangulation, on obtient les différentes coordonnées du robot dans le repère global. L'environnement est modélisé par un ensemble de balises parfaitement positionnées représentant les amers de l'espace occupé: le modèle global. Les informations de distance délivrées par les capteurs U.S. sont enregistrées dans le modèle local qui représente ponctuellement l'espace libre autour de la position supposée du robot (initialisée par la position odométrique ou par les capteurs ultrasonores eux même). A ce niveau un critère de vraisemblance permet d'écarter les mesures aberrantes, c'est à dire celles pour lesquelles l'écart entre la mesure (point du modèle local) et le lieu de l'obstacle (balise) est trop grand.

Concernant la carte de calcul du temps de vol, on prend des résultats pratiques mesurés à partir de nos circuits et l'on étudie les erreurs de précision. On pose les balises dans différents endroits et on mesure la distance qui les sépare du robot mobile avec une règle de mesure pour avoir la valeur réelle. Ensuite on fait une comparaison de cette valeur avec la valeur obtenue par notre circuit et on obtient le graphique suivant :

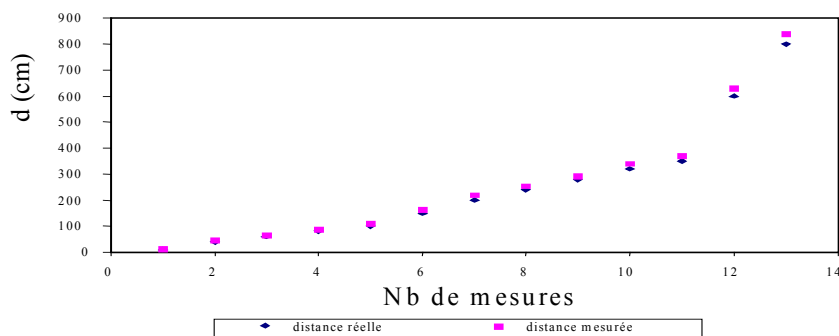


Figure 3-19 : Exemples de mesures de distances

D'après ces résultats on peut calculer l'erreur de mesure ainsi que la précision de notre circuit. Pour la détermination des paramètres de la localisation, on place les balises dans différents endroits et on recueille grâce à la carte réalisée les différentes distances. Une mesure de ces distances est faite en parallèle à l'aide d'une règle graduée et nous permet d'avoir les positions réelles du robot. Les distances obtenues expérimentalement sont exploitées grâce au programme réalisé et nous permettent d'avoir par simulation les différentes positions du robot. On obtient les résultats suivants :

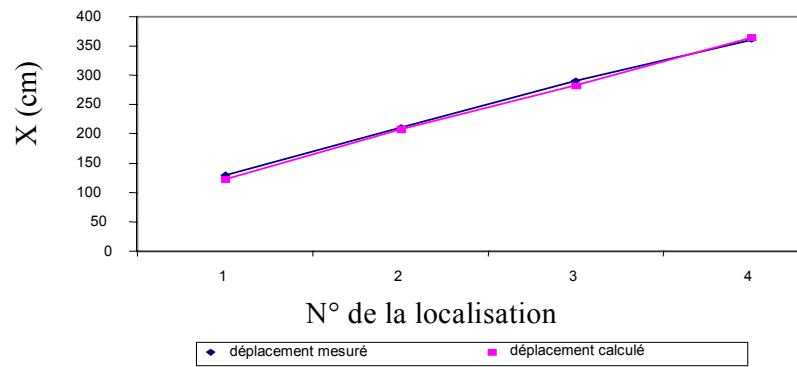


Figure 3-20 : Erreur de position le long des X

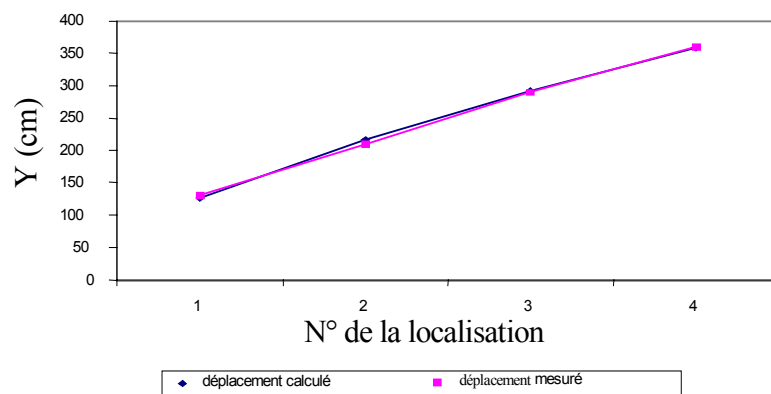


Figure 3-21 : Erreur de position le long des Y

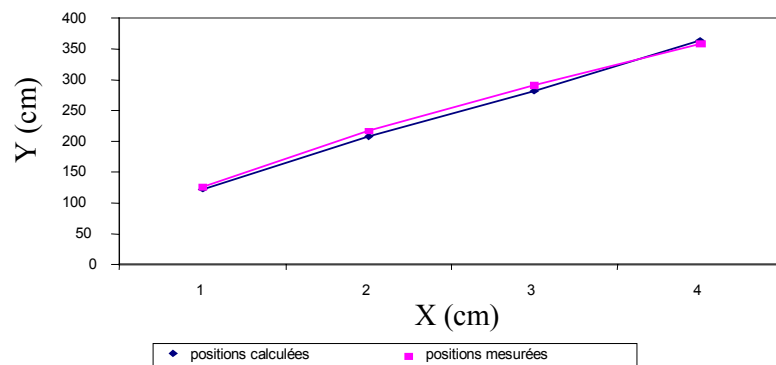


Figure 3-22 : Erreur de localisation dans le plan xoy

7. CONCLUSION

Dans les sections précédentes, nous avons présenté brièvement la problématique de la localisation en robotique mobile ainsi que l'éventail d'approches et de techniques utilisées pour l'effectuer. Nous nous sommes ensuite focalisés sur la localisation dans un environnement typiquement d'intérieur en utilisant deux techniques différentes. La première, basée sur l'odométrie qui est un système de localisation relative par excellence, dépend de l'origine et possède une erreur non bornée dans le temps mais elle est très simple à mettre en œuvre et permet un très haut niveau d'échantillonnage. Les résultats obtenus montrent clairement l'évolution des erreurs de pose sur de longs parcours. A l'inverse, la deuxième technique de localisation utilisée est à erreur bornée mais est beaucoup plus lourde à implanter et ne permet que des niveaux d'échantillonnage limités. Cependant elle peut être astucieusement utilisée en cas d'avarie de l'odométrie. Il faut noter aussi que les résultats obtenus sont meilleurs, sous certaines contraintes de l'environnement d'évolution, et que la portée est très réduite.

De plus la précision de la localisation est conditionnée par deux facteurs essentiels qui sont la connaissance des caractéristiques du milieu dans lequel se propage l'onde acoustique et les erreurs liées au dispositif et à la discrétisation de la mesure de temps. Pour le premier facteur on sait que la vitesse de propagation d'une onde acoustique dans l'air est liée à la température par la loi suivante :

$$V = 331.4 \sqrt{\frac{t}{273}} \text{ m/s} \quad (3-19)$$

avec t: température de Kelvin

Ainsi la variation de la vitesse de propagation de l'onde acoustique est sensible à la température et représente une variation d'environ 9 m/s pour un échelon de température de 20 à 30 °C. Compte-tenu de la portée de notre système, la variation de la mesure, dans la même plage de température est pratiquement nulle, la mesure étant effectuée dans un environnement où la température est uniforme et connue. Restent les erreurs liées au dispositif qui sont dues aux différents retards introduits par les dispositifs de remise à zéro des compteurs, les filtres, les détecteurs d'impulsions et les dispositifs de discrétisation du temps qui sont les horloges. Une évaluation de cette erreur est possible en tenant compte du cheminement de l'information à travers les éléments constituant la chaîne de traitement des signaux. Les retards de discrétisation du temps, sont quant à eux, dépendants des horloges qui alimentent le compteur. Ils sont d'autant plus faibles que la fréquence des horloges est élevée. Les résultats expérimentaux et de simulation obtenus sont acceptables pour une utilisation hors ligne, pour une utilisation en temps réel le système diverge rapidement et cela suite à la disposition des balises dans l'environnement de travail. En effet pour une meilleure précision de la localisation du mobile, il faut que toutes les balises soient dans le cône d'émission de l'émetteur.

Une tentative de fusion de ces deux approches utilisant l'odométrie avec une ceinture de capteurs ultrasonores est proposée dans [Ous96], [San97].

C HAPITRE 4

Algorithmes de localisation

1. INTRODUCTION

La localisation d'un robot mobile permet de connaître à chaque instant les coordonnées (X, Y, Ψ) représentant la position et l'orientation du robot par rapport à un référentiel lié à l'environnement. Ces coordonnées sont nécessaires pour maintenir le robot sur la trajectoire et le diriger vers sa destination. Cependant cette localisation est fortement tributaire de la qualité du système de perception. Lorsque celui-ci fournit des mesures fiables et précises, la littérature propose des méthodes opérationnelles. En revanche, la contrainte de coût de la robotique de service impose l'utilisation de capteurs de moins bonne qualité (US, odomètre, caméra). Dans ce cadre, la localisation d'un robot mobile reste un problème ouvert. Des techniques de fusion multisensorielle telles que le filtrage de Kalman, la théorie du flou, et celle de l'évidence offrent des solutions aux traitements des données incertaines, non fiables et imprécises.

L'un des principaux problèmes en robotique mobile est la localisation précise d'un robot mobile dans un environnement connu ou partiellement connu. En effet, la capacité de se localiser est le préambule minimal pour toute application robotique, quel que soit son degré de complexité. Malheureusement, l'imprécision des capteurs odométriques, comme ça a été discuté précédemment au chapitre trois, ne permet pas un positionnement suffisamment correct du robot. Les recherches actuelles portent donc sur l'utilisation de capteurs infrarouges, ultrasonores, laser ou de vision pour mesurer des distances par rapport à des objets connus de l'environnement et affiner ainsi la position grossièrement obtenue par les capteurs odométriques. On parle alors de localisation absolue par opposition à la localisation relative qui n'utilise que des informations de vitesse et d'accélération intégrées sur le temps et pour laquelle l'imprécision augmente progressivement.

Les méthodes classiquement utilisées pour la localisation absolue sont basées sur des approches probabilistes utilisant plusieurs capteurs redondants ou complémentaires, d'où la fusion multicapteur [Dub92], [Rou97] et [Sli02].

2. LA FUSION MULTISENSORIELLE

2.1. Introduction

La fusion multisensorielle a été initialement développée surtout dans un contexte militaire pour des objectifs tels que la localisation des cibles ennemies, la fusion d'images radar, l'autonomie de véhicules mobiles, etc.... Les méthodes employées ont recours à des techniques diverses issues de l'intelligence artificielle, l'estimation stochastique, la reconnaissance de formes, etc....

Dans un système multicapteur, la fusion permet :

- de compenser les limites d'un capteur par les observations d'autres capteurs ;
- d'exploiter l'effet de redondance des informations capteurs. On obtient ainsi un renforcement ou un affaiblissement des informations suivant qu'elles s'accordent ou non ;
- d'exploiter l'effet de complémentarité des données en considérant que certains domaines peuvent être observés par un capteur, mais pas d'autres.

Quoique le concept de fusion de données soit relativement récent dans la littérature scientifique, il est utilisé depuis fort longtemps dans la nature : ainsi les animaux exploitent l'information auditive et visuelle pour se protéger contre d'éventuels risques courants. De même, pour localiser un emplacement quelconque, ils combinent plusieurs images visuelles des endroits avoisinant le lieu considéré.

On peut trouver dans la littérature plusieurs manières de classer les différentes étapes ou type de fusion. Cette différence provient principalement du niveau où l'opération de fusion est accomplie, de l'objectif de cette opération, du type de sources (ou capteurs) et de l'application considérée.

On peut par exemple reprendre la classification générale proposée par Dasarathy [Das97] qui considère trois principaux niveaux de fusion :

- au niveau des données (ou des pixels en traitement d'images). Dans ce cas, la fusion est la combinaison des signaux issus d'un groupe de capteurs pour obtenir un signal de même nature mais de qualité supérieure. La procédure de fusion est souvent considérée comme une étape d'estimation. Comparée aux autres niveaux de fusion multicapteur, la fusion niveau signal exige le plus grand degré de concordance temporelle et spatiale entre les données sensorielles. Si les signaux des capteurs ne sont pas synchronisés, ils sont mis en concordance temporelle par la prédiction de leurs valeurs à un instant donné;
- au niveau des caractéristiques (ou des symboles), la fusion permet de combiner, avec le niveau d'abstraction le plus élevé, les informations provenant de plusieurs capteurs. Elle est probablement le seul moyen de combiner des informations hétérogènes ou des informations correspondant aux régions distinctes de l'environnement. Les symboles utilisés sont issus du traitement des informations fournies par les capteurs ou sont le résultat d'un processus de raisonnement symbolique. Ce processus utilise des connaissances à priori sur l'environnement, c'est-à-dire des sources d'informations extérieures au système. Un symbole représente une prise de décision sur un aspect particulier de l'environnement. Cette décision est généralement prise en mettant en correspondance les primitives dérivées des informations sensorielles avec un modèle;

- au niveau de la décision, la fusion est utilisée pour augmenter la vraisemblance qu'une primitive extraite des données fournies par un capteur correspond réellement à un aspect important de l'environnement ou pour créer de nouvelles primitives composites. Une primitive simple est créée en attachant une signification sémantique aux résultats de traitement des données sensorielles (spatiales et/ou temporelles) tandis qu'une primitive composite est obtenue par la combinaison des primitives déjà existantes.

Il faut noter cependant qu'il y a souvent ambiguïté dans le langage utilisé dans la mesure où on peut considérer soit l'entrée, soit la sortie du dispositif de fusion. On peut ainsi avoir en entrée-sortie différents cas tels que, par exemple, données → données, données → caractéristiques, caractéristiques → caractéristiques, caractéristique → décision et décision → décision. Il est bien évident par ailleurs que ces niveaux peuvent s'enchaîner.

Un exemple du premier niveau peut être un système télémétrique à plusieurs capteurs dont la sortie (après fusion) est une donnée numérique la plus représentative, obtenue, par exemple, par la moyenne (ou moyenne pondérée) de toutes ou de certaines données.

Pour le second cas, on peut citer, par exemple, un système télémétrique dont la sortie est cette fois-ci une entité géométrique tel que coin, mur, arête,...

Pour le troisième, à partir de la reconnaissance de certaines caractéristiques de l'environnement, on décide d'une action à entreprendre (parmi un certain nombre d'actions possibles) pour le robot.

Dasarathy a également évoqué un quatrième niveau qui est la fusion temporelle, c'est à dire la fusion de données acquises à des temps différents. Ce niveau de fusion ne se situe pas dans la même hiérarchie que les trois précédents, parce qu'en réalité la fusion temporelle peut aussi bien intervenir au niveau des données qu'au niveau des caractéristiques ou de la prise de décision.

Du point de vue des techniques employées, le premier niveau utilise par exemple des méthodes d'estimation stochastique où la valeur renvoyée est une valeur numérique : moyennes, moyennes pondérées, moindres carrés, filtre de Kalman dans le sens où celui-ci effectue aussi une moyenne pondérée tout en minimisant la variance de l'état du système, estimateurs à maximum de vraisemblance, etc.... Les approches s'appuyant sur l'utilisation d'un filtre de Kalman permettent la prise en compte des caractéristiques statistiques du bruit de mesure. L'avantage de ce type de méthode est de fournir, en plus de l'estimation de l'état optimal, la variance de l'erreur d'estimation. Cependant, certaines contraintes sont nécessaires pour l'utilisation de ce type de filtre, comme par exemple sur les caractéristiques du bruit, comme ce sera démontré par la suite. Il s'applique surtout à la résolution des systèmes linéaires. Dans le cas de systèmes non linéaires, comme c'est le cas pour notre modèle, la solution peut être obtenue à l'aide d'un développement de Taylor au premier ordre au voisinage de la solution, permettant de linéariser le problème [Aya89].

Le deuxième niveau utilise principalement des techniques de reconnaissance de formes, de classification de données, de regroupement (clustering), etc...

Pour le troisième, on peut citer comme méthodes appropriées :

- les méthodes d'analyse d'hypothèses multiples telles que les inférences bayésiennes où, le plus souvent, l'hypothèse maximisant la probabilité à posteriori est retenue. L'approche bayésienne a fait l'objet de nombreux travaux en fusions d'informations [Mos02]. Cette méthode définit l'appartenance d'un objet à une classe avec un minimum d'erreur et évalue le risque de décision à prendre. Une généralisation du théorème de Bayes permet l'estimation de l'état d'un paramètre à partir de plusieurs observations de celui-ci [Ber88];
- les tests de comparaison de moyennes et de variances permettant de valider une constatation expérimentale sur le choix d'une hypothèse particulière ;
- la méthode de Dempster-Shafer où, par exemple, chaque hypothèse se trouve supportée par un ensemble focal et la décision se portera sur l'ensemble focal ayant la plausibilité ou la crédibilité maximale (ou une combinaison convexe des deux). Dans cette théorie, les raisonnements sont effectués à partir de deux critères et non un seul (la crédibilité et la plausibilité), qui permettent de représenter à la fois l'incertitude et l'imprécision ce qui constitue donc une généralisation. L'imprécision et l'incertitude sont deux termes souvent abusivement confondus. L'imprécision concerne le contenu de l'information et porte donc sur un défaut quantitatif de connaissance sur une mesure, tandis que l'incertitude est relative à la vérité d'une information caractérisant sa conformité à la réalité.

Des techniques récentes de filtrage non linéaire [Mur99], [Mon03] basées sur les méthodes de Monte-Carlo (le filtrage particulaire, les techniques de bootstrap, les algorithmes de condensation, etc.) présentent des perspectives intéressantes quant à leur intégration dans un système multi-capteurs. En effet, la prise en compte optimale des données issues de plusieurs capteurs nécessite le plus souvent le traitement de fortes non linéarités de modèles, ce que ne permettent pas les techniques utilisant le filtrage de Kalman étendu.

2.2. Etapes de la fusion

Pour un niveau hiérarchique donné, l'opération de fusion s'effectue en plusieurs étapes [Hal97] :

- i) Alignement : les observations ou les données sont ramenées dans un même référentiel spatial et temporel.
- ii) Corrélation : détermination des relations entre les différentes données.
- iii) Association ou mise en correspondance : chaque mesure se trouve associée à l'entité correspondante (le résultat de l'étape de corrélation est évidemment utilisé). Cette étape permet aussi de rejeter les données aberrantes suivant un critère sur la matrice de covariance ou autre.
- iv) Combinaison : seules les données obtenues après alignement et qui sont en accord avec l'étape d'association sont combinées pour obtenir une meilleure représentation de l'estimation correspondante à l'attribut avec lequel i) a été réalisé. On notera par ailleurs que l'étape ii) peut être imbriquée à l'intérieur de iii). Par conséquent, trois étapes de fusion sont nécessaires pour toute opération de fusion : alignement, mise en correspondance (ou association) et combinaison. On utilisera également les notions suivantes :

2.3. Modèles de fusion

- fusion statique [Dur91] : quand le résultat de l'opération de fusion est obtenu indépendamment des états antérieurs. On exploite alors uniquement les données de l'instant courant.
- fusion dynamique [Ado01], [Bur97] et [Fox98] : quand le résultat tient compte des états antérieurs. Tout processus de fusion ayant une formulation itérative rentre dans ce contexte. Cette fusion peut être située au même niveau que la fusion temporelle.

Dans le cadre de ce travail, nous envisageons l'étude et la mise en œuvre de méthodes de fusion multisensorielle appliquées à la localisation d'un robot mobile. Celui-ci évolue dans un environnement d'intérieur partiellement connu. Le terme intérieur fait référence à un environnement structuré composé d'un ensemble fini d'éléments (balises) parfaitement positionnés.

Notre objectif principal est d'étendre les domaines d'application de la robotique mobile en proposant des solutions peu onéreuses. La contrainte de coût impose l'utilisation de capacité de traitement et de perception limitées. Les algorithmes à développer doivent être robustes à des données imprécises tout en restant de complexité moyenne afin de satisfaire la contrainte du temps réel. Parallèlement au développement d'algorithmes de fusion de données, des cartes sont réalisées afin d'évaluer leurs efficacités dans des conditions réelles.

2.4. Mise en correspondance de données

La localisation absolue d'un robot mobile peut être obtenue par mise en correspondance des données fournies par ses capteurs extéroceptifs avec un modèle de référence de l'environnement. Celui-ci peut être construit au préalable par CAO, ou bien être créé et mis à jour en ligne grâce aux mesures des capteurs du véhicule. Plusieurs facteurs rendent la tâche de localisation absolue très délicate à réaliser : les incertitudes et imprécisions des données (erreurs de mesure ou d'interprétation, artefacts, retards induits par les temps de calcul), la mauvaise connaissance du modèle d'environnement (présence d'obstacles inconnus a priori, environnements dynamiques...). La tâche de localisation comporte généralement deux étapes : une prédiction de la nouvelle situation du robot et de l'incertitude associée (étant donné les mesures odométriques), puis une mise à jour de cette estimation à partir du résultat de la mise en correspondance. On distingue essentiellement deux types d'approche, selon le modèle de données utilisé :

- les méthodes utilisant des grilles d'occupation pour lesquelles le système de localisation calcule la probabilité d'appartenance du robot à chacune des cellules de la grille.
- les méthodes basées sur la mise en correspondance d'indices géométriques (points, droites, ...) représentant des éléments caractéristiques de l'environnement.

3. ESTIMATION DE LA POSITION D'UN ROBOT MOBILE PAR ODOMETRIE

3.1. Introduction

Afin de pouvoir se localiser dans un environnement, un robot mobile a besoin de capteurs lui donnant des informations sur sa position absolue dans l'espace d'évolution. Dans un

environnement d'intérieur, les robots mobiles utilisent principalement l'odométrie, basée sur des données proprioceptives ce qui permet par intégration du déplacement, de connaître les coordonnées (X, Y, Ψ) d'un point du robot dans un repère absolu.

Pour cela on utilise un système de mesure relative de position tel que les systèmes inertiels ou les systèmes odométriques (par intégration du déplacement). Pour ce dernier type les erreurs sur le positionnement sont cumulatives. Néanmoins ces systèmes ont, comme ça a été discuté au chapitre précédent, une précision suffisante pour des petits déplacements, les systèmes inertiels sont d'un coût très important, nous utilisons donc un système odométrique. Afin d'estimer la position et l'orientation du robot, ces codeurs optiques sont généralement positionnés sur l'arbre rapide des roues motrices. Cette solution intéressante est néanmoins très sensible aux glissements des roues, ce qui provoque des erreurs importantes sur le positionnement. Pour limiter ces erreurs, certains robots mobiles sont munis de roues étroites et non propulsives, uniquement destinées à l'odométrie [Fer92]. Dans notre cas, les codeurs optiques sont placés sur l'arbre rapide des moteurs à courant continu et permettent leur contrôle en position, vitesse et accélération.

Malheureusement, l'imprécision des capteurs odométriques, due essentiellement au glissement des roues, ne permet pas une localisation suffisamment correcte du robot. Aussi les recherches actuelles portent sur l'utilisation de capteurs infrarouges ou ultrasoniques pour évaluer des distances par rapport à des objets connus de l'environnement [Ben02], [Hop00] et [Han00] ou des capteurs CCD [Kro89], [Ste94] et [Che95] pour identifier des balises naturelles ou artificielles et améliorer la position obtenue approximativement par les capteurs odométriques. On parle alors de localisation globale par opposition à la localisation locale qui utilise des informations de vitesse et d'accélération intégrées sur le temps et dont l'imprécision augmente progressivement. Dans le but d'améliorer le positionnement précis du robot mobile, on propose un système de localisation qui détermine la position et l'orientation d'un véhicule utilisant l'odométrie et les mesures des angles d'azimut des balises dont les positions sont parfaitement connues dans l'espace de travail du robot. Le capteur utilisé dans notre travail est similaire à celui utilisé dans [Bon96]. C'est une caméra rotative qui peut détecter les balises situées dans l'environnement d'évolution du robot mobile et nous renseigne sur les différents angles d'azimut de ces dernières.

Un filtre de Kalman étendu est appliqué. Des travaux de simulation ont montré les erreurs cumulatives d'odométrie et comment on peut effectivement améliorer la position précise du véhicule par une fusion de capteurs. Nos travaux nous ont permis aussi de montrer comment on peut encore améliorer nos résultats par une augmentation du nombre de balises dans l'environnement de travail. Bien sûr, il faut opter pour un compromis balises/complexité de calculs.

3.2. Détermination de la position par odométrie

Dans la présente section, nous nous sommes intéressés à l'étude de la localisation d'un robot mobile évoluant dans un environnement d'intérieur partiellement connu. L'environnement est composé d'un ensemble de balises précisément positionnées. Nous considérons un robot mobile

à deux roues motrices, montées à droite et à gauche du robot avec leur axe commun passant à travers le centre du robot. Le mouvement du robot est représenté par le déplacement du point milieu M de cet axe. Sur la figure 4-1, le robot se déplace entre deux instants successifs k et $k+1$. La longueur de l'axe est $2h$. La distance parcourue Δd et l'orientation $\Delta\psi$, résultantes du mouvement, peuvent être calculées en fonction des variations des mesures odométriques, obtenues lors des rotations des roues gauche et droite, et de leur rayon r . Soient Δd_d et Δd_g les distances parcourues par les roues droite et gauche respectivement, on a alors :

$$\Delta d_d = (r - h) \Delta\psi \quad (4-1)$$

et

$$\Delta d_g = (r + h) \Delta\psi \quad (4-2)$$

Les variations de distance et d'orientation sont données par :

$$\Delta d = (\Delta d_d + \Delta d_g) / 2 = r \Delta\psi \quad (4-3)$$

$$\Delta\psi = (\Delta d_g - \Delta d_d) / 2h \quad (4-4)$$

Avec Δd la distance parcourue par le robot entre les instants k et $k+1$ et $\Delta\psi$ la variation de l'orientation du robot.

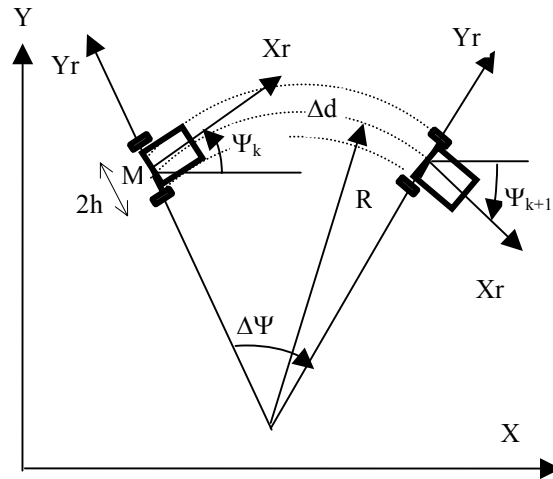


Figure 4-1 : Principe de l'odométrie

Dans un espace à deux dimensions, l'état du robot à l'étape k peut être représenté par le vecteur :

$$X_k = (x_k \ y_k \ \psi_k)^T \quad (4-5)$$

Supposant qu'à l'instant k , le robot est localisé à X_k , on peut calculer X_{k+1} en approximant la trajectoire par une séquence de segments de droites constants de longueur Δd . Considérant ceci et connaissant Δd et $\Delta\psi$, la nouvelle localisation est donnée par :

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \Delta x_k = x_k + \Delta d \cos(\psi_k + \Delta\psi/2) \\ y_{k+1} &= y_k + \Delta y_k = y_k + \Delta d \sin(\psi_k + \Delta\psi/2) \\ \psi_{k+1} &= \psi_k + \Delta\psi \end{aligned} \quad (4-6)$$

Avec : Ψ_{k+1} , X_{k+1} , Y_{k+1} les coordonnées de position et d'orientation du centre d'inertie M qui est supposé se trouvant au point milieu de l'axe des roues à l'instant k+1 dans le repère absolu (O,X,Y).

Le modèle ainsi obtenu est une bonne approximation de la réalité quand $\Delta\psi$ est petit, ce qui requiert que la simple période doit être suffisamment petite par rapport aux vitesses de translation et de rotation du véhicule.

Connaissant le rayon des roues r, on peut écrire les valeurs de Δd_d et Δd_g en fonction du nombre N de points codeurs par tour de roue et des grandeurs ΔN_d et ΔN_g , les nombres de points codeurs entre les instants k et k+1, respectivement des roues droite et gauche :

$$\Delta d = (\Delta N_d + \Delta N_g)(\pi.r / N) \quad (4-7)$$

$$\Delta\psi = (\Delta N_g - \Delta N_d)(\pi.r / N.h) \quad (4-8)$$

Le calcul des paramètres de localisation peut se faire selon l'algorithme suivant:

- Initialisation des variables globales ($x=x_0$, $y=y_0$, $\psi=\psi_0$)
- Attendre l'impulsion de l'horloge temps réel
- Lire les points codeurs N_d et N_g
- Calcul des variations ΔN_d et ΔN_g
- Calcul de l'orientation ψ
- Calcul des coordonnées X et Y
- Endormissement de la tâche

L'odométrie peut être implémentée comme une tâche avec une priorité maximale. Cette tâche tourne en permanence et nous permet de connaître la position et l'orientation du robot, dans un repère de travail fixé à l'initialisation, à chaque impulsion de l'horloge temps réel.

3.3. Erreurs de localisation relative

Décrivons quelques sources d'erreurs.

- Les défauts mécaniques des roues de mesure.

Le manque de précisions du montage des roues de mesure peut induire une excentricité de la bande de roulement. La variation de l'erreur induite est une forme périodique. Cette caractéristique permet de réduire l'erreur sur l'estimation de la position absolue en se basant sur un diamètre équivalent des roues.

- Les défauts de la planéité du sol.

L'odométrie impose un déplacement du mobile tel qu'en ligne droite le mouvement des roues de mesure soit le même. Cette nécessité n'est respectée que sur un plan donc sur un terrain traité(planifié). L'utilisation de l'odométrie sur terrain accidenté (ex : terrain agricole) est difficilement concevable.

- Le glissement.

Le glissement des roues au sol est un problème difficilement maîtrisable. Il provient de plusieurs sources :

- ✓ Lors du démarrage des moteurs, une accélération brusque provoque une rotation des roues sans déplacement ce qui induit des erreurs au niveau de la position et de l'attitude.
- ✓ Lors des virages, la largeur finie des roues impose un inévitable glissement.
- ✓ L'accélération centrifuge entraîne une modification de charge sur les roues. Cette action a pour effet de déplacer le contact au sol par rapport à la roue entraînant une variation de l'entre-axe. Ces erreurs sont particulièrement élevées pour les mobiles munis de pneumatiques classiques. La nature du sol intervient dans l'erreur.

- la discrétisation des calculs.

L'intégration numérique des déplacements élémentaires suppose que la trajectoire suivie entre deux relevés est une droite. Cette approximation entraîne une erreur notamment au niveau de l'évaluation du déplacement élémentaire.

Les erreurs sont limitées par plusieurs techniques :

- Par utilisation de roues de mesure indépendantes.

La première technique consiste à utiliser une roue parallèle à la roue tractrice et mue par le mouvement relatif du sol. Les accélérations n'ont pas d'effet sur la mesure, seul le mouvement réel est enregistré.

- Par estimation du rayon des roues.

Le diamètre des roues n'est pas constant au cours d'un déplacement par le fait de la variation de charge due à l'accélération centrifuge dans un virage ou par la qualité du sol qui impose des déformation aux roues.

Le diamètre réel des roues est :

$$D = D_0 + \Delta d \quad (4-9)$$

Avec Δd la variation du diamètre. TSU 1983 propose la mesure de Δd par un potentiomètre associé à chaque suspension des roues de mesure. Ces techniques améliorent sensiblement les résultats des mesures mais ceci reste néanmoins d'erreurs inacceptables lors de déplacements importants.

4. ALGORITHME DE RECALAGE

4.1. Introduction

Le module de perception joue un rôle essentiel dans l'évolution des robots mobiles vers une autonomie croissante et la localisation est l'une des fonctions essentielles. C'est pourquoi le problème fondamental de la localisation constitue une voie de recherche privilégiée en robotique mobile depuis de nombreuses années. Pour le résoudre on est très souvent conduit à exploiter les mesures fournies par un système multi-capteurs [Dur90], [Pre91], [Del96] et [Jet97].

Les méthodes classiques de localisation absolue reposent sur la triangulation ou consistent parfois à minimiser un critère de type moindres carrés [Bol96], [Bol98], et [Bor03] ou maximum de vraisemblance [Wat90] et [Nis95].

4.2. Présentation du système réel.

En utilisant les lois de la mécanique classique, on peut expliciter l'évolution d'un robot mobile par une équation d'état de dimension finie (4-10). Les données issues du capteur CCD donnent des informations sur cet état et constituent l'équation d'observation (4-11).

$$\dot{x}(t) = F(x(t), u(t)) \quad (4-10)$$

$$\lambda(t) = G(x(t), u(t)) \quad (4-11)$$

Dans cette expressions t est le temps, $x(t) \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $\lambda(t) \in \mathcal{R}^m$ est le vecteur des mesures ; l'entrée $u(t) \in \mathcal{R}^e$ est élaborée par l'organe de décision et est donc connue de lui. On focalise notre travail sur le cas le plus simple correspondant à un véhicule se déplaçant sur un sol plat et mu par l'intermédiaire de roues indéformables.

Le modèle cinématique [Zha92] de mouvement du robot considéré est donné par

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (4-12)$$

Dans cette expression v est la vitesse de translation du point caractéristique M et ω est la vitesse de lacet .

$U = [v \quad \omega]^T$ est l'entrée du modèle cinématique (4-12) et $X = [x \quad y \quad \psi]^T$ représente l'état.

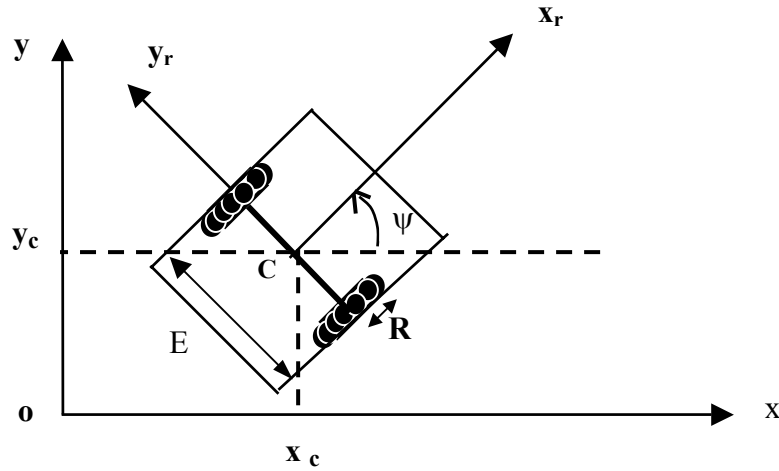


Figure 4-2 : Configuration du véhicule

Dans le cas d'un robot à roues motrices indépendantes où les variables d'actions sont les vitesses angulaires des roues motrices droite et gauche (ω_d et ω_g), on a la relation (4-13) où r est le rayon des roues et $E = 2h$ désigne la voie du véhicule.

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1/h & -1/h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_d \\ \omega_g \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

Le modèle présenté ci-dessus est déterministe car basé sur des hypothèses simplificatrices très réductrices (roues rigides et infiniment minces, pas de glissement ...).

En général, on tient compte de cet aspect approximatif du modèle au travers d'un bruit d'état V que l'on ajoute au membre de droite de l'équation d'état (4-10).

Enfin, comme les dispositifs de contrôle et de traitement sont numériques, l'équation d'évolution, par exemple l'équation (4-12) est généralement présentée en temps discret comme dans (4-14) où $x(n) = x(t_n)$ et V_n est le bruit d'état perturbant l'évolution du système entre les instants t_n et t_{n+1} .

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \\ \psi_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \psi_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\psi_n + \frac{\omega_n(t_{n+1}-t_n)}{2}) & 0 \\ \sin(\psi_n + \frac{\omega_n(t_{n+1}-t_n)}{2}) & 0 \\ 0 & (t_{n+1}-t_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_n \\ w_n \end{bmatrix} + V_n \quad (4-14)$$

Les mesures (encore appelées sorties) du système étudié sont regroupées en deux classes.

- Les mesures proprioceptives qui sont issues de capteurs embarqués (odomètres) et sont des fonctions de l'état et des entrées du véhicule.

Des mesures d'accélération du mobile, de vitesse de translation et de vitesse de rotation en sont des exemples.

- Les mesures extéroceptives qui sont engendrées par l'interaction entre le robot et l'environnement. Elles sont aussi fonction de l'état et éventuellement des entrées du véhicule mais également du milieu dans lequel évolue le robot. Elles servent au recalage absolu du véhicule [Mou91], [Par02]. Ce sont, par exemple, des grandeurs géométriques telles que des distances entre le robot et des repères ou des écarts angulaires par rapport à une référence artificielle ou naturelle telle que le nord magnétique.

Dans notre travail, les capteurs extéroceptifs sont :

- Des capteurs à ultrasons destinés à la détermination de la position initiale du robot mobile et à la détection des obstacles.
- Une caméra CCD linéaire.

Les capteurs proprioceptifs sont :

- Des codeurs optiques incrémentaux ($N=500$) liés aux roues motrices.

Si on se place à un instant particulier noté t_n toutes les mesures ne sont pas forcément disponibles; ainsi la dimension du vecteur observation (4-15) dépend du temps.

$$\lambda_n = G_n(X_n, U_n) \quad (4-15)$$

On prend en compte l'imprécision liée au processus de mesure au travers d'un bruit additif W_n , appelé bruit de mesure (4-16).

$$\lambda_n = G_n(X_n, U_n) + W_n \quad (4-16)$$

Le problème de la localisation se pose en ces termes : à l'instant t_n nous cherchons une estimation de l'état du robot à partir de la connaissance des entrées ($U_0, U_1, \dots, U_{n-1}$) appliquées

au robot et des mesures $(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1})$ disponibles jusqu'à l'instant t_n ainsi que d'un modèle de l'environnement si on utilise des mesures extéroceptifs. Notons que les entrées U_n peuvent être obtenues à partir du système de contrôle ou de capteurs intéroceptifs. Le bruit d'état V_n tient alors compte de la précision avec laquelle l'entrée est connue.

4.3. Equation de mesures

On propose d'installer le capteur CCD au sommet du robot. On se limite à une acquisition séquentielle des angles d'azimut. Les observations asynchrones acquises ne nécessitent pas de prétraitement spécial. Il n'est pas justifié de les ramener dans un même repère. Une étude comparative, décrite dans [Dur96], de recalage avec des données asynchrones et des données asynchrones synchronisées après prétraitement a permis de conclure que les erreurs sont les mêmes et que les performances des deux méthodes sont équivalentes. Un exemple de prétraitement utilisant un modèle de type triple intégrateur est détaillé dans [Dev93].

Les observations sont les angles d'azimut λ_i des balises b_i dont les coordonnées sont (x_i, y_i) . L'équation d'observation ou de mesure permet de relier, pour chaque capteur, la configuration courante du robot à l'observation capteur. Cette dernière est formulée sous forme d'angles entre les directions des balises et l'axe de symétrie du robot tel que :

$$\lambda_i = \text{atg} (y_i - y / x_i - x) - \psi = g_i (x) \quad (4-17)$$

λ_i sont les angles que forment les balises avec l'axe de symétrie du robot mobile et i désigne le nombre de balises dans l'environnement.

On suppose que la projection sur le plan OXY du point milieu de l'entre-axe des roues (M) et l'axe de rotation de la caméra sont les mêmes.

On reconnaît par cette formulation la non linéarité du modèle d'état ainsi que celle du modèle de mesures, ce qui nous amène à utiliser le Filtre de Kalman Etendu. La solution du système consiste à linéariser les équations du modèle d'état ainsi que du modèle de mesure autour du vecteur estimé $\hat{x}(k+1/k)$ en utilisant le Jacobien des modèles d'état et de mesure.

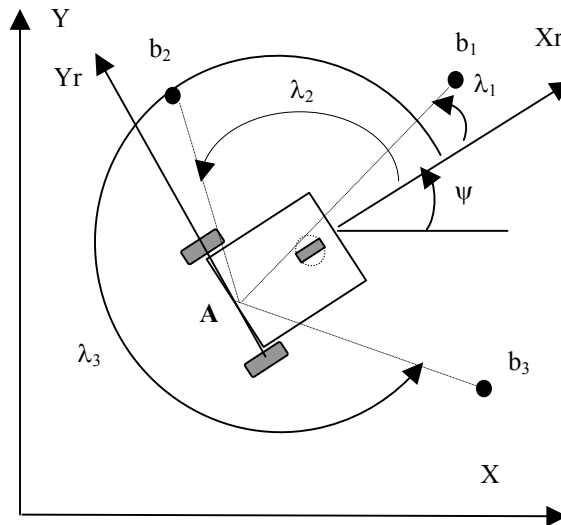


Figure 4-3 : Représentation des angles d'azimut

4.4. Estimation de la position réelle

Par référence à la figure 1, on note la position et l'orientation du robot à l'étape k par le vecteur d'état $X(k) = [x(k) \ y(k) \ \psi(k)]^T$ comprenant une position cartésienne et une orientation définies par rapport à un repère global. A l'initialisation le robot démarre d'une position connue et possède à priori un plan de situation des balises b_i . Chaque balise est supposée être précisément connue. A chaque arrêt, des observations $\lambda_j(k)$ de ces balises sont prises. Notre but dans ce processus cyclique est d'associer les mesures $\lambda_j(k)$ avec la balise correcte b_i pour calculer une nouvelle estimation de la position du véhicule.

La position au départ de l'exécution de la trajectoire est connue ou calculée par le modèle ultrasonore et les mesures des angles de rotations des roues (odomètre) permettent d'évaluer approximativement la position du robot. La procédure de localisation consiste alors à comparer la position détectée par le capteur par les mesures obtenues avec le capteur CCD. Les informations d'angles donnés par le capteur CCD sont enregistrées dans un modèle local qui représente ponctuellement l'espace libre autour de la position supposée du robot (initialisée par la position odométrique). A cette étape, un filtre de Kalman permet de rejeter les mesures incorrectes, celles pour lesquelles la différence entre la mesure (point du modèle local) et la mesure du capteur est considérable. La position du robot est réajustée itérativement dans le but de minimiser la variance d'état du système.

Le filtre de Kalman utilise les deux modèles précédents : le modèle d'état et le modèle de mesures. Le modèle d'état décrit comment la position $X(k)$ du robot change avec le temps en réponse à une entrée de contrôle $u(k)$. Il est supposée perturbé par un bruit blanc gaussien centré v , caractérisé par sa matrice de covariance $Q(k)$, alors l'équation d'état s'écrit :

$$X(k+1) = F(X(k), u(k)) + v(k) \quad (4-18)$$

avec $v(k) \sim N(0, Q(k))$

Où $F(X(k), u(k))$ est une fonction non-linéaire de transition d'état.

Le modèle de mesures exprime les observations capteurs en fonction de la position du véhicule et des angles d'azimut des balises détectées et a la forme suivante :

$$\lambda(k) = g_i(b_i, X(k)) + w(k) \quad (4-19)$$

avec $w(k) \sim N(0, R_i(k))$

La fonction des observations $g_i(b_i, X(k))$ exprime une mesure observée $\lambda(k)$ comme une fonction de la position du véhicule $X(k)$ et de la position de la balise. Cette observation est perturbée par un bruit blanc gaussien et centré w , caractérisé par sa matrice de covariance $R(k)$.

4.5. Présentation de l'algorithme de recalage

Les problèmes rencontrés en robotique mobile ne sont pas attribués aux systèmes de navigation utilisés mais plutôt aux systèmes d'acquisition et d'extraction d'informations. Les informations acquises, traitées puis intégrées sont le plus souvent incomplètes, inconsistantes et imprécises d'où la nécessité d'élaborer des algorithmes de fusion qui auront à gérer ces caractéristiques tout au long de la chaîne de traitement, de la modélisation jusqu'à l'interprétation ou la décision. De nombreux problèmes liés à la perception se posent en fusion et

doivent avoir une solution parfaitement intégrée dans le processus de fusion. Plusieurs méthodes, comme on l'a cité précédemment, peuvent être utilisées pour la fusion de données, à savoir les méthodes classiques, les méthodes liées au traitement non probabiliste de l'incertain, les méthodes dérivées de l'intelligence artificielle et les méthodes d'optimisation. Dans notre cas, on s'intéresse surtout à des méthodes classiques où on utilise des estimateurs récurrents permettant de convertir les données observées en estimations. Le filtrage de Kalman est tout particulièrement bien adapté pour résoudre le problème considéré. L'estimation obtenue est alors le couple $(\hat{X}_{k/k}, P_{k/k})$ composé d'une estimation de l'état à l'instant t_k de sa matrice de covariance. Le filtrage de Kalman met à jour un estimateur $\hat{X}_{k/k}$ qui tient compte de toutes les informations disponibles jusqu'à l'instant t_k considéré et qui minimise la trace de la matrice de covariance associée $P_{k/k} = E \left[(\hat{X}_{k/k} - X_k) (\hat{X}_{k/k} - X_k)^T \right]$ encore appelée erreur quadratique moyenne.

Dans le cas de notre application où les équations d'état et d'observation sont non linéaires, on utilise une approximation qui consiste à considérer ces équations linéarisées autour de l'estimation courante pour pouvoir appliquer les équations du filtrage de Kalman comme dans le cas d'un système linéaire. On parle alors de filtrage de Kalman étendu. Une autre méthode de linéarisation de systèmes discrets non linéaires, utilisant une interpolation avec un filtre non linéaire, est proposée dans [Nar96].

La formulation la plus simple du filtre suppose que les bruits sont centrés, blancs, décorrélés entre eux et de l'état initial et de covariance connue. Le filtre de Kalman étant un outil très important, son développement est brièvement rappelé dans la section suivante. Pour une étude plus détaillée, nous renvoyons le lecteur à [Lab93] et [Gao02].

4.5.1. Le filtre de Kalman étendu

Le but de cet algorithme ou de ce calcul cyclique est de produire une estimation de la position du robot $\hat{x}(k+1/k+1)$ à l'étape $k+1$ basée sur l'estimation de la position $\hat{x}(k/k)$ à l'étape k , de l'entrée de contrôle $u(k)$ et de la nouvelle observation $\lambda(k+1)$ de la balise.

L'algorithme emploie les étapes suivantes: prédiction, observation, mise en correspondance et estimation [Wil76], comme indiqué sur l'organigramme suivant :

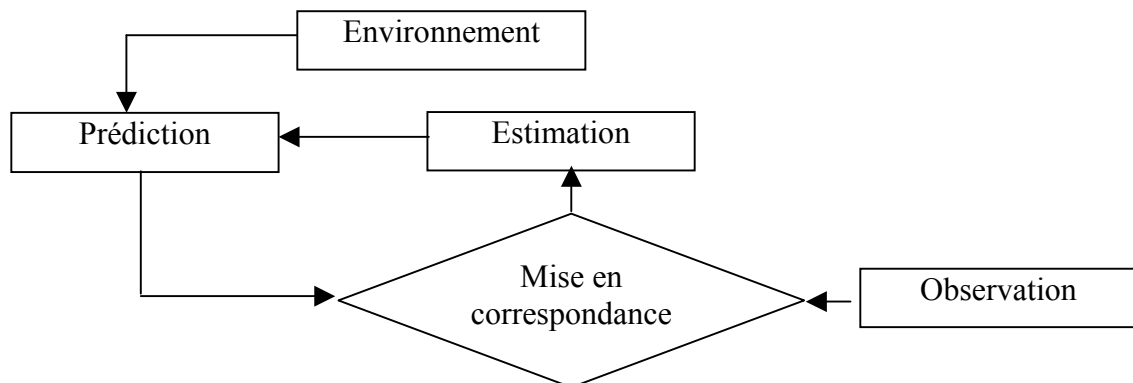


Figure 4-4 : Algorithme de Kalman

4.5.1.1. Phase de prédiction

Dans une première étape, utilisant le modèle d'état à l'instant k et une connaissance de l'entrée de contrôle $u(k)$ (l'équation du modèle d'évolution à temps discret de l'état), nous prédisons la nouvelle situation du robot à l'étape $k+1$:

$$\hat{x}(k+1/k) = F(\hat{x}(k/k), u(k)) \quad (4-20)$$

On calcule ensuite sa matrice de covariance

$$P(k+1/k) = \nabla F P(k/k) \nabla F' + Q(k) \quad (4-21)$$

Où ∇F représente la matrice jacobienne de la fonction F obtenue par linéarisation autour de l'estimé d'état $\hat{x}(k/k)$, $Q(k)$ est la matrice de covariance du bruit d'état et $P(k/k)$ est la matrice de covariance qui fournit l'erreur initiale sur la position et l'orientation.

Sur cette dernière formule, on constate que cette méthode conduit à une accumulation des erreurs, phénomène bien connu. La correction de la prédiction avec des observations permet de diminuer les erreurs accumulées.

Ensuite, à partir de la prédiction de l'état (position prédite du robot) et de l'équation d'observation, on génère les observations prédites (4-22) de chaque balise b_i avec sa précision (4-23).

$$\hat{\lambda}_i(k+1) = g_i(b_i, \hat{x}(k+1/k)), i=1, \dots, n \quad (4-22)$$

$$S_i(k+1) = \nabla \lambda_i(k) \cdot P(k+1/k) \cdot \nabla \lambda_i'(k) + R(k+1) \quad (4-23)$$

où $\nabla \lambda_i(k)$ est le vecteur jacobien de la fonction g_i par rapport à l'état, de la $i^{\text{ème}}$ observation et $R(k+1)$ est la matrice de covariance du bruit d'observation.

4.5.1.2. Phase de mise en correspondance

On doit tester chaque observation capteur $\lambda_j(k+1)$ pour son adhésion dans un champ de validation, pour chaque mesure prédite. Quand une simple observation tombe dans ce champ de validation, elle est retenue. Les mesures qui ne tombent dans aucun champ de validation sont simplement ignorées dans le processus de localisation. L'étape finale est d'utiliser les prédictions validées ainsi que les observations pour calculer $\hat{x}(k+1/k+1)$, la nouvelle position estimée du véhicule.

$S_i(k+1)$ est le résultat de l'empilement des observations validées G_i . Cette validation étant obtenue par une procédure adéquate de mise en correspondance à partir d'un certain seuil e . Ces mesures validées doivent vérifier l'inégalité :

$$V_i(k+1) \cdot S^{-1}(k+1) \cdot V_i'(k+1) \leq e^2 \quad (4-24)$$

Les mesures ne vérifiant pas cette inégalité sont tout simplement ignorées lors du processus de localisation (elles ne sont pas utilisées pour la phase d'estimation).

Le terme $V_i(k+1)$ appelé innovation est défini comme la différence entre l'observation réelle et l'observation prédite.

$$V_i(k+1) = G_i(k+1) - \hat{u}_i(k) \quad (4-25)$$

4.5.1.3. Phase d'estimation

La position prédite est corrigée avec un terme qui est proportionnel à l'erreur de prédiction de l'observation (4-27). La matrice de covariance de l'erreur d'estimation de l'état à l'instant $k+1$ est donnée en (4-28). L'équation (4-26) représente le résultat standard du gain du filtre de Kalman qui s'écrit :

$$W(k+1) = P(k+1/k) \cdot \nabla g^t \cdot S^{-1}(k+1) \quad (4-26)$$

et nous permet de calculer la nouvelle position estimée du véhicule.

$$\hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + W(k+1) \cdot v(k+1) \quad (4-27)$$

avec la variance associée

$$P(k+1/k+1) = P(k+1/k) - W(k+1) \cdot S(k+1) \cdot W^T(k+1) \quad (4-28)$$

Cette formulation du filtre de Kalman nécessite l'inversion de la matrice $S(k+1)$ qui a la dimension du vecteur d'observation. Cependant, si les différentes mesures constituant le vecteur d'observation sont indépendantes, on peut répéter les étapes 4-22 à 4-28 pour chaque donnée, $S(k+1)$ est alors un scalaire.

On peut tester si le filtre de Kalman fonctionne correctement en calculant la covariance de l'écart entre les valeurs mesurées pour la sortie et les valeurs prévues de façon à détecter les écarts pas trop improbables. La divergence du filtre de Kalman peut être due :

- à une mauvaise modélisation de la dynamique du processus (matrices A, B, C mal choisies, hypothèse de linéarité non satisfaite).
- à une sous-estimation du bruit d'état (V_k trop petit).
- à une mauvaise initialisation de $P(k/k)$.

5. TRAVAUX DE SIMULATION ET RESULTATS

Pour éviter une éventuelle dérive lors du déplacement du robot mobile causée par une erreur d'interprétation des coordonnées du point de départ initial, on a été amené à utiliser un système ultrasonore pour la détermination de la position initiale du robot mobile avant de procéder à son évolution. Le modèle de calcul utilisé est la multilatération qui consiste à déterminer une position à partir d'un certain nombre de distances. En effet, si l'on connaît la distance qui sépare le robot de plusieurs balises, on peut en déduire sa position par l'intersection de cercles (en 2D) ou de sphères (en 3D) [Bet97], [Le91]. En deux dimensions, trois distances d_1 , d_2 et d_3 aux balises b_1 , b_2 et b_3 suffisent sauf cas défavorable (deux balises alignées avec le robot par exemple). L'intersection des trois cercles centrés sur les balises donnent la position du robot.

Dans un premier travail, on s'est intéressé à un environnement structuré à l'aide de trois balises. Une trajectoire parfaite a été simulée et l'application de l'algorithme proposé nous a permis d'avoir les résultats représentés sur les figures suivantes :

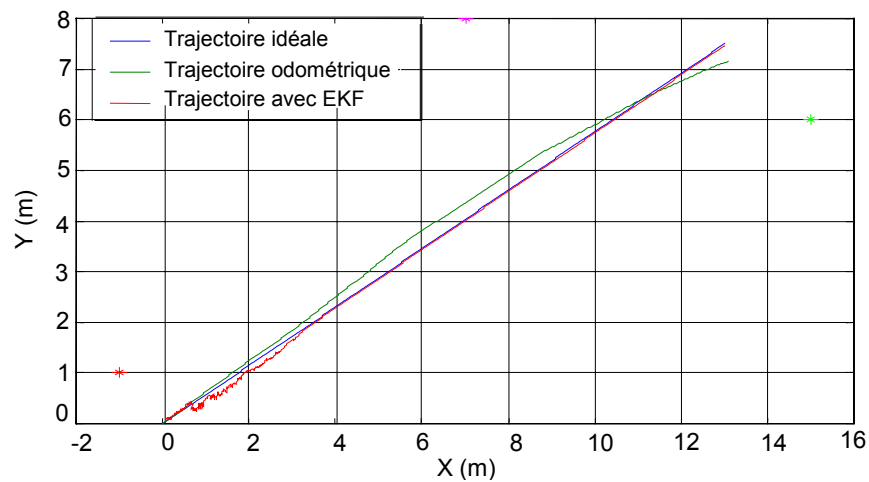


Figure 4-4 : Trajectoires avec et sans correction – Exemple 1

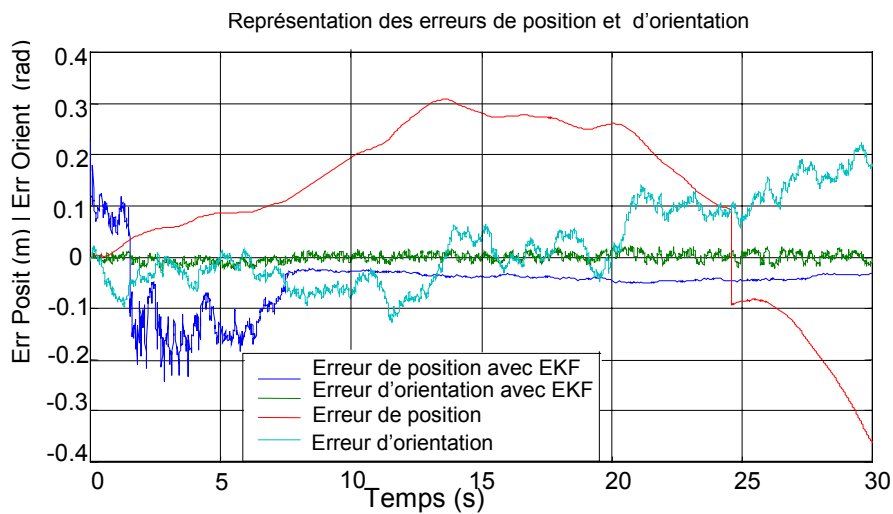


Figure 4-5 : Comparaison des erreurs de localisation pour l'exemple 1

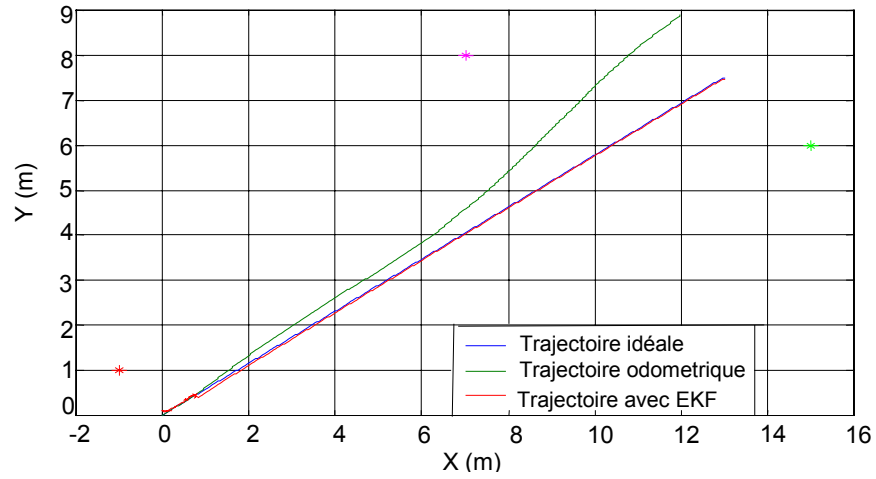


Figure 4-6 : Trajectoires avec et sans correction – Exemple 2

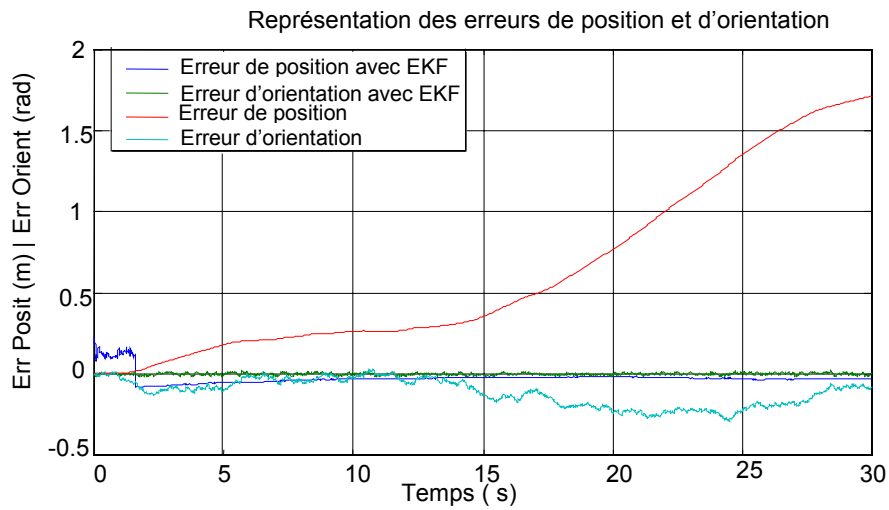


Figure 4-7 : Comparaison des erreurs de localisation pour l'exemple 2

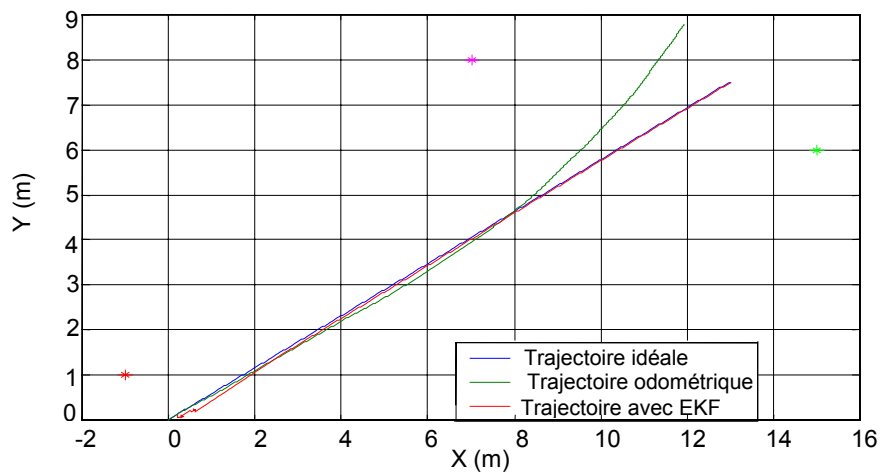


Figure 4-8 : Trajectoires avec et sans correction – Exemple 3

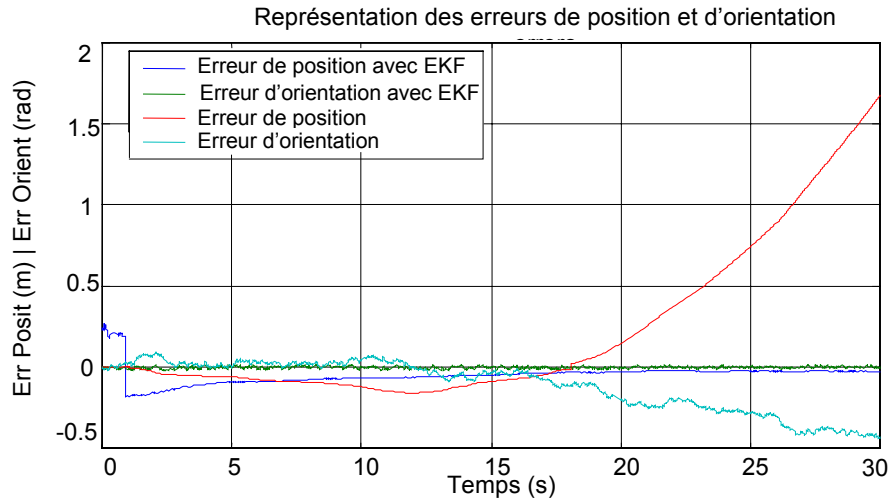


Figure 4-9 : Comparaison des erreurs de localisation pour l'exemple 3

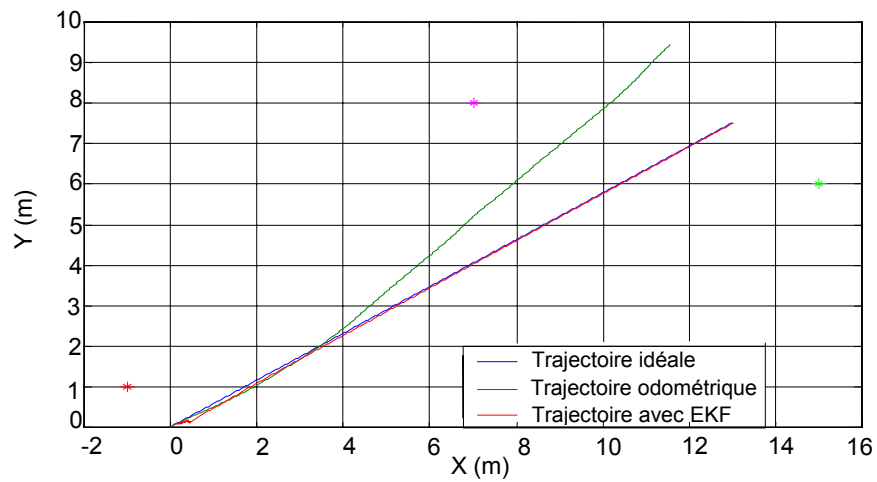


Figure 4-10 : Trajectoires avec et sans correction – Exemple 4

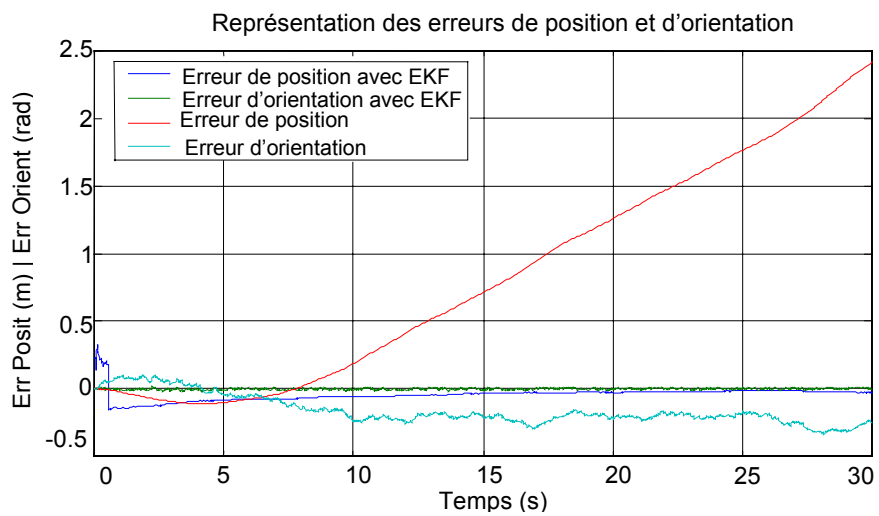


Figure 4-11 : Comparaison des erreurs de localisation pour l'exemple 4

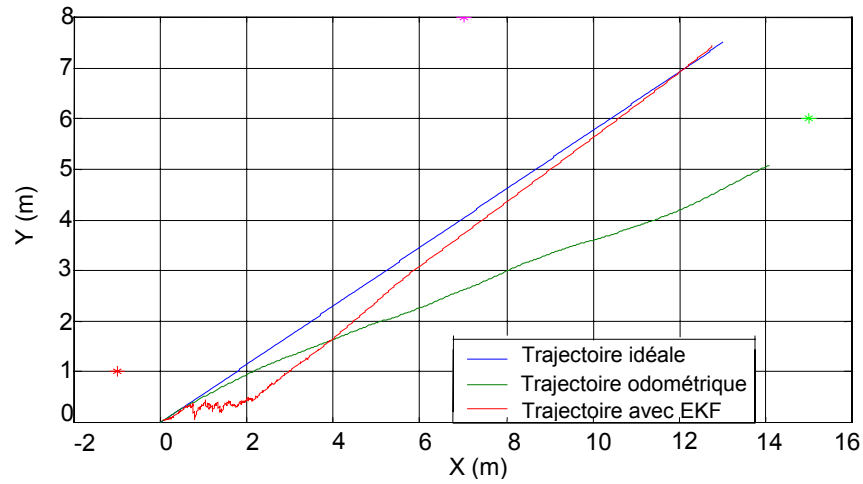


Figure 4-12 : Trajectoires avec et sans correction – Exemple 5

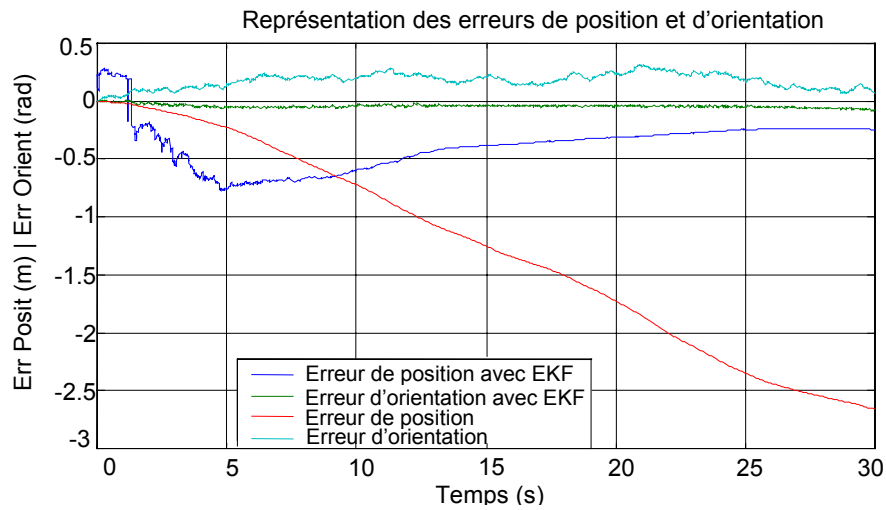


Figure 4-13 : Comparaison des erreurs de localisation pour l'exemple 5

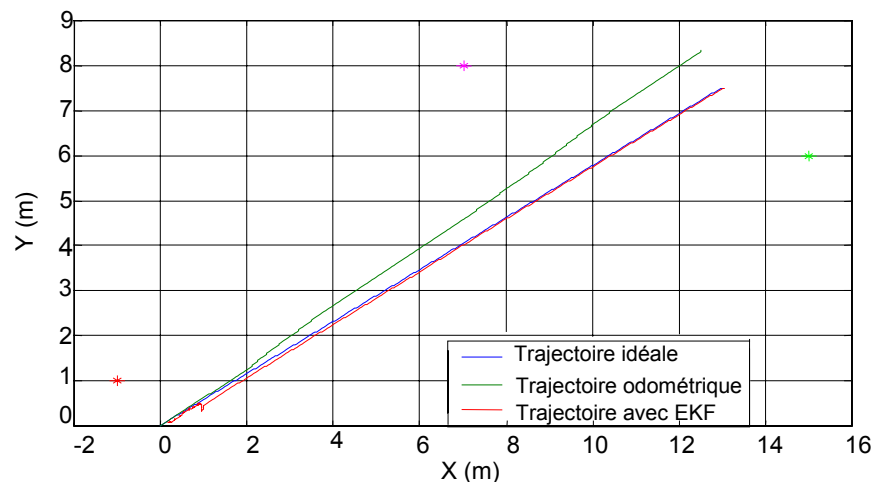


Figure 4-14 : Trajectoires avec et sans correction – Exemple 6

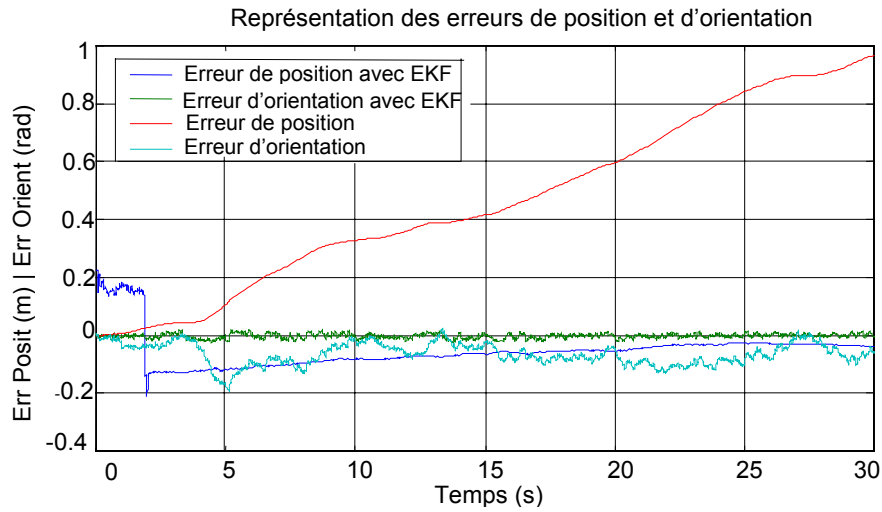


Figure 4-15 : Comparaison des erreurs de localisation pour l'exemple 6

Dans une seconde étape, on s'est intéressé à un environnement structuré utilisant cinq balises. Les résultats obtenus sont encore meilleures et les graphiques suivants représentent les erreurs dans les deux cas de figures, c'est-à-dire avec trois et cinq balises.

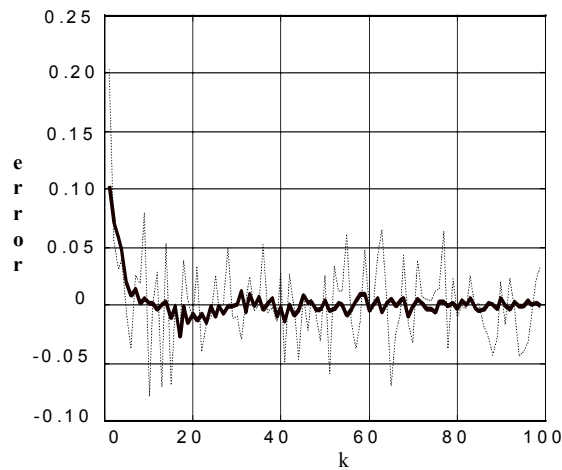


Figure 4-16 : Erreur sur x en fonction du temps

— Erreurs de localisation dans le cas de 5 balises
 Erreurs de localisation dans le cas de 3 balises

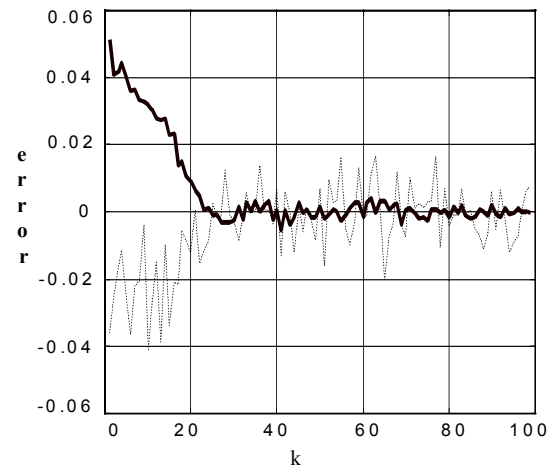


Figure 4-17 : Erreur sur y en fonction du temps

— Erreurs de localisation dans le cas de 5 balises
 Erreurs de localisation dans le cas de 3 balises

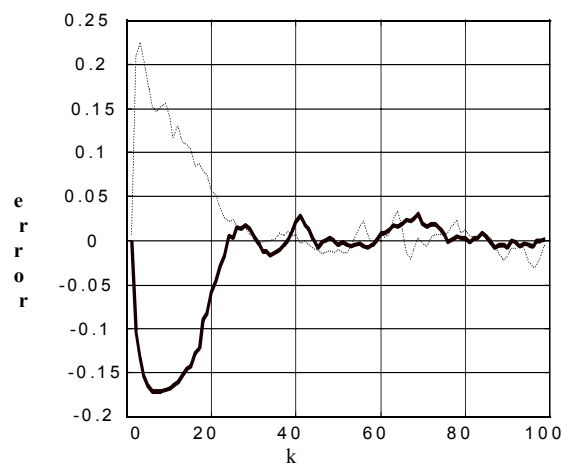


Figure 4-18 : Erreur sur ψ en fonction du temps

— Erreurs de localisation dans le cas de 5 balises
 Erreurs de localisation dans le cas de 3 balises

6. CONCLUSION.

Cette fusion de données montre qu'on peut corriger convenablement la trajectoire du robot. En effet les différentes trajectoires odométriques sont corrigées, au fur et à mesure de l'arrivée des observations acquises par la caméra CCD, à travers un filtre de Kalman. Le résultat du filtre est donné sous une estimation de l'état avec une matrice de covariance associée. Cette estimation est déterminée en deux étapes.

Premièrement la connaissance antérieure (k) est utilisée pour obtenir l'estimation au temps ($k+1$) par utilisation du modèle d'état. En seconde étape cette prévision est corrigée par l'observation courante. Après une étape d'initialisation du filtre par les données ($X_0, P(0/0)$), les équations du filtre de Kalman sont utilisées par une méthode itérative pour converger vers une meilleure estimation.

Durant nos travaux de simulation, le bruit affectant l'équation d'état et l'équation de mesures a été majoré au départ pour avoir une bonne convergence du filtre. Les résultats obtenus montrent une réduction des performances du filtre de Kalman dans le cas où l'erreur initiale est prise très faible. Ceci est dû au fait que lorsque l'erreur est petite, ce qui est donc le cas aussi pour la matrice de variance-covariance, le filtre de Kalman attache alors une importance considérable au résultat de la prédiction au détriment des observations.

On a constaté que la précision de la trajectoire dépend aussi du nombre de balises utilisées. Pour valider cette hypothèse, nous avons étudié deux cas. Dans le premier cas, on a utilisé un environnement structuré par trois balises disposées autour du robot vérifiant le principe de triangulation. Dans le second cas, on a utilisé un environnement structuré par cinq balises vérifiant le même principe. L'étape d'élimination des mesures improbables est effectuée d'une manière implicite en utilisant les équations du filtre de Kalman.

L'utilisation de trois balises permet de localiser efficacement notre robot. Cependant, dans certains cas, quand les balises sont mal positionnées ou en fin de parcours, on constate une divergence du filtre. Aussi pour palier à ce problème, il est nécessaire d'ajouter quelques balises. Des travaux de simulation avec trois et cinq balises ont été réalisés et ont montré que lorsque le nombre de balises augmente, la précision de la localisation et de l'accostage est meilleure.

Les résultats obtenus montrent que l'erreur d'accumulation diminue quand le nombre de balises augmente. Cependant on doit faire un compromis entre le nombre de balises et la complexité des calculs parce que plus le nombre de balises devient important plus les calculs deviennent complexes et la méthode lourde.

C

HAPITRE 5

Commande des robots mobiles

1. INTRODUCTION

Pour être autonome, un robot mobile doit être capable d'adapter l'exécution d'un ensemble d'actions suivant les variations dans son environnement. Il a donc besoin de percevoir l'environnement et de raisonner sur les données perceptuelles acquises. Le processus qui consiste à transformer les informations sensorielles en données parfaitement utilisables par les composantes décisionnelles du système est appelé modélisation de l'environnement ; les besoins du robot étant variés, des représentations multiples sont nécessaires, chacune pouvant être dédiée à une fonctionnalité bien précise.

Un robot mobile autonome doit réaliser des tâches non répétitives dans un environnement imparfaitement connu et non-coopératif, voire hostile. Dans ce contexte les missions attribuées au robot ne peuvent être définies que de façon abstraite et peu détaillée, et le robot doit être doté de moyens pour les interpréter, appréhender l'environnement, décider des actions adéquates et réagir aux événements asynchrones [Kan91].

Une première approche du problème de la commande des robots mobiles repose sur la synthèse de lois de commande en boucle fermée sur l'état du robot [Luc98]. La mise en oeuvre de telles lois nécessite la connaissance ou la mesure des variables utilisées dans la boucle de commande (typiquement la position et l'orientation du robot mobile par rapport à un repère fixe ou à une trajectoire sur laquelle on souhaite s'asservir). Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de considérer dans la commande, des informations provenant de capteurs de nature différente [Tay96b]. Les travaux menés dans ce chapitre s'inscrivent dans cette problématique. Plus précisément nous nous sommes focalisés sur la commande d'un robot mobile équipé d'un télémètre us et d'une caméra. Notre contribution a consisté à élaborer une stratégie de commande, en boucle fermée sur les informations télémétriques et d'azimut, pour réaliser une tâche de navigation dans un environnement structuré.

2. CONTROLE DE DEPLACEMENTS DES ENGINS MOBILES

2.1. Observabilité et observation en robotique mobile

L'observation d'état est un concept fondateur de l'automatique moderne et par là même de la robotique. Dans le domaine de la robotique, les problèmes de localisation et plus généralement d'observation d'état dynamique de véhicules peuvent être posés sous forme d'observation d'état ; le caractère temporel/dynamique des variables à estimer est alors pris en compte de façon saine.

Le filtrage de Kalman, inventé presque en même temps que l'observation d'état donne une solution optimale à une classe de problèmes bien posés et une solution satisfaisante assez souvent.

2.2. Contrôle basé sur les modèles géométriques

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, le problème de navigation des robots mobiles est rendu difficile par les phénomènes de dérive du véhicule lors de son déplacement. En effet, contrairement aux robots manipulateurs, dont la base demeure fixe dans l'espace de travail et dont la position de l'organe terminal peut être déterminé de manière précise à partir de la mesure des liaisons successives, il n'est pas possible de connaître précisément la position du robot en mesurant l'angle de rotation des roues. Ce phénomène, dû principalement au glissement des roues sur sol, produit un écart croissant entre la trajectoire de consigne et la trajectoire réellement effectuée par le véhicule. Bien qu'il soit possible de corriger la dérive du robot au moyen des données provenant de capteurs extéroceptifs, le phénomène de dérive reste incontournable. Néanmoins, les méthodes de localisation du robot (comme celle présentée plus haut) produisent des valeurs estimées tenant compte d'une erreur qu'il est possible de borner. Pour faire face à ce problème, nous avons cherché à déterminer une loi de contrôle robuste, par rapport aux erreurs de localisation, pour la navigation. Plus précisément, nous nous sommes intéressés à la stabilisation du véhicule autour d'une trajectoire définie par rapport à un ensemble d'amers utilisés par le véhicule pour se localiser. Les lois de commande à utiliser sont donc nécessairement en boucle fermée ([Tay96c]) sur cette localisation relative. On sait, par ailleurs, que les algorithmes de localisation lorsqu'on les utilise dans la pratique, engendrent des estimations nécessairement imprécises. Le problème traité consiste à garantir la robustesse de lois de commande par rapport aux erreurs d'estimation de la localisation, plus précisément : Peut-on garantir que le véhicule soumis à une loi de contrôle (stabilisante dans le cas idéal) entachée d'erreur se stabilise toujours autour de la trajectoire ou de la configuration spécifiée et si oui, quelle est la précision de la régulation ?

2.2.1. Commande par analyse de Lyapunov

Pour répondre à cette question, Hamel et al. dans [Ham97] proposent un ensemble de lois de contrôle significatives, obtenues par synthèse de fonctions de Lyapunov. Ils ont montré que tout système bouclé dont la stabilité est prouvée seulement par l'intermédiaire d'une fonction de Lyapunov dont la dérivée est semi-définie négative, ne permet pas de résoudre le problème posé. La réponse proposée et faisant l'originalité de leur travail, consiste à définir des domaines d'attraction entourant l'objectif visé en élaborant des fonctions de Lyapunov dont la dérivée est définie négative dans le cas nominal. Ainsi, ils ont présenté un ensemble de lois de contrôle originales permettant d'exhiber de telles fonctions de Lyapunov dans le cadre de la poursuite d'une trajectoire, du suivi de chemin et de la régulation autour d'une configuration fixe. Toutes ces lois de contrôle ont été testées et implantées sur la plate-forme *Robuter* en utilisant une méthode de localisation par ultrasons, permettant d'obtenir une valeur estimée de localisation du robot sur la base du filtrage de Kalman étendu. Les résultats obtenus sont présentés dans [Ham98].

2.2.2. Commande par mode glissant

La plupart des systèmes non linéaires sont caractérisés par des incertitudes structurelles et / ou non structurelles variantes dans le temps, ce qui rend leurs commandes très délicates et complexes à mettre en œuvre [Can93]. Pour résoudre ce problème, plusieurs approches ont été développées dans la littérature.

La commande H^∞ , par exemple, permet d'assurer la robustesse des systèmes incertains et perturbés en atténuant les effets des perturbations externes à un niveau désiré. Pour cela on définit un critère, dit de type H^∞ , auquel on associe une équation de Ricatti. La loi de commande est obtenue par une simple résolution de cette équation [Doy89].

La commande par mode glissant [Utk94], [Yan99] a connu un grand succès ces dernières années. Cela est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus. Elle consiste à définir une surface dite de glissement. La poursuite de la trajectoire désirée se fait en deux étapes : l'approche et le glissement. Ainsi, la commande utilisée dans ce cas se compose de deux parties : la première permettant l'approche jusqu'à l'arrivée à la surface et la seconde permet le maintien et le glissement le long de cette surface [Haj95].

Ces deux approches de commande robuste ne peuvent être appliquées que si le modèle nominal du processus est parfaitement connu, les perturbations externes sont bornées et variant lentement. Une des approches permettant de lever la contrainte de la connaissance parfaite du modèle ainsi que les incertitudes est proposée dans [Che96]. Cette méthode, permettant de combiner la logique floue et la théorie de la commande adaptative classique, a été améliorée en introduisant un signal de commande type H^∞ afin d'assurer la robustesse et atténuer les effets des perturbations externes et des erreurs d'approximation sur l'erreur de poursuite à un niveau désiré [Yoo98]. Néanmoins, l'utilisation de la commande par H^∞ exige des hypothèses supplémentaires sur la connaissance des bornes supérieures des fonctions régissant la dynamique du système. D'autres travaux ont été proposés dans [Ben98], [Ha99] et [Rig00] permettant la combinaison de la logique floue avec le mode glissant pour assurer la robustesse du système en boucle fermée. Cependant le signal de commande obtenu présente des variations brusques dues au phénomène de chattering, ce qui peut exciter les hautes fréquences et les non linéarités non modélisables [Wang02].

Dans notre travail, on propose une commande à structure variable par régime glissant. La loi de commande ainsi construite peut être appelée commande adaptative par mode glissant.

L'idée est fondée sur un concept nouveau concernant l'introduction d'une surface de glissement dont les paramètres sont susceptibles de modéliser l'environnement. Ce type de loi de commande est basé sur une localisation absolue du robot par rapport à un repère de référence fixe de l'environnement. L'état est supposé mesuré à chaque instant et les calculs sont effectués par rapport à ce référentiel.

2.3. Contrôle basé sur les modèles dynamiques

Ce type de contrôle est surtout utilisé dans le cadre des projets concernant les systèmes de transports intelligents pour les véhicules routiers. L'objectif de ces recherches est de réaliser des lois de contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Les applications dans ce contexte sont nombreuses ; on y distingue :

- Le contrôle d'allure intelligent
- Le contrôle latéral pour le maintien dans la voie
- Le changement de voie et le dépassement assisté.

3. CONTROLE DE LA NAVIGATION

3.1. Introduction

Lors de la réalisation d'une tâche, un robot mobile est amené à interagir avec son environnement local. Cette interaction peut prendre différents aspects : actions de la part du robot sur son environnement (assemblage, manutention...), réactions vis-à-vis d'événements provenant de celui-ci (évitement d'obstacles, coopération avec d'autres systèmes automatisés...). Le contrôle de cette interaction entre le robot et son environnement local est indispensable tout au long de l'exécution d'une tâche. Elle doit se traduire par la prise en compte explicite d'informations perceptuelles d'une part dans la constitution de boucles de commande robuste (aspect continu) et d'autre part dans la détection des événements (perturbations par exemple) nécessitant une modification du comportement du système (aspect réactif). Dans les deux cas, il s'agit d'exploiter des données sensorielles pour adapter au mieux le comportement du système aux conditions de la tâche qu'il réalise. Les formalismes que nous développons visent à exploiter au mieux la complémentarité entre les aspects perception et action afin, d'une part, de simplifier les processus de perception par le biais de stratégies de perception active et, d'autre part, de rendre robuste les processus de commande par le biais de lois de commande adéquates. Notre étude de recherche suivante nous a conduit à déterminer les formalismes et les moyens qui permettent de les appliquer en robotique mobile (odomètre, capteurs US, vision locale à l'aide d'une caméra CCD).

Pour être autonome, un robot mobile doit être capable de se localiser [Dul97] mais également pouvoir élaborer des stratégies de déplacement pour minimiser le temps de déplacement, l'énergie consommée, ou les deux à la fois. Durant l'exécution d'une tâche, le robot est amené soit à poursuivre une trajectoire pré-définie [Tay96a] soit à éviter des obstacles imprévus détectés sur son chemin [Bore91], [Cur93], soit à suivre un mur [Car03], etc. ...

A cause des imperfections aléatoires probables de l'état de surface (non-planéité, bosses, fosses, etc.) sur laquelle évolue un robot mobile à roues, ainsi que la variation de la charge portée par celui-ci, il y a des risques que le robot dérive de sa trajectoire pré-définie même si la technique de localisation dans l'espace de travail du robot mobile est adéquate, ceci rend toute localisation erronée [Smi88]. Une navigation correcte et satisfaisante du robot mobile nécessite une localisation correcte.

L'odométrie, qui consiste à intégrer les déplacements élémentaires du véhicule, fait appel uniquement à des informations sur l'état interne du robot et elle nécessite un modèle d'évolution du robot mobile. Ses limites sont dues à l'accumulation des erreurs par l'intégration. La

localisation absolue, quant à elle, exploite des informations sur la configuration recherchée du véhicule (position et orientation le plus souvent) par rapport à son environnement.

Par conséquent on a décidé de doter notre système, en plus d'une commande adaptative avec mode de glissement, d'un contrôleur basé sur un microprocesseur à virgule flottante de type TMS 320C30 qui permet, avec l'incorporation du filtre de Kalman étendu, de traiter les informations recueillies par les différents capteurs. Ce contrôleur synthétise en temps réel les signaux de commande adéquats qui agissent sur les actionneurs (servomoteurs).

3.2. Etude théorique

3.2.1. Système continu

Considérant le robot mobile schématisé sur la figure 5-1 dans un espace à deux dimensions. La position du véhicule peut être représentée par le triplet $X = (x, y, \theta)$ où (x, y) représente les coordonnées du point milieu M des deux roues arrière et θ l'orientation du véhicule par rapport à un repère fixe. Soit U_1 la vitesse de translation et U_2 la vitesse de rotation (Figure 5-1).

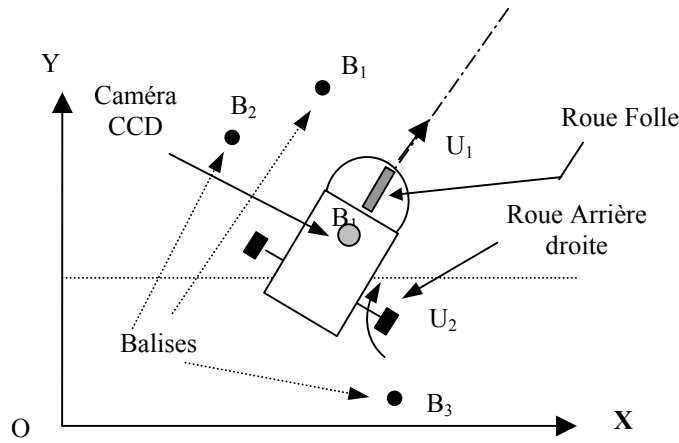


Figure 5-1 : Définition des différentes vitesses

Le modèle d'évolution du système est donné par le système d'équations classique suivant :

$$\begin{cases} \dot{X} = U_1 \cos \theta \\ \dot{Y} = U_1 \sin \theta \\ \dot{\theta} = U_2 \end{cases} \quad (5-1)$$

Avec $U = [U_1, U_2]^T$ le vecteur de commande.

Le vecteur d'observation est représenté par les angles d'azimut λ_i des balises B_i .

$$\lambda_i = a \tan(y_i - y, x_i - x) - \theta = g_i(x) \quad \forall i \in [1,3] \quad (5-2)$$

Ces équations exigent que le point de référence soit le point M.

L'équation d'observation peut être écrite ainsi :

$$g = [g_1(x) \ g_2(x) \ g_3(x)]^T \quad (5-3)$$

Le système formé par le véhicule et les balises est décrit par la représentation d'état et de mesures suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x) \end{cases} \quad (5-4)$$

3.2.2. Système discret

En fait, le système réel peut être différent de celui décrit précédemment dans les points suivants :

- Le calcul de la position du robot se fait à des instants discrets dans le temps.
- la projection dans le plan XY du point milieu M des deux roues arrières et celle de l'axe de rotation de la caméra (noté S) peuvent être différentes (figure 5-2).

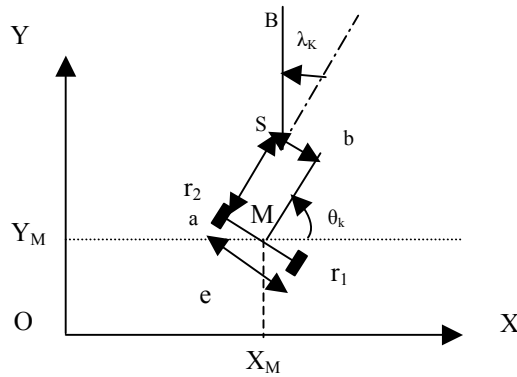


Figure 5-2 : Notation et relation entre les points M et S

Soient r_1 et r_2 les rayons des deux roues, e représente la distance entre le milieu des deux roues et Δq_{1k} , Δq_{2k} sont les rotations élémentaires fournies par les codeurs optiques liés mécaniquement aux roues arrières.

On peut calculer la distance ΔD_k parcourue par le point M, et la variation d'angle $\Delta \theta_k$ par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \Delta D_k &= \frac{r_1 \cdot \Delta q_{1k} + r_2 \cdot \Delta q_{2k}}{2} \\ \Delta \theta_k &= \frac{r_1 \cdot \Delta q_{1k} - r_2 \cdot \Delta q_{2k}}{e} \end{aligned} \quad (5-5)$$

Alors le mouvement du robot peut être représenté par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} x_{M+1} = x_M + \Delta D_k \cdot \cos(\theta_k + \frac{1}{2} \Delta \theta_k) \\ y_{M+1} = y_M + \Delta D_k \cdot \sin(\theta_k + \frac{1}{2} \Delta \theta_k) \\ \theta_{k+1} = \theta_k + \Delta \theta_k \end{cases} \quad (5-6)$$

Ce système peut être écrit sous la forme matricielle suivante :

$$X_{s+1} = F(X_s, U_k) \quad (5-7)$$

Avec $U_k = [\Delta q_{1k} \ \Delta q_{2k}]^T$

Le modèle obtenu est une bonne approximation de la réalité si $\Delta\theta_k$ est petit, ce qui implique une période d'échantillonnage suffisamment petite par rapport aux vitesses de translation et de rotation des roues du véhicule.

3.3. Formulation du filtre de Kalman discret

Le système stochastique non-linéaire est donné par la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned} X_{s+1} &= F(X_s + \Delta q_k) + \partial_k \\ \lambda_k &= g_i(X_s) + \beta_k \end{aligned} \quad (5-8)$$

où ∂_k et β_k représentent respectivement les bruits d'état et de mesure.

L'algorithme de localisation se fait en deux étapes :

- Une phase de prédiction pour la mise à jour de l'état X_s :

$$\hat{X}_{s+1/s} = F(\hat{X}_{s/s}, \Delta q_k) \quad (5-9)$$

avec sa matrice de covariance :

$$P_{k+1/k} = A_k P_{k/k} A_k^T + \sigma_2 B_k B_k^T + Q_\alpha \quad (5-10)$$

- Une phase d'estimation utilisant le vecteur gain du filtre de kalman :

$$W(k+1) = P(k+1/k) \cdot \nabla g^T \cdot S^{-1}(k+1) \quad (5-11)$$

$$W(k+1) = P_{k+1/k} C_k^t (C_k P_{k+1/k} C_k^t + \sigma_\lambda^2)^{-1} \quad (5-12)$$

L'estimé mis à jour et sa matrice de covariance sont donnés par :

$$\hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + W(k+1) v(k+1) \quad (5-13)$$

$$P(k+1/k+1) = P(k+1/k) - W(k+1) S(k+1) W^T(k+1) \quad (5-14)$$

3.4. Commande adaptative avec mode de glissement des servomoteurs

Pour le système à régler (robot mobile à roues), on a:

- Le vecteur d'état X_s du système à régler est comparé au vecteur d'état X_m du modèle de référence.
- W est la grandeur de consigne qui donne la trajectoire désirée par l'intervention du vecteur K_w .
- U vecteur de commande commuté par une loi de commutation $S(x_e)$ par l'intermédiaire du vecteur K_e .

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_s u + B_v \quad (5-15)$$

$$Y_s = C_s x_s \quad (5-16)$$

u et y représentent respectivement l'entrée et la sortie du système et B_v les perturbations externes inconnues mais bornées.

Le modèle de référence qui reflète le système idéal et qui regroupe l'ensemble des performances désirées du système à contrôler est décrit par les équations suivantes :

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m v \quad (5-17)$$

$$Y_m = C_m x_m \quad (5-18)$$

L'objectif est de déterminer une commande par mode glissant de telle sorte que la sortie y du système suit une trajectoire de référence y_r , c'est-à-dire que l'erreur de poursuite $e = y_r - y$ converge vers zéro.

On considère la surface de glissement suivante :

$$S(x) = K_e (x_m - x_s) + K_w W \quad (5-19)$$

où : $U = U_{\max}$ pour $S(x) > 0$ et $U = U_{\min}$ pour $S(x) < 0$

Le processus de la commande par mode glissant peut être divisé en deux phases : la première est la phase d'approche quand $S(x, t) \neq 0$ et la seconde, la phase de glissement quand $S(x, t) = 0$. Une condition suffisante pour assurer la transition de la trajectoire de l'erreur de poursuite de la phase d'approche à celle de glissement est [Wan94] :

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2(x, t) = S(x, t) \dot{S}(x, t) \leq -\eta |S(x, t)| \quad \text{avec } \eta > 0 \quad (5-20)$$

Lorsque le réglage adaptatif fonctionne en mode de glissement, la loi de commutation imposée est $S(x) = 0$, par conséquent :

$$U = (K_e B_s)^{-1} K_e (A_m x_m - A_s x_s + B_m W - B_v v) + (K_e B_s)^{-1} K_w \dot{W} \quad (5-21)$$

Pour l'existence du mode de glissement, il faut que : $K_e B_s \neq 0$ et $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$.

Pour notre système, on a considéré que les grandeurs de perception sont entachées par des bruits d'état et de mesure, et on a choisi la minimisation d'un critère quadratique par retour d'état, d'où une commande linéaire quadratique gaussienne LQG.

L'expression de la fonction coût retenue est donnée par la relation suivante :

$$J = \left[\frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q_1 X + U^T R_1 U) dt \right] \quad (5-22)$$

La minimisation du critère J est donnée par la résolution de l'équation de Ricatti, à savoir :

$$K = R_1^{-1} B_1^T P_1 \quad (5-23)$$

où P_1 représente la solution de l'équation de RICATTI :

$$PA_1 + A_1'P - PB_1R_1^{-1}B_1'P + Q_1 = 0 \quad (5-24)$$

4. CONCEPTION DU CONTRÔLEUR DE NAVIGATION

Le schéma synoptique du contrôleur proposé pour la commande du robot mobile en temps réel est donné la figure 5-3.

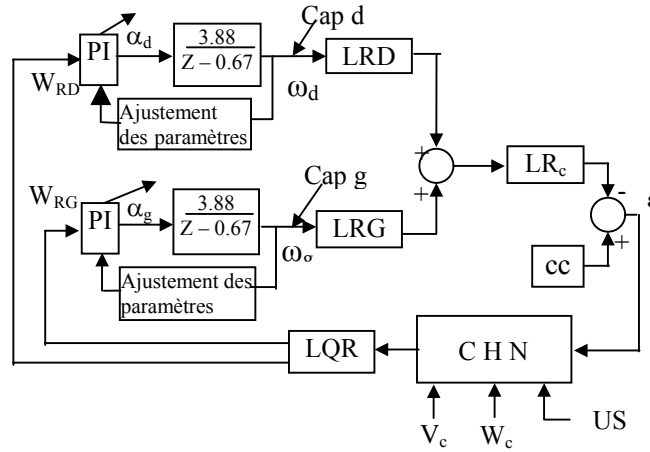


Figure 5-3 : Structure du contrôleur du robot mobile.

V_c : Vitesse linéaire du centre d'inertie du robot mobile.

W_c : Vitesse de rotation de référence du centre d'inertie.

α_d , α_g : Rapports cycliques des hacheurs qui commandent les servomoteurs, générés par les régulateurs PI à structure variable.

ω_d , ω_g : Vitesses de rotation des roues du robot respectivement droite et gauche.

w_{rd} , w_{rg} : Vitesses de rotation de référence des roues.

L_{rg} , L_{rd} : Localisation relative des deux roues motrices.

LRC : Coordonnées du centre d'inertie du robot en temps réel.

CC : Coordonnées du centre d'inertie du système le long d'une trajectoire stockée en mémoire.

CHN : Contrôleur de haut niveau avec fusion de données (application du filtre de Kalman étendu) fournies par les différents capteurs et détermination des vitesses de références actuelles w_{rd} , w_{rg} .

US : Position du robot fourni par les balises ultrasoniques dans un intervalle de temps égal à 1s.

LQR : Régulateur quadratique linéaire.

Cap_g , Cap_d : Capteurs de vitesses droit et gauche.

La boucle interne du contrôleur inclut aussi la fonction de transfert des deux servomoteurs.

5. RESULTATS DE SIMULATION ET CONCLUSION

Le principe de notre simulation est de faire en sorte que le véhicule puisse suivre une trajectoire de référence dont la forme est représentée sur la figure 5-4.

On considère que le robot se déplace avec une vitesse de translation moyenne pour des applications industrielles égale à 0.3m/s. La période d'échantillonnage des vitesses des roues est 1ms.

Les matrices de covariance des bruits de système, de commande et de mesure sont respectivement :

$$\sigma^2 = [10^{-9} \ 10^{-9} \ 10^{-9}], \ Q_c = 0 \text{ et } \delta^2_{\lambda} = [10^{-6} \ 10^{-6} \ 10^{-6}]$$

($\sigma^2, \delta_{\lambda}^2$ sont des matrices diagonales à trois dimensions)

Comme toute autre méthode récursive, le filtre de Kalman a besoin d'une estimation initiale :

$$(\hat{X}_0 \ \hat{Y}_0 \ \hat{\theta}_0) = [-0,01 \ -0,01 \ -0,01^\circ]^T, \text{ avec sa matrice de covariance :}$$

$$P_{0/0} = [0.8 \ 0.8 \ 0.9^2] \text{ (matrice diagonale à trois dimensions)}$$

Le robot commence son mouvement à partir de la position $(X, Y, \theta) = (0,1 \ 0,1 \ 45^\circ)$.

Pour le régulateur linéaire quadratique, on choisit les matrices Q_1 et R_1 pour avoir K

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.0025} & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.0025} \end{bmatrix} \quad Q_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.0025} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.0025} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.0025} \end{bmatrix}$$

$$K_{Ricatti} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.0025 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0025 \end{bmatrix}$$

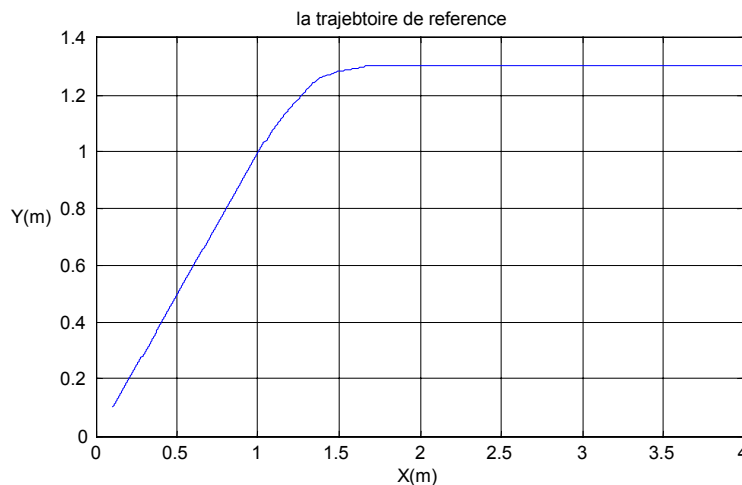


Figure 5-4 : Trajectoire de référence

La position du point S (caméra CCD) par rapport au centre d'inertie du robot mobile est donnée par : $a = 0,15\text{m}$ et $b = 0,05\text{m}$.

Au début, le robot mobile effectue un mouvement rectiligne, les deux roues motrices tournent à la même vitesse, avec absence de perturbations.

Pour changer de direction le contrôleur envoie des consignes de vitesse différentes sur chacun des actionneurs, ceci se traduit par une accélération de la roue gauche, et une décélération de la roue droite, tout en gardant une vitesse de translation constante du centre de gravité du robot mobile.

En deuxième lieu nous avons simulé une poursuite de trajectoire où l'estimateur du contrôleur ne tient pas compte des observations provenant des balises. On constate dans ce cas, sur la figure 5-5 que la trajectoire poursuivie est légèrement déviée, ce qui montre que le robot s'écarte de sa trajectoire de référence.

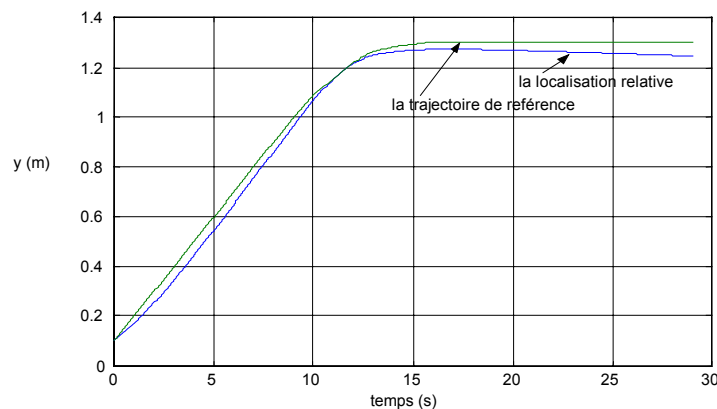


Figure 5-5 : Trajectoire de référence et localisation relative

La cause principale de cette dérive réside dans l'accumulation des erreurs par odométrie. La figure 5-6 montre l'inconvénient de cette localisation relative.

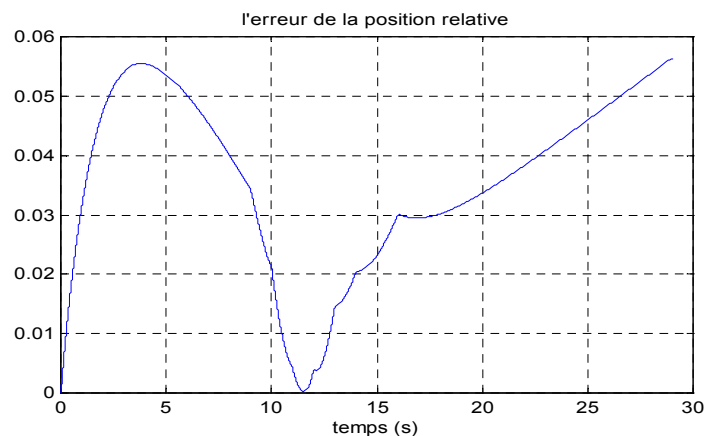


Figure 5-6 : Erreur de la localisation relative

En fusionnant les données odométriques, les observations de la caméra CCD et les valeurs de distances obtenues à partir des trois balises ultrasoniques positionnées au voisinage de la trajectoire spécifiée, le nouveau chemin suivi par le robot mobile devient plus proche de la trajectoire prédéfinie comme montré sur la Figure 5-7.

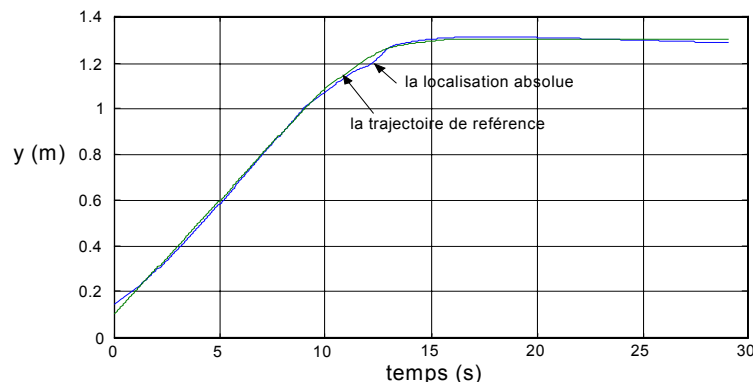


Figure 5-7 : Trajectoire de référence et localisation absolue.

L'erreur de position introduite par la localisation absolue est représentée sur le figure 5-8.

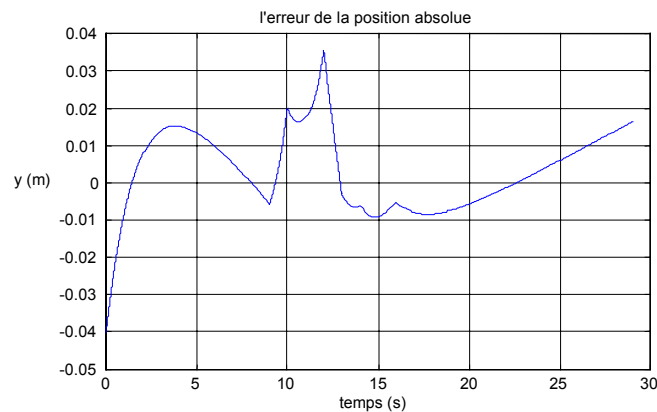
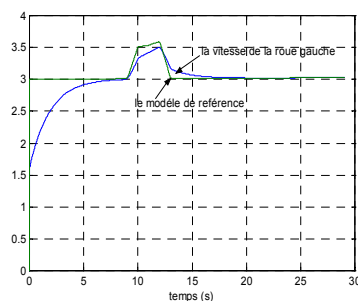


Figure 5-8 : Erreur de la localisation absolue sur y.

A travers ces présents essais, on a pu visualiser la poursuite du modèle de référence qui reflète les vitesses des actionneurs du robot mobile. Les Figures 5-9 (a) et (b) présentent une bonne adaptation et une poursuite satisfaisante à la vitesse du modèle de référence



Figures 5-9 (a) : Vitesses de la roue gauche et du modèle de référence

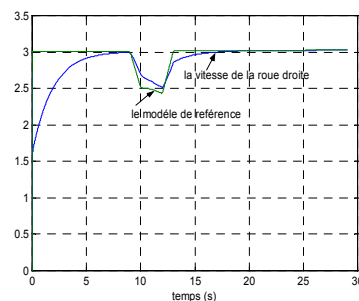


Figure 5-9 (b) : Vitesses de la roue droite et du modèle de référence

La figure 5-10 illustre les rapports cycliques des servomoteurs des roues motrices gauche et droite fournis par les régulateurs PI.

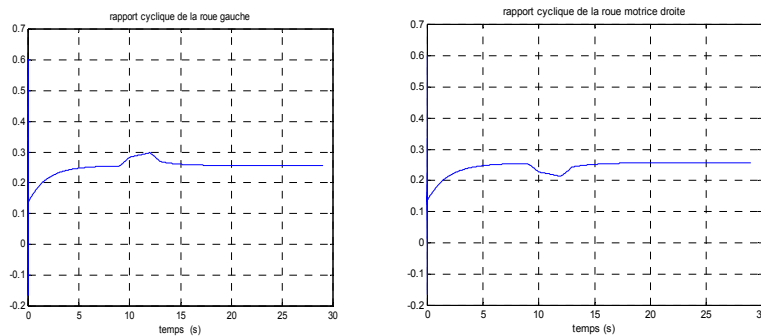


Figure 5-10 : Variation des rapports cycliques des servomoteurs

Pour perfectionner le logiciel de simulation, nous avons simulé une poursuite de la trajectoire dans le cas où les conditions de roulement du robot mobile changent. Les deux roues motrices sont perturbées par un frottement, comme illustré sur les figures 11 et 12, on remarque une diminution de la vitesse à cause de l'augmentation du couple de charge sur les deux actionneurs. Cependant grâce au contrôleur de navigation et de commande, la vitesse tend à augmenter et à revenir à sa valeur de régime permanent.

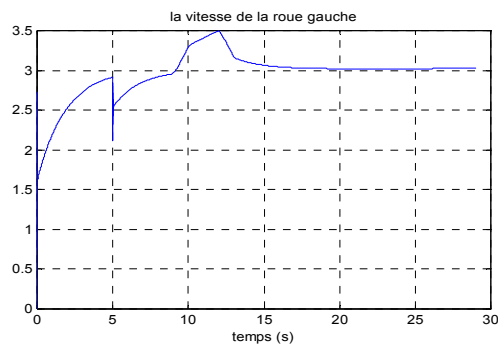


Figure 5-11 : Vitesse de la roue gauche en présence de perturbations

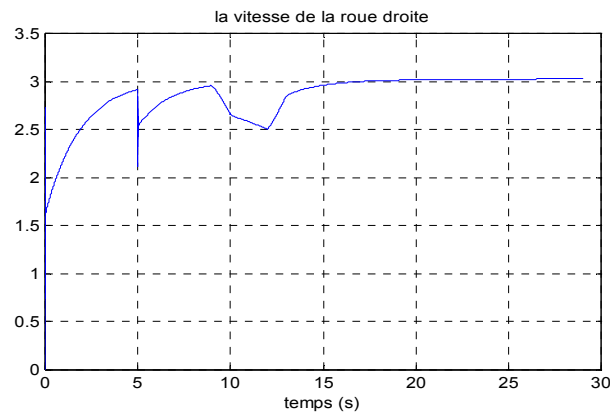
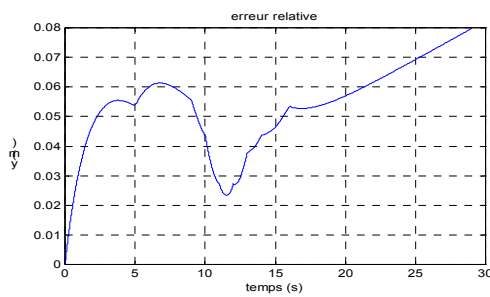
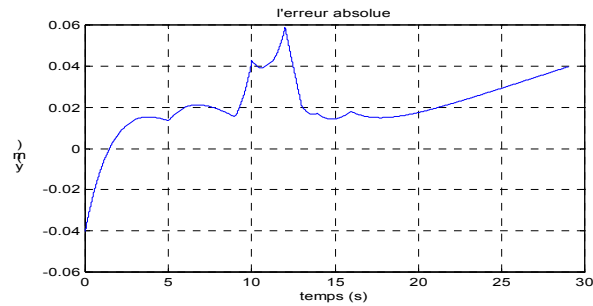


Figure 5-12 : Vitesse de la roue droite en présence de perturbations

Les figures 5-13 (a) et (b) illustrent les erreurs de position de la localisation relative et absolue



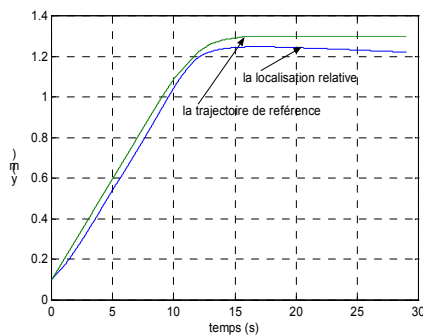
(a)



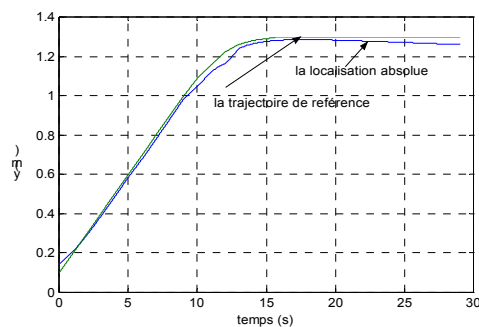
(b)

Figure 5-13 (a,b) : Erreur de position relative et absolue en présence de perturbations

On remarque sur la figure 5-14 que la trajectoire réelle du robot mobile converge vers la trajectoire de référence même en présence de perturbations, cette poursuite est améliorée en présence du filtre de Kalman.



(a)



(b)

Figure 5-14 (a,b) : Localisations relative et absolue en présence de perturbations

Une technique de commande adaptative par poursuite d'un modèle de référence avec mode de glissement d'un robot mobile a été étudiée et appliquée aux servomoteurs à courant continu. Cette technique a donné des résultats satisfaisants, du fait qu'il y a une poursuite de vitesses entre le processus discrétisé et le modèle de référence choisi, même en présence de perturbations majeures telles que la présence de frottements au niveau des roues ou de glissement des roues (patinage).

Pour rendre les déplacements plus robustes par rapport à cette dérive, nous avons déterminé une loi de commande en boucle fermée sur l'état du robot qui tient compte des erreurs de localisation. Des tests de simulation ont été réalisés avec succès. Ces tests nous montrent une poursuite satisfaisante de la trajectoire spécifiée du robot mobile même en présence des perturbations, et ceci ne peut s'achever qu'avec une localisation satisfaisante.

Les cartes réalisées nous ont permis de tester plusieurs types de navigation et les résultats obtenus sont acceptables. Avec l'algorithme de commande et de gestion des moteurs on a obtenu de bons résultats aussi.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de recherche, on s'est intéressé à la localisation des robots mobiles à roues. On a étudié les deux différentes méthodes de localisation qui sont généralement utilisées en robotique mobile, à savoir la localisation relative et la localisation absolue. Dans ce contexte on a commencé par étudier les modèles de perception et de modélisation de l'environnement de travail. En effet pour être autonome, un robot mobile doit être capable d'adapter l'exécution d'un ensemble d'actions suivant les variations dans son environnement. Il a donc besoin de percevoir l'environnement et de raisonner sur les données perceptuelles acquises. De ce fait plusieurs types de capteurs utilisés en robotique mobile ont été présentés et certains ont fait l'objet d'étude très détaillée. La position du capteur dans l'environnement d'évolution joue aussi un rôle très important pour une bonne précision de la localisation. Plusieurs auteurs se sont penchés sur ce problème de placement des amers.

Dans toutes les méthodes des sections précédentes, celles qui utilisent des repères artificiels supposent que ces repères sont déjà installés dans l'espace de travail. Cependant, si l'on désire pouvoir utiliser ces repères pour la localisation en tout point de l'espace de travail et si l'on veut minimiser le nombre de balises utilisées, leur placement est un problème compliqué. Dans [Tas95], le problème du placement de balises dans un espace de travail polygonal est défini. La méthode cherche à minimiser les erreurs de localisation dans le cas où un seul amer permet de connaître la position et l'orientation du robot. Une autre façon de garantir les capacités de localisation est de résoudre le problème du placement dans un polygone simple [Pra01] puis de répliquer ce polygone simple sur tout l'espace de travail. Enfin, Briggs s'attaque à un problème symétrique dans [Bri96] : comment placer un capteur (par exemple une caméra) dans un environnement polygonal pour observer au mieux le robot. Elle utilise dans cet article la notion de polygone de visibilité (ensemble des points visibles d'une position donnée) décrite dans [Gui95] et [Aro98]. Pradalier dans [Pra01] a défini une méthodologie permettant de trouver un placement optimal des amers dans l'espace de travail afin d'assurer les capacités de localisation dans la majeure partie de l'espace des configurations. Dans notre cas, trois amers, dont le positionnement est parfaitement connu, ont été placés dans l'environnement d'évolution pour aider à une localisation incrémentale de l'engin mobile.

La question de la localisation est un problème fondamental de la recherche en robotique mobile. Différentes solutions ont été étudiées et présentées. Cependant, la majorité de ces approches correspond à un robot particulier équipé de capteurs particuliers. Notre travail nous a conduits à proposer différentes approches pour l'élaboration d'un système de location optimal. La première idée était d'utiliser un procédé relatif pour le positionnement du robot mobile. Cette méthode de localisation à l'estime basée sur l'odométrie qui, dans notre cas correspond à un codeur à cinq cent (500) points codeur, est le système le plus utilisé en robotique mobile terrestre pour des

dimensions faibles de l'environnement (jusqu'à une centaine de mètres). La position du robot est calculée de façon incrémentale, par cumul de déplacements élémentaires ce qui induit des erreurs sur le positionnement comme ça a été démontré dans nos travaux. Pour palier à certains inconvénients de cette méthode, certains auteurs proposent différentes méthodes : modélisation et évaluation des erreurs [Bore96b] et [Mart01], adjonction d'un gyromètre au système de navigation [Bor02], utilisation de la stéréo-vision [Mal01] pour effectuer le suivi de pixels dans une séquence d'images vidéo pour en déduire des déplacements élémentaires.

Les résultats obtenus dans nos travaux n'étant pas satisfaisants, nous nous sommes intéressés à une deuxième approche qui est la localisation globale.

Cette deuxième approche, appliquée pour les robots mobiles naviguant dans des environnements d'intérieurs, utilise un réseau de balises ultrasoniques installées dans l'environnement d'évolution du robot. Le principe consiste à émettre un ou plusieurs signaux vers une ou plusieurs balises simultanément afin d'en déduire des caractéristiques géométriques permettant le calcul de la localisation. En effet chaque capteur à ultrasons fournit une valeur représentant la plus courte distance entre le capteur et un obstacle situé dans le cône d'émission. Son principe est basé sur la mesure du temps de vol t d'une onde ultrasonore. Cependant malgré leur simplicité, ces ondes peuvent, en milieu industriel, être très perturbées et rendre pratiquement inopérantes ces communications. Pour remédier à cet inconvénient, on a proposé d'utiliser, dans notre cas, pour la réception de l'écho un récepteur HF. Un système de localisation à base de capteurs ultrasonores a été réalisé et a donné des résultats acceptables avec des erreurs de l'ordre de 8 cm pour la position et de 5° pour l'orientation en mode de fonctionnement idéal, c'est-à-dire pas de rebond d'écho et balises toujours dans le cône de réception des capteurs ultrasonores. L'orientation du robot est établie à partir de deux ou plusieurs relevés de positions de la trajectoire suivie.

Les résultats expérimentaux et de simulation obtenus sont acceptables, cependant reste le problème de la disposition des balises dans l'environnement de travail. En effet pour une meilleure précision de la localisation du mobile, il faut que toutes les balises soient dans le cône d'émission de l'émetteur, chose qui s'avère pratiquement impossible. De plus les données issues de capteurs ultrasonores sont généralement entachées d'une grande incertitude. Pour palier à ces inconvénients, certains auteurs proposent de fusionner ces deux méthodes précitées [Ous96], [San97].

Suite à tous ces types d'erreurs et dans le but d'avoir une localisation correcte du robot mobile, de nombreuses équipes utilisent une ceinture de capteurs ultrasonores ou un capteur télémétrique laser ou un système de vision pour résoudre leurs problèmes de localisation. D'autres utilisent à la fois des repères artificiels et naturels. Par contre, nous dans notre travail, on s'est intéressé à un modèle de fusion dans lequel on essaye de recalibrer la position obtenue par odométrie par un capteur azimutal de type CCD.

Les dispositifs logiciels et matériels qui acquièrent, traitent et intègrent des données provenant de différentes sources d'informations sont communément appelés des systèmes d'intégration et de fusion multicapteur. Même si la frontière entre l'intégration et la fusion multicapteur n'est pas

toujours nette dans la littérature, elle permet de séparer les aspects matériels, fondamentaux en robotique mobile : architecture et contrôle multicapteurs, des concepts plus mathématiques rencontrés dans l'étape de fusion effective d'information. La fusion multicapteur correspond à toutes les étapes de l'intégration multicapteur au cours desquelles les informations provenant des différents capteurs sont effectivement combinées. Pour fusionner les données issues de ce capteur extéroceptif avec celles issues des capteurs proprioceptifs (odométrie) et pour intégrer ces données au cours du temps, une méthode de fusion à base d'un filtre de Kalman étendu a été proposée et a permis d'avoir des résultats très satisfaisants. Des travaux de simulation sont largement présentés dans les chapitres précédents.

Pour rendre les déplacements du robot mobile plus robustes par rapport à cette dérive, nous avons aussi déterminé une loi de commande en boucle fermée sur l'état du robot.

Nous avons ensuite développé une étude sur la robustesse de cette loi de commande par rapport aux erreurs de localisation.

A cet effet une modélisation discrète du robot a été faite dans le but d'élaborer une technique de commande et de localisation par fusion de données sensorielles. En effet pour une meilleure précision de la localisation du mobile et pour un suivi de trajectoires correcte, une commande par retour d'état basée sur les paramètres de localisation a été élaborée. On a aussi considéré la navigation du robot mobile en temps réel, étude qui s'avère incontournable si on veut mettre en application les théories de fusion de données, pour une localisation précise et fiable grâce à la redondance de capteurs.

Une technique de commande adaptative avec une poursuite d'un modèle de référence avec mode de glissement d'un robot mobile a été étudiée et appliquée aux servomoteurs à courant continu utilisés. Cette technique a donné des résultats satisfaisants, du fait qu'il y a une poursuite de vitesses entre le processus discrétisé et le modèle de référence choisi, même en présence de perturbations majeures telles que la présence de frottements au niveau des roues ou de glissement des roues (patinage).

Des tests de simulation ont été réalisés avec succès. Ces tests nous montrent une poursuite satisfaisante de la trajectoire spécifiée du robot mobile même en présence des perturbations, et ceci ne peut s'achever qu'avec une localisation satisfaisante.

Des stratégies ont été abordées afin de réaliser la structure complète du robot mobile, en tenant compte des incertitudes de mesures des différents capteurs mis en jeu (centre de gravité du robot, position de la caméra, fiabilité des codeurs....).

Tous les objectifs assignés à notre travail de recherche ont été traités. Tous les algorithmes proposés ont été élaborés sous Matlab et sont fonctionnels. Les cartes réalisées nous ont permis de tester plusieurs types de navigation et les résultats obtenus sont acceptables. Avec le modèle de fusion proposé et l'algorithme de commande et de gestion des moteurs on a aussi obtenu de bons résultats et les travaux accomplis ont fait l'objet de deux publications internationales. Actuellement, on pense étendre nos travaux sur la localisation des robots mobiles dans des environnements complètement inconnus. En effet, on est arrivé suite aux différents travaux entrepris, à comprendre qu'en robotique mobile, les problèmes de la modélisation

d'environnement et de la localisation sont intimement liés, et peuvent par conséquent être résolus de manière unifiée. Dans [Jun04], le problème de la cartographie et de la localisation simultanée pour des robots évoluant en 3D dans de grands environnements, en utilisant la stéréovision, est abordé. L'algorithme présenté repose sur le filtrage de Kalman pour estimer les déplacements du robot et pour re-observer les amers précédemment cartographiés qui sont les points d'intérêt détectés dans les images, dont les coordonnées 3D sont fournies par stéréovision. Dans nos travaux futurs, on pense remplacer le vecteur d'état $X = (x, y, \psi)$, représentant la position et l'orientation d'un engin mobile, par un autre vecteur inconnu prenant en compte les différentes positions inconnues des amers, on aura donc un vecteur d'état de la forme $X = (x, y, \psi, a_1, a_2, \dots, a_i)$ où les a_i sont les amers dont la position est à estimer avec $\forall i, a_i(k+1) = a_i(k)$ puisque les amers sont considérés stationnaires. Un filtre de Kalman étendu pourra alors être appliqué pour l'estimation des différents paramètres, à savoir la position du robot et l'emplacement des différents amers.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ado01] Giovanni Adorni, Stefano Cagnoni, Stefan Anderle, Gerhard K. Kraetzschmar, Monica Mordonini, Michael Plagge, Marcus Ritter, Stefan Sablatnög and Andreas Zell, '*Vision-based localization for mobile robots*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 36, pp. 103-119, Elsevier Science Publishers, 2001.
- [Ald94] M.J. Aldon and L. Le Bris, '*Mobile robot localization using a light-stripe sensor*'. Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium, pp. 255-259, Paris, France, October 24-26, 1994.
- [Ant01] F.M. Antoniali and G. Driolo, '*Robot localization in nonsmooth environments : experiments with a new filtering technique*'. Submitted at the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001.
- [Aro98] Aronov, Guibas, Teichmann and Zhaug, '*Visibility queries in simple polygons and applications*'. In ISAAC : 9th International Symposium on Algorithms, organised by Special Interest Group on Algorithms (SIGAL) of the Information Processing Society of Japan (IPSJ) and the Technical Group on Theoretical Foundation of Computing of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), 1998.
- [Arr01] Kai O. Arras, Nicola Tomatis, Björn T. Jensen and Roland Siegwart, '*Multisensor on the fly localization : precision and reliability for applications*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 34, pp. 131-143, Elsevier Science Publishers, 2001.
- [Aya89] Nicholas Ayache, '*Vision stéréoscopique et perception multisensorielle-Applications à la robotique mobile*'. Collection Science Informatique, Inter-Editions 1989.
- [Bai00] T. Bailey, E.M. Nebot, J.K. Rosenblatt and H.F. Durrant Whyte, '*Data association for mobile robot navigation : a graph theoretic approach*'. In proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [Bar95] Barshan B. and Durrant-Whyte H.F., '*Inertial navigation systems for mobile robot*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 11, n° 3, pp. 328-342, 1995.
- [Bec95] C. Becker, J. Salas, K. Tokusei and J.C. Latombe, '*Reliable navigation using landmarks*'. In proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995.
- [Ben98] S. Bentalba, A. El Hajjaji and A. Rachid, '*Fuzzy sliding mode control of mobile robot*'. Proceeding of the 37th IEEE Conference on Decision and Control Tampa, pp. 4264-4265, Florida USA, December 1998.
- [Ben02] G. Benet, F. Blanes, J. E. Simó and P. Pérez, '*Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 40, pp. 255-266, Elsevier Science Publishers, 2002.
- [Beo95] H.R. Beom and H.S. Cho, '*Mobile robot localization using a single rotating sonar and two passive cylindrical beacons*'. Robotica, volume 13, pp. 243-252, Cambridge University Press, 1995.
- [Ber88] J.O. Berger, '*Statistical decision theory and bayesian analysis*'. Springer Series in Statistics, Springer Verlag, second edition, 1988.

- [Bet97] Margrit Betke and Leonid Gurvits, '*Mobile robot localization using landmarks*', IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 13, n° 2, pp. 251-263, April 1997.
- [Bla95] P. Blazevic, S. Delaplace, J.G. Fontaine and J. Rabit, '*Mobile robot using ultrasonic sensors : study of a degraded mode*'. Robotica, volume 13, pp. 365-370, Cambridge University Press, 1995.
- [Bol96] D. Boley, E. Steinmetz and K. Sutherland, '*Robot localization from landmarks using recursive total least squares*'. In proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, 1996.
- [Bol98] Daniel L. Boley and Karen T. Sutherland, '*Rapidly converging recursive method for mobile robot localization*'. International Journal of Robotics Research, volume 17, n° 10, pp. 1027-1039, Sage Publications, October 1998.
- [Bon96] Philippe Bonnifait and G. Garcia, '*A multisensor localization algorithm for mobile robots and its real-time experimental validation*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1395-1400, Minneapolis, Minnesota, April 1996.
- [Bon97] Philippe Bonnifait and G. Garcia, '*6 DOF dynamic localization of a mobile robot using odometry, inclinometers and a goniometric system*'. Preprints of the fifth IFAC Symposium on Robot Control, pp. 173-178, September 3-5, Nantes, France, 1997.
- [Bor02] Geovany Araujo Borges, '*Cartographie de l'environnement et localisation robuste pour la navigation de robots mobiles*'. Thèse de Doctorat de LIRMM, Montpellier, Mai 2002.
- [Bor03] Geovany Araujo Borges and Marie-José Aldon, '*Robustified estimation algorithms for mobile robot localization based on geometrical environment maps*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 45, pp. 131-159, Elsevier Science Publishers, 2003.
- [Bore91] J. Borenstein and Y. Koren, '*The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 7, issue 3, pp. 278-288, 1991.
- [Bore96a] J. Borenstein and L. Feng, '*Gyrodometry : a new method for combining data from gyro and odometry in mobile robots*'. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April 1996.
- [Bore96b] J. Borenstein and L. Feng, '*Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 12, n°6, pp. 869-880, 1996.
- [Bra95] Eric Brassart, Claude Pégard and Laurent Delahoche, '*localisation absolue d'un robot mobile autonome par des balises actives et un système de vision monoculaire*'. RAPA. volume 8, n° 2-3, pp. 453 – 459, 1995.
- [Bri96] A.J. Briggs and B.R. Donald, '*Robust geometric algorithms for sensor planning*'. In proceedings of the Second International Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics, Toulouse, France, 1996.
- [Bul96] Hanna Bulata, '*Modélisation d'un environnement structuré et localisation sur amers pour la navigation d'un robot mobile autonome*'. Thèse de Doctorat du LAAS, Toulouse, Mai 1996.
- [Bur96] Wolfram Burgard, Dieter Fox, D. Henning and T. Schmidt, '*Estimating the absolute position of a mobile robot using position probability grids*'. In AAAI / IAAI, volume 2, pp. 896-901, 1996.

- [Bur97] Wolfram Burgard, Dieter Fox and Sebastian Thrun, '*Active mobile robot localization*'. In 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1997.
- [Can93] Canudas de Wit C., Khenouf H., Samson C. and Sordalen O.J., '*Nonlinear control design for mobile robots*'. Recent Trends in Mobile Robots, Yuan F. Zheng Ed, World Scientific series in Robotics and Automated Systems, volume 11, 1993.
- [Car03] Ricardo Carelli and Eduardo Oliveira Freire, '*Corridor navigation and wall-following stable control for sonar-based mobil robots*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 45, pp. 235-247, Elsevier Science Publishers, 2003.
- [Cha85] Chatila R. and Laumond J.P., '*Position referencing and consistent world modeling for mobile robots*'. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'85, 1985.
- [Che95] F. Chenavier, I. Lecoeur Taibi and J.L. Crowley, '*Estimation de la position d'un robot par odométrie et vision monoculaire*'. Traitement du Signal, volume 12, n° 3, pp. 255-267, 1995.
- [Che96] B-S. Chen, C-H. Lee and Y-C. Chang, '*H ∞ tracking design of uncertain nonlinear SISO systems : adaptive fuzzy approach*'. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, volume 4, n°1, pp. 32-43, 1996.
- [Cou03] Christophe Coué, '*Modèle bayésien pour l'analyse multimodale d'environnements dynamiques et encombrés : application à l'assistance à la conduite en milieu urbain*'. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 2003.
- [Cro87] James L. Crowley, '*Coordination of action and perception in a surveillance robot*'. IEEE Expert, volume2, Novembre 1987.
- [Cro89] James L. Crowley, '*World modelling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pp. 674-680, 1989.
- [Cur93] A. Curran and K.J. Kyriakopoulos, '*Sensor-based self-localization for wheeled mobile robots*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1, pp. 8-13, Atlanta, Georgia, May 2-6, 1993.
- [Das97] V. B. Dasarathy, '*Sensor fusion potentiel exploitation- innovative architecture and illustrative applications*'. Proceedings of IEEE, volume 85, pp. 24-39, 1997.
- [Del96] Laurent Delahoche, Claude Pégard, Mustapha Mouaddib and Pascal Vasseur, '*Localization based on target classification with a multisensor mobile robot*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 1111-1115, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Del97] Laurent Delahoche, Claude Pégard, Bruno Marhic and Pascal Vasseur, '*A navigation system based on an omnidirectional vision sensor*'. Proceeding of IROS, pp.718-724, 1997.
- [Dev92] O. Devise and C. Doncarli, '*Motion estimation of a mobile robot with uncadenced bearings only measurements*'. Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems, pp. 1687-1692, Kobe, Japan, September 16-20, 1992.
- [Dev93] O. Devise and C. Doncarli, '*Localisation dynamique d'un robot mobile : approche par fusion de données d'un problème de filtrage statistique*'. Traitement du Signal, volume 10, n° 4, pp. 311-318, 1993.

- [Dis02] Gamini Dissayanake, Stephan B. Williams, Hugh Durrant-Whyte and Tim Bailey, '*Map management for efficient simultaneous localization and mapping (slam)*'. Journal of Autonomous Robots, n°12, pp. 267-286, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [Doy89] J. Doyle, K. Glover, P.P. Khrgonekar and B.A. Francis, '*State space solution to standard H_∞ control problems*'. IEEE Transactions on Automatic Control, volume 34, n° 8, pp. 831-847, 1989.
- [Dro02] Cyril Drocourt, '*Localisation et modélisation de l'environnement d'un robot mobile par coopération de deux capteurs omnidirectionnels*'. Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, CREA, Février 2002.
- [Dru87] M. Drumheller, '*Mobile robot localization using sonar*'. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 9, issue 2, pp. 325-332, March 1987.
- [Dub98] Dubrawski and Siematkowska, '*A method for tracking pose of a mobile robot equipped with a scanning laser range finder*'. In proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998.
- [Dub92] D. Dubois and H. Prade, '*Combination of fuzzy information in the framework of possibility theory*'. In Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence, M. A. Abidi. And R. C. Gonzalez, (eds), Academic Press, pp. 4481-4505, 1992.
- [Duc01] Tom Duckett and Ulrich Nehmzow, '*Mobile robot self-localization using occupancy histograms and a mixture of gaussian location hypotheses*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 34, pp. 117-129, Elsevier Science Publishers, 2001.
- [Dul97] Hansye S. Dulimarta and Anil K. Jain, '*Mobile robot localization in indoor environment*'. Pattern Recognition, Elsevier Science Publishers, volume 30, n°1, pp. 99-111. 1997.
- [Dur91] Cécile Durieu and H. Clergeot, '*Une approche statistique pour la localisation de robots mobiles dans un environnement balisé*'. R.A.I.R.O. Automatique Productique Informatique Industrielle, volume 25, n°5, pp. 437-461, 1991.
- [Dur96] Cécile Durieu, Marie-José Aldon and Dominique Meizel, '*La fusion de données multisensorielles pour la localisation en robotique mobile*'. Traitement du Signal, volume 13, n° 2, pp. 143-165, 1996.
- [Dur90] H.F. Durrant-Whyte, B.Y.S. Rao and H. Hu, '*Toward a Fully Decentralized Architecture for Multi-Sensor Data Fusion*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pp. 1331-1336, Cincinnati, Ohio, May 13-18, 1990.
- [Ein97] Tobias Einsele and Georg Färber, '*Real-time self-localization in unknown indoor environments using a panorama laser range finder*'. IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 697-702, IROS'97, Grenoble, France, 7-11 September 1997.
- [Elf87] A. Elfes, '*Sonar-based real world mapping and navigation*'. IEEE Journal of Robotics and automation, volume 3, n° 3, pp. 249-265, June 1987.
- [Ell96] Rajiv Ellepola and Peter Kevesi, '*Mobile robot navigation in a semi-structured environment*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 914-918, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Fer92] André Ferrand, '*Localisation relative des robots mobiles*'. RAPA, volume 5, n° 3, pp. 89-100, 1992.

- [Fox98] Dieter Fox, Wolfram Burgard, Sebastian Thrun and Armin B. Cremers, '*Position estimation for mobile robots in dynamic environments*'. In Proceedings of the Fifteenth Nationale Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Madison, Wisconsin, 1998.
- [Fox99] Dieter Fox, Wolfram Burgard and Sebastian Thrun, '*Probabilistic methods for mobile robot mapping*'. Proceeding of IJCAI 99, Workshop on Adaptive Spatial representations of Dynamic environments, 1999.
- [Gao02] J.B. Gao and C.J. Harris, '*Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion*'. Journal of Information Fusion, n°3, pp. 191-201, Elsevier Science Publishers, 2002.
- [Gas99] J. Gasos and A. Saffiotti, '*Integrating fuzzy geometric maps and topological maps for robot navigation*'. Proceedings of the 3rd International ISSC Symposium on Soft Computing SOCO'99, Gene, Italy, June 1999.
- [Gui95] Guibas, Motwani and Raghavan, '*The robot localization problem*'. In Goldberg, Halperin, Latombe and Wilson editors. Algorithmic Foundations of Robotics. The 1994 Workshop on the Algorithmic Foundation of Robotics, A. K. Peters, 1995.
- [Gui00] Guivant, Nebot and Baiker, '*Autonomous navigation and map building using laser range sensor in outdoor application*'. In proceedings of IEEE, International Conference on Robotics and Automation, pp. 3817-3822, 2000.
- [Gon04] José-Joël Gonzalez-Barbosa, '*Vision Panoramique pour la robotique mobile : stéréovision et localisation par indexation d'images*'. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, Janvier 2004.
- [Gra89] Pierrick Grandjean and Arnaud Robert, '*3-D modeling of indoor scenes by fusion of noisy range and stereo data*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pp. 681-687, 1989.
- [Gro01] Axel Großmann and Riccardo Poli, '*Robust mobile robot localization from sparse and noisy proximity readings using Hough transform and probability grids*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 37, pp. 1-18, Elsevier Science Publishers, 2001.
- [Ha99] Q.P. Ha, D.C. Rye and H.F. Durrant-Whyte, '*Robust sliding mode control with application*'. International Journal of Control, volume 72, n° 12, pp. 1087-1096, 1999.
- [Had98] Y. Haddab, S. Dembele, P. Moal and A. Bourjault, '*Autonomous mobile robot for navigation and precise positioning*'. First National Colloquium on Computer-Integrated Manufacturing, 1998.
- [Haj95] S. Hajri, M. Benrejeb and P. Borne, '*Sur une nouvelle approche de la commande par mode glissant*'. JETA, Nabeul, Tunisie, 1995.
- [Hal97] D. Hall and J. Linas, '*An introduction to multisensor data fusion*'. Proceedings of IEEE, pp. 6-23, pp. 112-148, 1997.
- [Ham97] T. Hamel, P. Soueres and D. Meizel, '*A two-steps robust path-following controller for wheeled robots*'. Rapport LAAS N°97017. 5ème IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO'97), pp.17-24, Nantes, France, 3-5 Septembre 1997.
- [Ham98] T. Hamel, P. Soueres and D. Meizel, '*Path-following with security margin for mobile robots*'. Rapport LAAS N°97568. 5th IEEE Mediterranean Conference on Control and Systems, Paphos (Chypre), 21-23 Juillet 1997. Version révisée, Mars 1998.

- [Han00] Youngjoon Han and Hernsoo Hahn, '*Localisation and classification of target surfaces using two pairs of ultrasonic sensors*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 33, pp. 31-41, Elsevier Science Publishers, 2000.
- [Har96] Hans-Joachim von der Hardt, Didier Wolf and René Husson, '*Localization of a wheeled mobile robot using incremental odometry, a gyroscope and a magnetic compass*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 1116-1120, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Has92] M. Hashimoto, F. Oba, K. Imamaki and T. Nishida, '*Mobile robot localization using integrated dead reckoning and laser/corner cube based location systems*'. Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems, pp. 1645-1650, Kobe, Japan, September 16-20, 1992.
- [Her96], P. Herbért, S. Betgé-Brezetz and R. Chatila, '*Probabilistic map learning : necessity and difficulties*'. In Leo Dorst Michiel Van Lambalgen and Frans Voorbraak editors, Reasoning with Uncertainty in Robotics, pp. 307-321. Springer 1996.
- [Hol92] Alois A. Holenstein, Markus A. Müller and Essam Badreddin, '*mobile robot Localization in a structured environment with obstacles*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pp. 2576-2581, Nice, France, May 1992.
- [Hop00] Phillipe Hoppenot, Etienne Colle and Christian Barat, '*Off line localization of a mobile robot using ultrasonic measures*'. Robotica, volume 18, pp. 315-323, 2000.
- [Hor94] Joachim Horn and Joachim Russ, '*Localization of a mobile robot by matching 3D-laser-range-images and predicted sensor images*'. Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium, pp. 345-350, October 24-26, Paris, France, 1994.
- [How96] Andrew Howard and Les Kitchen, '*Generating sonar maps in highly specular environments*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 1870-1874, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Hua96] Loulin Huang and Jagannathan Kanniah, '*An approach for position estimation and navigation of a mobile robot*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 1121-1124, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Hua97] Jie Huang, Tadawute Supaongprapa, Ikutaka Terakura, Noboru Ohnishi and Noboru Sugie, '*Mobile robot and sound localization*'. IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'97, pp. 683-689, Grenoble, France, 7-11 September 1997.
- [Jal92] M. Jallouli, E. Colle and F. Chavand, '*Dispositif de localisation par télémétrie ultrasonore et balises actives codées*'. RAPA, volume 5, n°1, 1992.
- [Jet97] L. Jetto, S. Longhi and G. Venturini, '*Development and experimental validation of an adaptive estimation algorithm for the on-line localization of mobile robots by multisensor fusion*'. Preprints of the fifth IFAC Symposium on Robot Control, pp. 165-172, Nantes France, September 3-5, 1997.
- [Jun04] Il-Kyun Jung, '*Cartographie et localisation simultanée en environnements 3D à partir de stéréovision*'. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, Mars 2004.
- [Kan 91] Yutaka Kanayama, Yoshihiko Kimura, Fumio Miyazaki and Tetsuo Noguchi, '*A stable tracking control method for an autonomous mobile robot*'. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS 1991, p. 1236-1241, Osaka, 1991.

- [Kle92] Lindsay Kleeman, '*Optimal estimation of position and heading for mobile robots using ultrasonic beacons and dead-reckoning*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pp. 2582-2587, Nice, France, 1992.
- [Kle95] Lindsay Kleeman, '*A three dimensional localiser for autonomous robot vehicles*'. Robotica, volume 13, pp. 87-94, Cambridge University Press, 1995.
- [Kro89] Eric Krotkov, '*Mobile robot Localization using a single image*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pp. 978-983, 1989.
- [Lab93] M. Labarrere, J.P. Krief and B. Gimonet, '*Le filtrage et ses applications*'. Cepadues éditons, troisième édition, Novembre 1993.
- [Lam96] A. Lambert, '*Planification de tâches-robots par une approche possibiliste*'. Chap. 3, PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 1996.
- [Lau01] Laumond Jean Paul, '*La robotique mobile*', Traité IC2, série Information - Commande - Communication, Hermès Science Publications, 2001.
- [Le91] Le Corre J. -F. and Garcia G., '*Dynamic localization of a vehicle using passive beacons*'. RAPA, volume 4, n° 1, pp. 67-73, 1991.
- [Leo91] John J. Leonard and Hugh F. Durrant-Whyte, '*Mobile robot localization by tracking geometric beacons*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 7, n° 3, pp. 376-382, Juin 1991.
- [Leo92] John J. Leonard and Hugh F. Durrant-White, '*Directed sonar sensing for mobile robot navigation*' Kluwer Academic Publishing, 1992.
- [Lev97] O. Lévêque, L. Jaulin, D. Meizel and E. Walter, '*Vehicle localization from inaccurate telemetric data: a set-inversion approach*'. Preprints of the fifth IFAC Symposium on Robot Control, pp. 179-185, Nantes, France, September 3-5, 1997.
- [Lob03] Jorge Lobo, Carlos Queiroz and Jorge Dias, '*World feature detection and mapping using stereovision and inertial sensors*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 44, pp. 69-81, Elsevier Science Publishers, 2003.
- [Lu94] F. Lu and E. Milios, '*Robot pose estimation in unknown environments by matching 2D range scans*'. In CVPR 94, pp. 935-938, 1994.
- [Luc98] A. De Luca, G. Oriolo and C. Samson, '*Feedback control of a nonholonomic car-like robot*'. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 229, J-P. Laumond Ed., Springer 1998.
- [Mad98] Claus B. Madsen and Claus S. Andersen, '*Optimal landmark selection for triangulation of robot position*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 23, pp. 277-292, 1998.
- [Mak03] Alexei A. Makarenko, Stefan B. Williams and Hugh F. Durrant-whyte, '*Decentralized certainty grid maps*'. Intelligent Robots and Systems, IROS, 2003.
- [Mal01] Anthony Mallet, '*Localisation d'un robot mobile autonome en environnements naturels*'. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse Juillet 2001.
- [Mar84] L. Marce, M. Julliere, H. Perrichot and C.J. Zhao, '*Localisation absolue d'un robot mobile à l'aide d'un télémètre-laser panoramique*'. 4^{ème} Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, tome 1, pp. 399-408, Paris, France, 25-27 Janvier 1984.

- [Marl04] Sylvain Marleau, '*Système embarqué de localisation et de perception pour un robot mobile*'. Ecole Polytechnique de Montréal, Cours Séminaire ELE6904, pp. 1-5, Avril 2004.
- [Mart01] Agostino Martinelli, '*A possible strategy to evaluate the odometry error of a mobile robot*'. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1946-1951, Maui, Hawaii, USA, October 29-November 03, 2001.
- [Mart02a] Agostino Martinelli, '*The odometry error of a mobile robot with a synchronous drive system*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 18, n°3, pp. 399-405, June 2002.
- [Mart02b] Agostino Martinelli, '*Evaluating the odometry error of a mobile robot*'. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 853-858, EPFL, Lausanne, Switzerland, October 2002.
- [Mart03] Agostino Martinelli, Nicola Tomatis, Adriana Tapus and Roland Siegwart, '*Simultaneous localization and odometry calibration for mobile robot*'. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1499-1504, Las Vegas, Nevada, October 2003.
- [Mon03] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller and Ben Wegbreit, '*Fast SLAM 2.0 : an improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges*'. International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI – 2003.
- [Mor88] H.P. Moravec, '*Sensor fusion in certainty grids for mobile robots*'. AI Magazine, 1988.
- [Mos02] Behzad Moshiri, Mohammad Reza Asharif and Hosein Nezhad, '*Pseudo information measure : a new concept for extension of Bayesian fusion in robotic map building*'. Journal of Information Fusion, n°3, pp. 51-68, Elsevier Science Publishers, 2002.
- [Mou91] Mustapha Mouaddib, Claude Pégard and B. Dolphin, '*Localisation et recalages pour un robot mobile autonome*'. RAPA, volume 4, n° 4, pp. 375 – 392, 1991.
- [Muk00] Toshiharu Mukai and Noboru Ohnishi, '*Object shape and camera motion recovery using sensor fusion of a video camera and a gyro sensor*'. Journal of Information Fusion, n°1, pp. 45-53, Elsevier Science Publishers, 2000.
- [Mur99] K. Murphy, '*Bayesian map learning in dynamic environments*'. NIPS-1999.
- [Nag98] Keiji Nagatani, Howie Choset and Sebastian Thrun, '*Towards exact localization without explicit localization with the generalised voronoi graph*'. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'98, pp. 3437-3443, May 1998.
- [Nar96] Katsuhoro Narikiyo and Hitoshi Takata, '*A Formal linearization of discrete-time nonlinear systems by the cubic spline interpolation and a nonlinear filter*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 1790-1794, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Nis95] Toshihiro Nishizawa, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta, '*An implementation of on-board position estimation for a mobile robot*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 395-400, Nagoya, Aichi, Japan, May 21-27, 1995.
- [Ohy97] Akihisa Ohya, Akio Kosaka and Avi Kak, '*Vision-based navigation of mobile robot with obstacle avoidance by single camera vision and ultrasonic sensing*'. IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'97, pp. 704-711, Grenoble, France, 7-11 September 1997.

- [Ols99] C.F. Olson, '*Subpixel localization and uncertainty estimation using occupancy grids*'. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'99, 1999.
- [Opd94] J. Opderbecke, '*Localisation d'un robot mobile par fusion de données multisensorielles dans un environnement structuré*'. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, 1994.
- [Ous96] M. Oussalah, H. Marref and C. Barret, '*Localisation d'un robot mobile : étude comparative entre le filtrage de Kalman et la théorie des possibilités*'. COMAEI, volume 1, pp. 26-37, Tlemcen, Algeria, 3-5 Décembre 1996.
- [Ous97] M. Oussalah, H. Marref and C. Barret, '*Positioning of a mobile robot with landmark-based method*'. Proceeding of IROS 97, pp. 865-871, 1997.
- [Pag98] D. Pagac, E. Nebot and H.F. Durrant-White, '*An evidential approach to map-building for autonomous vehicles*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 14, n° 4, pp. 623-629, August 1998.
- [Par99] Claude Parra, '*Contribution à la modélisation topologique par vision 2D et 3D pour la navigation d'un robot mobile sur terrain naturel*'. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Mars 1999.
- [Par02] Michel Parent, Edern Ollivier, Yannick Bedhomme, Mathieu Gueguen, Mikael Kais and Tim Meisner, '*Navigation par odométrie et recalage par des balises placées dans l'environnement*'. Intelligent Vehicle Symposium, IV'2002 DEMOS, Versailles, France, 21 Juin 2002.
- [Peg91] Claude Pégard, Eric Brassart, J.-F. Arnould, A. Lebrun and Mustapha Mouaddib, '*Système de localisation absolue pour les robots mobiles*'. RAPA, volume 4, n° 3, pp. 295-308, 1991.
- [Peg93] Claude Pégard, Eric Brassart and Mustapha Mouaddib, '*Réseau de balises ultrasoniques pour la localisation des robots mobiles*'. RAPA, volume 6, n° 1, pp. 97 – 109, 1993.
- [Pra01] Cédric Pradalier, '*Conception d'un système de localisation pour un robot mobile : utilisation d'un télémètre laser et placement d'amers dans l'environnement*'. Mémoire de D.E.A. de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Juin 2001.
- [Pre91] A. Preciado, D. Meizel, A. Segovia and M. Rombaut, '*Fusion of multi-sensor data : a geometric approach*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pp. 2806-2811, Sacramento, California, April 1991.
- [Raf 94] C. Rafflin, M.J. Aldon and A. Fournier, '*Mobile robot trajectory learning using absolute and relative localization data*'. Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium, pp. 526-531, Paris, France, October 24-26, 1994.
- [Ran02] P. Ranganathan, J.B. Hayet, M. Devy, S. Hutchinson, and F. Larasle, '*Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multisensory perception*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 41, pp. 137-144 Elsevier Science Publishers, 2002.
- [Rie00] Marcel Riess, '*Qualification d'un télémètre à balayage laser pour la robotique mobile : intégration et expérimentations*'. Mémoire d'ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers, Grenoble 2000.

- [Rig00] G.G. Rigatos, C.S. Tzafestas and S.G. Tzafestas, '*Mobile robot motion control in partially unknown environments using a sliding-mode fuzzy-logic controller*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 33, pp. 1-11, Elsevier Science Publishers, 2000.
- [Riz00] Alessandro Rizzi, Riccardo Cassinis, '*A robot self-localization system based on omnidirectional color images*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 34, pp. 23-38, Elsevier Science Publishers, 2000.
- [Roh97] Kyoung Sig Roh, Wang Heon Lee and In So Kweon, '*Obstacle detection and self-localization without camera calibration using projective invariants*'. Proceeding of IROS, pp.1030-1035, 1997.
- [Rou97] S. Roumeliotis and G. Bekey, '*An extended Kalman filter for frequent local and infrequent global sensor data fusion*'. 1997.
- [Ruc95] W.J. Rucklidge, '*Locating objects using the hausdorff distance*'. In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Computer Vision, 1995.
- [Sab94] Angelo M. Sabatini and Orazio Di Benedetto, '*Towards a robust methodology for mobile robot localisation using sonar*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3142-3147, San Diego, California, 8-13 May 1994.
- [San97] A. Santini, S. Nicosia and V. Nanni, '*Trajectory estimation and correction for a wheeled mobile robot using heterogeneous sensors and kalman filter*'. Preprints of the fifth IFAC Symposium on Robot Control, pp. 11-16, Nantes, France, September 3-5, 1997.
- [Sar89] Karen B. Sarachik, '*Characterising an indoor environment with a mobile robot and uncalibrated stereo*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pp. 984-989, 1989.
- [Sch94] B. Schiele and J. Crowley, '*A comparison of position estimation techniques using occupancy grids*'. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'94, 1994.
- [Sch96] C. Schmidt, '*Appariement d'images par invariants locaux de niveaux de gris. Application à l'indexation d'une base d'objets*'. Chapitres 3 et 4, PhD thesis, INPG 1996.
- [Seq95] Vitor Sequeira, João G.M. Gonçalves and M. Isabel Ribeiro, '*3D environment modelling using laser range sensing*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 16, pp. 81-91, Elsevier Science Publishers 1995.
- [Sha97] S. Shah and J.K. Aggarwal, '*Mobile robot navigation and scene modeling using stereo fish-eyes lens system*'. Machine vision and applications, volume 10, n° 4, pp. 159-173, 1997.
- [Sli01a] N. Slimane and N. Bouguechal, '*Position estimation for a mobile robot using odometry and passive beacons*'. IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, volume 2, pp. 731-735, Miedzyzdroje, Poland, August 2001.
- [Sli01b] N. Slimane and N. Bouguechal, '*Dispositif ultrasonore destine à la localisation des robots mobiles*'. 1^{er} Séminaire National sur le Contrôle et les Signaux, pp. 183-187, Djelfa, Algérie, October 2001.
- [Sli02] N. Slimane and N. Bouguechal, '*Mobile robot localization : a data fusion approach*'. International Conference on Modelling and Simulation, pp. 613-620, Girona, Spain, 25-27 June 2002.
- [Sli03] N. Slimane and N. Bouguechal " Correction of mobile robot position by a data fusion model " Journal of AMSE, December 2003.

- [Sli04] N. Slimane, Y. Abdessemed and N. Bouguechal, 'A real time controller based on multi-sensor data fusion for an autonomous wheeled mobile robot'. Journal of Electrical Engineering, volume 4, n°1, pp. 31- 37, March 2004.
- [Smi88] R. Smith, Mr. Self and P. Cheese Man, '*Estimating uncertainties in space relationships in robotics*'. Uncertainty in Artificial Intelligence, volume 2, Elsevier Science Publishers, 1988.
- [Ste94] E. Stella, F.P. Lovergine, L. Caponetti and A. Distanto, '*Mobile robot navigation using vision and odometry*'. Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium, pp. 417-422, Paris, France, October 24-26, 1994.
- [Tas95] K. Tashiro, J. Ota, Y.C. Lin and T. Arai, '*Design of the optimal arrangement of artificial landmarks*'. In proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995.
- [Tay96a] A. Tayebi, M. Tadjine and A. Rachid, '*Path-Following and point-Stabilization control laws for wheeled mobile robot*'. In Proceeding of the IEEE, UKACC International Conference On Control, pp. 878-883, Conference Publication No 427, 2-5 September 1996.
- [Tay96b] A. Tayebi and A. Rachid, '*Path-Following control law for an industrial mobile robot*'. Proceeding of the IEEE International Conference On Control applications, pp. 703-707, Dearborn, MI. 15-18 September 1996.
- [Tay96c] A. Tayebi, M. Tadjine and A. Rachid, '*Nonlinear state feedback control of a nonholonomic wheeled mobile robot*'. COMAEI, volume 1, pp. 148-153, Tlemcen, Algeria, 3-5 december 1996.
- [Thr98] S. Thrun, J.S. Gutmann, D. Fox, W. Burgard and B. Kuipers, '*Integrating topological and metric maps for mobile robot navigation : a statistical approach*'. In proceedings of the 15th National Conference of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI), July 1998.
- [Thr99] S. Thrun, '*Learning metric and topological maps for indoor mobile robot navigation*'. Artificial Intelligence, pp. 21-71, 1999.
- [Thr00] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, '*A real time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [Tom01] Nicola Tomatis, Illah Nourbakhsh and Roland Siegwart, '*Simultaneous localization and map building : a global topological model with local metric maps*'. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 421-426, Maui, Hawaii, USA, October 29-November 03, 2001.
- [Tom03] Nicola Tomatis, Illah Nourbakhsh and Roland Siegwart, '*Hybrid simultaneous localization and map building : a natural integration of topological and metric*'. Journal of Robotics and Autonomous Systems, n° 44, pp. 3-14, Elsevier Science Publishers, 2003.
- [Tso98] V.S. Tsonis, K.V. Chandrinos and P.E. Trahanias, '*Landmark-based navigation using projective invariants*'. In proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1998.
- [Tsu84] Tsumura T. and al, '*A new method of position and heading measurement of ground vehicle by use of laser and corner cube*'. IEEE 1984.
- [Tsu86] Tsumura T. and al, '*Positioning and guidance of ground vehicle*'. IEEE conference, San Francisco, 1986.

- [Utk94] Vadim Utkin, '*Sliding mode control in mechanical systems*'. pp. 1429-1431, IEEE 1994.
- [Wal97] F. Wallner, '*Estimation de la position d'un robot mobile par l'utilisation des composantes principales des données télémétriques laser*'. Chapitre 3, PhD thesis, INPG 1997.
- [Wan88] Ming Wang C., '*Location estimation and uncertainty analysis for mobile robots*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pp. 1230-1235, Philadelphia, 1988.
- [Wan94] Wang, L-X., '*Adaptive fuzzy systems and control*'. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, USA, 1994.
- [Wan02] C.H. Wang, H.L. Liu and T.C. Lin, '*Direct adaptive fuzzy-neural control with state observer and supervisory controller for unknown nonlinear dynamical systems*'. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, volume 10, n°1, 2002.
- [Wat90] Yutaka Watanabe and Shin'ichi Yuta, '*Position estimation of mobile robots with internal and external sensors using uncertainty evolution technique*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2011-2016, 1990.
- [Wil76] D. Willner, C.B. Chang and K. P. Dunn, '*Kalman filter algorithms for a multi-sensor system*', IEEE International Conference on Decision and Control, pp. 570-574, Florida, December 1-3, 1976.
- [Xi96] M. Xi, N. Härle and W. W. Boles, '*Image sequence guidance for mobile robot navigation*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 909-913, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Yag95] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida, '*Map-based navigation for a mobile robot with omnidirectional image sensor COPIS*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 11, n° 5, pp. 634-648, October 1995.
- [Yan] Jung-Min Yang and Jong-Hwan Kim, '*Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots*'. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 15, numéro 3, pp. 578-587, June 1999.
- [Yen96] Levent Yenilmez and Hakan Temeltas, '*Enabling an autonomous mobile robot to determine its actual position and orientation by using an ultrasonic ring*'. The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'96), pp. 1125-1129, Singapore, 3-6 December, 1996.
- [Yoo98] B. Yoo and W. Ham, '*Adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear system*'. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, volume 6, n° 2, pp. 315-321, 1998.
- [Zha92] Yilin Zhao and Spencer L. BeMent, '*Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots*'. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1, pp. 91-96, Nice, France, May 1992.