

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGY
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE
N° :



DOMAINE : SCIENCE TECHNOLOGY
FILIERE : AUTOMATIQUE
OPTION : ROBOTIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Professionnel

Par : BOUSSAKRA Fouad / BENYAHIA Noureddine

Intitulé

LOCALISATION D'UN ROBOT MOBILE
PAR FILTRE DE KALMAN

Soutenu devant le jury composé de :

BOUKHALFA Abdelouahab	Université de M'sila	Président
AIB Abdelghani	Université de M'sila	Rapporteur
IDIR Abdelhakim	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022 / 2023

المخلص: يعد تحديد موقع الروبوت المتنقل مجالاً أساسياً للدراسة والتطوير لتمكين الروبوتات من التحرك والتفاعل بشكل فعال مع بيئتها. من خلال الجمع بين المستشعرات والخوارزميات المختلفة، يمكن تقدير موقع واتجاه الروبوت بدقة. في هذا السياق، الهدف من هذا العمل هو تطوير والتحقق من صحة نهج تحديد الموقع بقياس الزوايا للروبوت المتنقل من خلال محاكاة MATLAB على أساس مرشح كالمان. أثبتت النتائج التي تم الحصول عليها فعالية الخوارزمية المستخدمة، لا سيما من حيث تقدير مواقع الروبوت في بيئة معروفة.

الكلمات المفتاحية: روبوت متنقل، تحديد الموقع، مرشح كالمان، تحديد الموقع بقياس الزوايا.

Résumé: La localisation d'un robot mobile est un domaine d'étude et de développement essentiel pour permettre aux robots de se déplacer et d'interagir efficacement avec leur environnement. En combinant différents capteurs et algorithmes, on peut estimer avec précision la position et l'orientation du robot. Dans ce contexte l'objectif de ce travail est le développement et la validation par simulation sur MATLAB de l'approche de localisation goniométrique d'un robot mobile basé sur le Filtre de Kalman. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'algorithme utilisé, notamment en termes de l'estimation des positions de robot dans un environnement connu.

Mots clés: Robot mobile, Localisation, Filtre de Kalman, Localisation goniométrique.

Abstract: Locating a mobile robot is an essential area of study and development to enable robots to move and interact effectively with their environment. By combining different sensors and algorithms, the position and orientation of the robot can be accurately estimated. In this context, the objective of this work is the development and validation by simulation on MATLAB of the goniometric localization approach of a mobile robot based on the Kalman Filter. The results obtained proved the effectiveness of the algorithm used, particularly in terms of estimating robot positions in a known environment.

Keywords: Mobile robot, Location, Kalman filter, Goniometric location.

SOMMAIRE

Introduction général :	1
------------------------------	---

CHAPITRE I : Généralités sur les robots mobiles

1.Introduction.....	3
1.1. Les types de robot mobile :.....	4
1.1.1. Les humanoïdes :	4
1.1.2. Les robots industriels :	5
1.1.3. Les robots mobiles :	5
1.2. Schéma Global de la fonction mobilité :	6
1.3. Les systèmes de perception :	7
1.3.1. Les capteurs proprioceptifs :.....	8
1.3.1.1. Les capteurs de déplacement :	9
a- Les odomètres :	9
b- Les accéléromètres :	9
1.3.1.2. Les capteurs d'attitude :.....	9
1.3.1.3. Le gyroscope, gyromètre et gyrocompas :	9
1.3.1.4. Le magnétomètre ou compas magnétique :	11
1.3.2. Les capteurs extéroceptifs:	11
1.3.2.1. Les capteurs télémétriques:	12
a- Les captures à ultrasons:	12
b- Les captures laser :	13
1.3.2.2. Les systèmes de vision :	13
1.4. Localisation de Robot mobile :.....	14
1.4.1. Localisation odométrique :	14
1.4.2. Localisation télémétrique :	15

1.4.3. Localisation multi capteurs :	16
1.5. Conclusion :	17

CHAPITRE II : Localisation des robots mobiles

2.1 Introduction.....	18
2.2 Localisation du robot mobile.....	18
2.2.1 L'odométrie.....	19
2.2.1.1 Principe d'odométrie.....	20
2.2.1.2 Avantages et inconvénients de l'odométrie.....	21
2.2.2 La Télémétre.....	21
2.2.2.1 localisation sur balises.....	22
2.2.2.2 Avantages et inconvénients de La Télémétre.....	23
2.3 Localition multi-capteur.....	24
2.3.1 Localisation par recalage simple :	24
2.3.2 Localisation par moyenne pondérée :	25
2.3.3 Localisation par filtre de kalman.....	25
2.3 Conclusion.....	28

CHAPITRE III : Localisation goniométrique d'un robot mobile

3.1. Introduction :	29
3.2.La problématique :	30
3.3. L'équation d'évolution d'état linéaire :	30
3.4. L'équation d'observation associée :	31
3.5. Implémentaire une Filtre de Kalman pour la localisation :	32
3.6. Les résultats :	35
3.7. Conclusion :	37
Conclusion General:	38
Références :	39

Liste des Figures :

Figure I.1 : robot humanoïdes.....	4
Figure I.2 : Robot SCARA par Epson (industriel).....	5
Figure I.3: iRobot 510 Packbot (robot mobile).....	6
Figure I.4 : Schéma de la fonction mobilité autonome.....	7
Figure I.5 : Chaîne fonctionnelle d'un système de navigation.....	7
Figure I.6 : Exemple de robot mobile : le robot MiniRex, conçu au LISA (université d'Angers).	8
Figure I.7 : Gyroscope.....	10
Figure I.8 : Gyromètre.....	10
Figure I.9 : Gyrocompas.....	11
Figure I.10 : compas magnétique.....	11
Figure I.11 : cône d'émission d'un faisceau ultrasonore.....	12
Figure I.12 : Odométrie d'un robot.....	14
Figure II.1 : formalisme du problème de localisation d'un robot mobile.....	19
Figure II.2: calcul de la position grâce à l'odométrie.....	19
Figure II.3 : principe de fonctionnement d'un capteur ultrason.....	21
Figure II.4: Multi-balises simples.....	23
Figure II.5 : Schéma de fonctionnement du filtre de Kalman.....	26
Figure III.1: le robot mobile dans un environnement.....	30
Figure III.2 : La position du robot par rapport une Landmark m.....	31
Figure III.3: organigramme d'implémentation du filtre de kalman pour la localisation goniométrique.....	33
Figure III.4: L'état initial du robot.....	35
Figure III.5: Observation des Landmarks.....	35
Figure III.6: L'évolution du robot dans la carte.....	36
Figure III.7: Correction des erreurs d'évolution.....	36

Introduction générale

Introduction générale :

Les robots mobiles sont des machines autonomes qui peuvent se déplacer dans leur environnement pour accomplir une tâche spécifique. Ils sont souvent équipés de capteurs pour percevoir leur environnement, tels que des capteurs de distance, de vitesse, de position, de vision et de son. Ces capteurs sont essentiels pour permettre au robot de prendre des décisions et de naviguer efficacement dans son environnement. [1]

Cependant, les mesures obtenues à partir de ces capteurs sont souvent bruitées et contiennent des erreurs. Pour améliorer la précision des mesures et obtenir une estimation plus précise de l'état du système, des algorithmes de filtrage peuvent être utilisés. Les filtres sont des algorithmes qui combinent les mesures de capteurs et les modèles mathématiques du système pour estimer l'état actuel du robot.

Parmi les filtres les plus couramment utilisés pour la localisation des robots mobiles, on trouve le filtre de Kalman et ses variantes. Le filtre de Kalman est un algorithme de filtrage optimal qui utilise un modèle mathématique du système pour estimer l'état actuel en utilisant des mesures de capteurs bruitées. Il est largement utilisé pour la localisation de robots mobiles en raison de sa simplicité, de sa rapidité de calcul et de sa précision. [2]

Dans ce qui suit, nous allons explorer l'utilisation des capteurs et des filtres pour la localisation des robots mobiles, en mettant l'accent sur le filtre de Kalman et ses applications.

Lorsqu'il s'agit de la localisation d'un robot mobile, il est essentiel de comprendre comment le robot se situe et se déplace dans son environnement. La localisation est le processus qui permet au robot de déterminer sa position et son orientation dans un espace donné. C'est une compétence cruciale pour que le robot puisse naviguer de manière autonome, effectuer des tâches spécifiques et interagir efficacement avec son environnement.

La localisation d'un robot mobile peut être réalisée de différentes manières, en fonction des capteurs et des algorithmes utilisés. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve la localisation basée sur des capteurs de distance tels que les capteurs ultrasoniques ou les capteurs laser, qui mesurent les distances entre le robot et les obstacles environnants. Ces données sont ensuite utilisées pour estimer la position du robot en utilisant des techniques telles que la triangulation ou la corrélation. [1], [2], [3]

Une autre approche populaire est la localisation basée sur la vision par ordinateur, où des caméras sont utilisées pour capturer des images de l'environnement. En analysant ces images, le robot peut extraire des informations visuelles, telles que des repères ou des caractéristiques distinctives, pour estimer sa position.

La précision et la fiabilité de la localisation sont des aspects cruciaux pour le bon fonctionnement d'un robot mobile. Des erreurs de localisation peuvent entraîner des collisions avec des obstacles, des mouvements incohérents ou une incapacité à accomplir des tâches spécifiques. C'est pourquoi la recherche continue à s'efforcer d'améliorer les techniques de localisation, en utilisant des algorithmes plus sophistiqués, des capteurs plus précis et des modèles d'apprentissage automatique pour améliorer la perception du robot et sa capacité à s'orienter dans son environnement. [3]

Introduction générale

Le présent travail port principalement sur l'utilisation du filtre de kalman pour la localisation goniométrique d'un robot mobile. Voici un résumé des différents chapitres et sections :

Introduction générale :

- Introduction sur la localisation des robots mobiles par le filtre de Kalman.
- Importance de la localisation précise dans le contexte des robots mobiles.

Chapitre I :

- Présentation générale des robots mobiles, leur architecture et les concepts clés.
- Exemples des types de robots les plus courants avec des systèmes perceptuels.
- Présentation des principes de localisation utilisés dans les robots mobiles.

Chapitre II :

- Méthodes couramment utilisées pour la localisation des robots mobiles.
- Description des différentes méthodes, y compris l'odométrie, les capteurs inertiels, les systèmes d'imagerie, les balises et les marqueurs, la poursuite par satellite.
- Discussion sur l'utilisation individuelle ou combinée de ces méthodes pour améliorer la précision et la robustesse de la localisation.
- Description détaillée de la méthode goniométrique utilisée dans notre étude.

Chapitre III :

- Introduction détaillée de la méthode de localisation goniométrique.
- Présentation de la problématique de l'étude et de la solution proposée avec des détails spécifiques.
- Application de l'algorithme de filtrage de Kalman à la méthode de localisation goniométrique.
- Présentation et discussion des résultats obtenus.

Conclusion générale :

- Explication de l'importance du filtre de Kalman dans la localisation des robots mobiles.
- Mise en évidence de l'efficacité de la méthode goniométrique pour la localisation des robots mobiles.
- Résumé des principaux résultats obtenus.

Chapitre I : Généralité sur les robots mobiles

1.1 Introduction :

La robotique mobile autonome est un axe de recherche visant à permettre aux machines de naviguer dans leur environnement sans aide ni intervention humaine. Le terme machine désigne ici à la fois la machine classique qui opère clairement dans l'environnement et l'ordinateur qui fournit une aide à la décision.

Le concept de base de cette recherche est l'autonomie. Aujourd'hui, même si nous savions construire des robots mobiles, et si nous pouvions leur donner une structure mobile suffisamment puissante pour leur permettre d'évoluer dans des environnements divers et parfois difficiles, ils ne seraient quand même pas si autonomes. Cela nécessite un contrôle, une attention et une expertise humaine pour effectuer des tâches utiles. Le concept de robots mobiles autonomes est né à la fin des années 1960 de deux sources très différentes. [1]

Tout d'abord, les recherches menées au Stanford Research Institute sur la possibilité de donner aux machines la capacité de raisonner et de réagir aux événements extérieurs. C'est pourquoi nous avons créé Shakey, une machine à roues avec une caméra qui peut être connectée à un ordinateur et prendre des photos de son environnement. Il évolue dans un univers de cubes et de pyramides de tailles et de couleurs variées. La mission de Shakeya est de récupérer des objets et de les transporter vers un autre endroit, quel que soit l'endroit. Chaque mission dure près de 50 minutes. [1], [2]

L'industrie nucléaire, en revanche, a besoin de machines qui peuvent être actionnées à distance dans des environnements surpeuplés inaccessibles à l'homme. Après cela, l'American General Electric Company a développé un marcheur quadrupède pour résoudre ce problème. Les projets Luna et Mars Rover, en revanche, ont été construits dans le but d'explorer la planète sans que les humains ne participent au voyage.

Laboratoires, industriels, informaticiens et mécaniciens travailleront côte à côte pendant plusieurs années. Ainsi, du côté industriel, nous pouvons tirer parti de la télécommande et d'une partie de la robotique classique, et du côté informatique, nous voyons de grands progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle. Vers la fin des années 1970, trois grands pôles géographiques émergent (France, Japon et États-Unis). La conjugaison de tous les efforts jusque-là débouchera à terme sur la création de robots mobiles autonomes (du robot domestique au robot militaire). Industries manufacturières, sociétés minières, expéditions de recherche sous-marine...

Les applications des robots mobiles autonomes sont extrêmement diverses, des lignes de production dans les usines automobiles à l'exploration d'autres planètes. Explorez Mars.

La robotique mobile couvre un domaine aussi varié que le nettoyage. [1]–[3]. Manutention et transport des bagages, surveillance et diagnostic, départements militaires, etc... Dans ce vaste domaine d'application, la capacité de « locomotion autonome » des robots est probablement la plus importante.

1.2. Les types de robot mobile :

Il Ya plusieurs classification des robots. Cette taxonomie n'est pas exhaustive et vise à capter la présence actuelle de la robotique et à donner une idée de ce que sera l'étendue du domaine dans les prochaines années. Aujourd'hui, nous allons discuter des trois catégories de robots les plus courantes. [4]

1.2.1. Les humanoïdes :

La catégorie la plus connue comprend tous les robots anthropomorphes, c'est-à-dire les robots qui ressemblent à des formes humaines, en grande partie grâce à la propagande de science-fiction. Ces robots ont généralement un torse, une tête, deux bras et deux jambes.

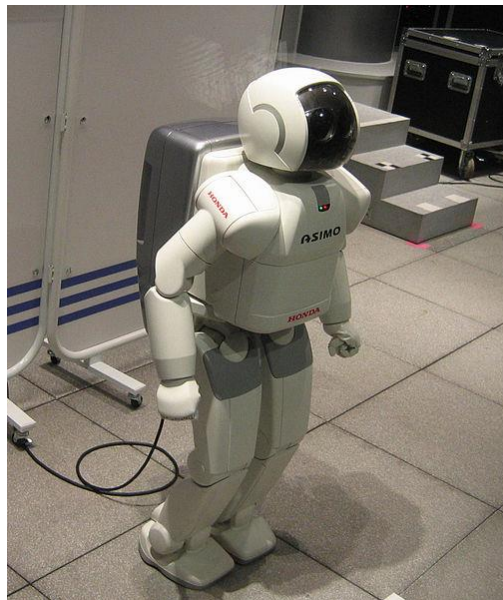


Figure I.1 : robot humanoïdes. [4]

Le robot "Asimo" de Honda est mentionné. Certains de ces robots ne représentent que des parties du corps, comme le robot Nexi développé par le MIT. Si un robot anthropomorphe imite le comportement humain ainsi que son apparence, on dit qu'il s'agit d'un androïde. Un exemple parfait d'androïde est l'Actroid-DER de Kokoro.

1.2.2. Les robots industriels :

La plupart de ces robots ont des bases fixes. Si la base n'est pas fixe, elle est généralement montée sur des rails. Les robots de manutention type « pick and place », les robots de soudage, les robots de peinture... entrent dans cette catégorie.



Figure I-2 : Robot SCARA par Epson (industriel). [4]

Il représente la majorité des robots en action aujourd'hui et peut être nommé robot scara, robot anthropomorphe (communément appelé bras 6 axes), robot delta, etc.

1.2.3. Les robots mobiles :

Cette catégorie englobe tous les robots à base mobile, mais elle désigne de façon générale la sous-catégorie des robots mobiles à roues ; les autres robots étant généralement appelés par leur nom de catégorie correspondant à leur fonctionnalité.



Figure I.3 : iRobot 510 Packbot (robot mobile). [4]

Les robots mobiles à roue sont appelés en anglais UGV (Unmanned Ground Vehicles). Cette catégorie regroupe les robots à base actionnée par des roues ou par des chenilles.

Ces robots sont généralement exploités pour faire de l'exploration, on appelle ces robots des rovers (vagabonds en anglais). Les plus connus sont le Curiosity qui a été envoyé sur Mars par la Nasa pour explorer et identifier le terrain martien ; et le iRobot 510 Packbot qui est utilisé par l'armée américaine pour vérifier le terrain avant d'envoyer les soldats ou à déminer des bombes et des mines antipersonnelles. Ils sont également utilisés à des fins ludiques comme la plateforme de développement POB Robotics Suite ou pour l'assistance à la personne comme le robot Jazz de Gostai. [4]

1.3. Schéma Global de la fonction mobilité :

L'analyse du problème de la mobilité pour un engin autonome peut se faire à l'aide du schéma (Perception, décision, action) présentée à la Figure I.4. C'est à partir de la connaissance de son Environnement et des buts qu'il a à atteindre, qu'un robot mobile élabore des lois de Commande et prend des décisions d'action.

La pertinence de la modélisation de son environnement conditionne donc fortement la réussite De la mission dont le robot est chargé.

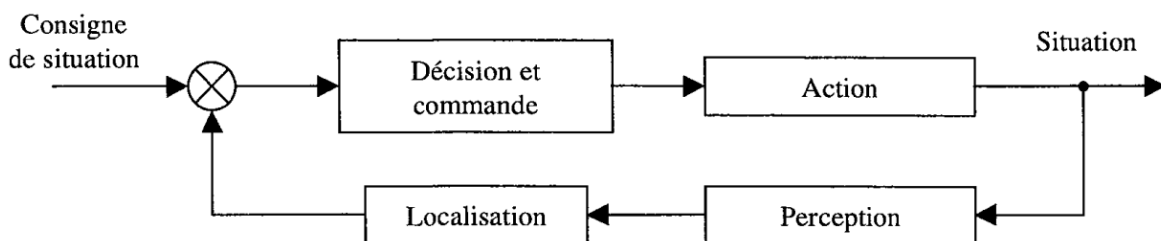


Figure I.4 : Schéma de la fonction mobilité autonome. [5]

Le capteur est un instrument qui permet de déceler l'information contenue dans un objet ou issue d'un phénomène. Ce dispositif est soumis à l'action d'une mesurant non électrique, et fournit un signal électrique à sa sortie. Il va assurer la mesure permanente des grandeurs réelles en question.[1]

1.4. Les systèmes 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 précisé précédemment, 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 I.5).

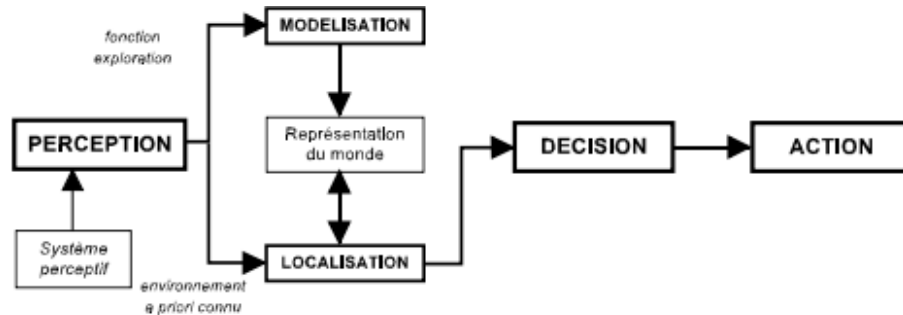


Figure I.5 : Chaîne fonctionnelle d'un système de navigation. [2]

Quelques compliances peuvent être faites sur cet organe vital de la chaîne des fonctions de navigation. La première est de noter que le choix d'un système de perception dépend souvent de l'environnement dans lequel évolue le robot mobile et des fonctions que le robot met en œuvre pour qu'il puisse accomplir ses tâches.

La seconde 'est avérée générale, notamment en confirmant que les systèmes de perception constitués d'un seul capteur suffisent rarement à percevoir correctement l'environnement. Il en va de même pour un être humain, qui a besoin de plusieurs organes sensoriels pour comprendre son environnement. Le système de perception d'un robot mobile intégrera généralement plusieurs capteurs, qui seront de types complémentaires pour enrichir les informations sensorielles, ou de types redondants pour répondre à des problématiques de fonctionnement en modes dégradés. [1]

Dans de tels cas, des méthodes d'émulsion de données sont souvent utilisées pour conditionner ces informations sensorielles.

Enfin, un troisième constat que l'on peut faire est le coût d'intégration des capteurs dans les véhicules autonomes. La précision requise et la fréquence d'acquisition élevée seront des facteurs qui augmentent le coût du capteur. Par conséquent, cela affectera inévitablement le choix du système de perception. La bracket des capteurs est généralement faite par fellowship à deux familles :

- ✓ Les capteurs proprioceptifs qui fournissent des informations propres au comportement interne du robot, c'est-à-dire sur son état à un instant donné.
- ✓ Les capteurs extéroceptifs qui fournissent des informations sur le monde extérieur au robot.[2]

1.4.1. Les capteurs proprioceptifs :

Dans ce type, à l'image de la perception chez les êtres vivants, on parle de proprioception et donc de capteurs proprioceptifs. On trouve par exemple dans cette catégorie les capteurs de position ou de vitesse des roues et les capteurs de charge de la batterie. [2]



Figure I.6 : Exemple de robot mobile : le robot MiniRex, conçu au LISA (université d'Angers). [6]

1.4.1.1. Les capteurs de déplacement :

a- 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. L'information de déplacement nécessitera la connaissance du diamètre des roues, de l'entraxe des roues, de la structure mécanique et cinématique du véhicule. 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. [5]

b- Les accéléromètres :

L'accéléromètre est un capteur qui mesure l'accélération linéaire en un point donné. En pratique, la mesure de l'accélération est effectuée à l'aide d'une masse d'épreuve M , de masse m , reliée à un boîtier du capteur. Le principe de ce capteur est de mesurer l'effort massique non gravitationnel qu'on doit appliquer à M pour le maintenir en place dans le boîtier lorsqu'une accélération est appliquée au boîtier. Le calcul du déplacement élémentaire du robot est obtenu par

double intégration de ces informations. Cette double intégration conduit généralement à des accumulations importantes d'erreurs. Ce capteur est plus coûteux que des odomètres.[5]

1.4.1.2. 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. Ces capteurs 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.

1.4.1.3. Le gyroscope, gyromètre et gyrocompas :

Les gyroscopes sont des outils qui aident les robots à savoir dans quelle direction ils tournent. Ils sont utiles car ils peuvent corriger les erreurs que le robot pourrait commettre en essayant de se déplacer dans la bonne direction. Certains gyroscopes sont très chers, mais certains sont plus abordables et fonctionnent toujours très bien. Ces gyroscopes abordables sont maintenant utilisés pour aider les robots à mieux se déplacer.[7]

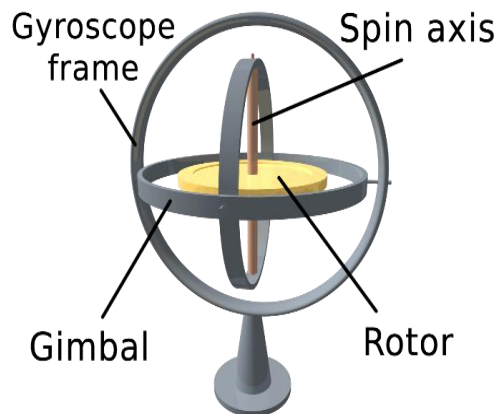


Figure I.7 : Gyroscope. [8]

Un gyromètre est un capteur qui mesure la vitesse angulaire. Il existe de nombreux types de gyromètres. Les premiers à apparaître étaient mécaniques, et aujourd'hui on utilise surtout des gyromètres laser ou optiques.



Figure I.8 : Gyromètre. [9]

Un gyrocompas est un capteur qui mesure la direction. Il se compose d'un gyroscope et d'un compas magnétique. Le gyrocompas détermine initialement de manière autonome le pôle nord magnétique, puis maintient le pôle nord magnétique tout au long du déplacement du véhicule..[3]



Figure I.9 : Gyrocompas. [10]

1.4.1.4. Le magnétomètre ou compas magnétique :

Un magnétomètre, également connu sous le nom de compas magnétique, mesure la direction du champ magnétique terrestre pour déduire l'orientation du robot.



Figure I-10 : compas magnétique. [11]

De toutes les technologies utilisées pour ce type de capteur, les vannes dites de débit sont les plus adaptées aux robots mobiles. Il présente les avantages d'une faible consommation d'énergie, de

l'absence de pièces mobiles, d'une résistance aux chocs et aux vibrations et d'un faible coût. Cependant, la mesure est entravée par l'environnement magnétique du robot (comme les lignes électriques et les structures en acier). Cela rend difficile l'utilisation de ce capteur à l'intérieur. Néanmoins, ce capteur a été intégré avec succès dans des systèmes de localisation basés, par exemple, sur un filtrage de Kalman étendu.

La principale caractéristique de ce capteur est sa précision moyenne, qui est relativement bonne même sur de longs trajets. [3]

1.4.2. Les capteurs extéroceptifs:

Des capteurs extra-réceptifs permettent aux robots de percevoir leur environnement évolutif. Ceux-ci sont généralement un complément nécessaire aux capteurs précédemment introduits. Différents types d'informations sensorielles sont préparées et traitées à l'aide de techniques de fusion de données. Deux familles de capteurs extéroceptifs intégrés peuvent être identifiées. Capteur télémétrique et système de vision.[1]

1.4.2.1. Les capteurs télémétriques:

a- Les captures à ultrasons:

Les capteurs à ultrasons utilisent l'air comme milieu de propagation. La méthode de mesure consiste à exciter avec plusieurs impulsions de fréquence correspondant à celle de la puce. En connaissant la vitesse de propagation des ondes sonores dans un milieu particulier et en mesurant le temps de vol de l'onde sonore, la distance entre le capteur et l'objet peut être déterminée. Le capteur à ultrasons le plus couramment utilisé est le capteur Polaroid, qui émet des ondes ultrasonores à 44 kHz et peut mesurer des distances de 30 centimètres à 10 mètres.[7], [12] Les avantages majeurs de ces capteurs sont leur faible prix de revient et leur simplicité d'implantation. En revanche de nombreux inconvénients induisent leur utilisation de moins en moins fréquente en robotique mobile :

- ✓ Une très faible directivité qui est liée au cône d'émission de l'onde dont l'angle d'ouverture est importante. Ceci implique une erreur généralement importante qui entache la mesure (Figure I.11).

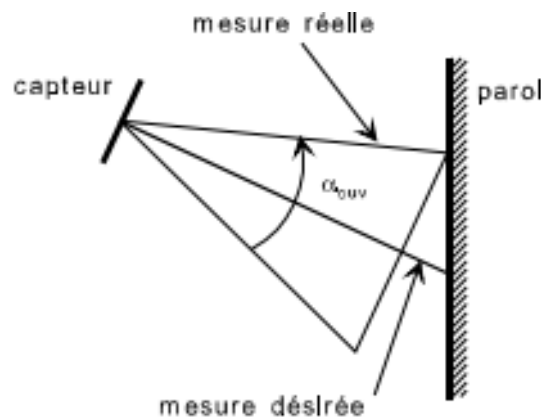


Figure I-11 : cône d'émission d'un faisceau ultrasonore. [2]

- ✓ Angle d'incidence relativement faible, ne dépassant généralement pas 30-40°, selon le matériau du mur.
- ✓ Haute sensibilité aux conditions de fonctionnement telles que la température, l'humidité et l'encombrement. Ces paramètres affectent directement la précision de la mesure.
- ✓ Affecte fortement le problème des réflexions multiples. Ce phénomène se produit lorsque les ultrasons frappent plusieurs parois avant de revenir au capteur.[5]

b- Les captures laser :

Les capteurs laser sont basés sur un rayonnement électromagnétique structuré. Par conséquent, contrairement aux capteurs à ultrasons, ce capteur permet la génération d'un faisceau d'ondes hautement focalisé. Les systèmes laser présentent de nombreux avantages qui en font des capteurs couramment utilisés dans les applications de robotique mobile :

- Résolution angulaire : Comme la longueur d'onde émise est courte, un faisceau à angle très fin peut être obtenu avec une petite lentille émettrice.
- Réponse optique cible : Des longueurs d'onde plus courtes améliorent la probabilité de détection, car des échos peuvent être obtenus à des angles d'incidence du faisceau sur la cible allant jusqu'à 75°.
- La précision de la mesure de distance par rapport à la distance est importante pour les télémètres. À des distances aussi petites que 30 mètres, des précisions de l'ordre du dixième de millimètre peuvent être atteintes. [2], [5]

Le principal inconvénient des lasers réside au niveau de l'électronique de mesure qui doit être performante compte tenu de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques. Cela nécessite du matériel coûteux et complexe.

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

- Dans le télémètre : Ceux-ci sont utilisés pour mesurer la distance, comme les capteurs à ultrasons.
- A l'intérieur du goniomètre : Utilisé pour les mesures d'angle.
- Comme source lumineuse structurée : Ils sont généralement utilisés pour la modélisation 3D d'environnements. Dans ce cas, la source laser est toujours connectée à la caméra et fournit des informations de profondeur.

1.4.2.2. Les systèmes de vision :

Les systèmes de traitement d'images en robotique reposent sur l'utilisation de caméras CCD. L'introduction du capteur CCD (charge torque currency) en 1975 a été très importante pour le développement de la vision : Rapidité d'acquisition, robustesse et petite taille sont des atouts qui facilitent leur intégration. Les systèmes de traitement d'images fonctionnent exceptionnellement bien en termes de portée, de précision et de quantité d'informations disponibles. De plus, c'est le seul capable de reproduire une image sensorielle de l'environnement la plus proche de ce que l'homme perçoit..[1] . En revanche, un inconvénient majeur de tels systèmes de reconnaissance réside dans la gestion des flux importants de données disponibles. Le traitement d'image reste un processus délicat et surtout chronophage en temps de calcul. Une caméra CCD seule ne peut fournir que des informations 2D. Les technologies qui permettent d'obtenir des informations 3D à partir de tels capteurs nécessitent généralement l'ajout d'un autre capteur. A cet égard, nous pouvons identifier les techniques suivantes:

- ✓ La stéréovision.
- ✓ Les techniques de lumières structurées.

Aux deux catégories précédentes, on peut ajouter que les systèmes à réflexion miroir sont associés à des capteurs CCD : Ce sont des technologies de vision omnidirectionnelle. A noter que ce dernier est bien sûr utilisé pour obtenir un modèle sensoriel panoramique de l'environnement. .[12]

1.5. Localisation de Robot mobile :

1.5.1. Localisation œdométrique :

La localisation œdométrique est une flashions de base utilisée pour estimer la position et l'orientation d'un véhicule en utilisant les mesures de déplacement fournies par ses capteurs œdométriques. Ces capteurs, tels que des encodeurs sur les roues, mesurent le mouvement du véhicule, comme la gyration des roues et la distance parcourue. En intégrant ces mesures de

déplacement à partir d'une position et d'une expo sure initiales connues, la localisation œdométrique permet de mettre à jour en temps réel la position estimée du véhicule. [1], [3], [6]

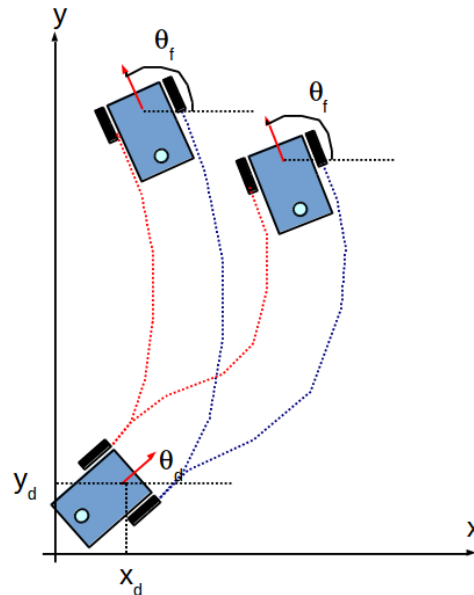


Figure I-12 : Odométrie d'un robot. [6]

Cependant, la localisation œdométrique présente des limitations. Les erreurs d'odométrie peuvent s'accumuler avec le temps, entraînant une dérive de la position estimée par follow ship à la position réelle. Des facteurs tels que les glissements des roues, les variations de la face de la route et les erreurs de mesure des capteurs peuvent influencer la précision de la localisation. Par conséquent, il est courant de combiner la localisation œdométrique avec d'autres ways de localisation, telles que l'émulsion de capteurs ou l'utilisation de repères environnementaux, pour améliorer la précision globale du système de localisation.

La localisation odométrique est une méthode simple et économique pour estimer la position et l'orientation d'un véhicule en se basant sur les mesures de déplacement de ses capteurs œdométriques. Bien qu'elle puisse présenter des erreurs cumulatives, elle peut être améliorée en utilisant des approches complémentaires, offrant ainsi des résultats plus précis pour des opérations telles que la navigation autonome et la robotique mobile. [3], [6]

1.5.2. Localisation télémétrique :

La localisation télémétrique est une fashion utilisée pour estimer la position d'un curios ou d'un véhicule en utilisant des mesures de distance fournies par des capteurs télémétriques. Les capteurs télémétriques mesurent la distance entre l'objet et des points de référence fixes ou mobiles dans l'environnement.

La localisation télémétrique repose sur le principe de la triangulation ou de la trilatération. En mesurant la distance entre l'objet et plusieurs points de référence, il est possible de déterminer la position de l'objet en utilisant des calculs géométriques. Ces points de référence peuvent être des balises fixes, des antennes ou d'autres objets qui émettent des signaux télémétriques. [5]

La précision de la localisation télémétrique dépend de la précision des mesures de distance effectuées par les capteurs télémétriques. Les capteurs télémétriques les plus couramment utilisés incluent les systèmes de positionnement global (GPS) et les capteurs ray ou radar.

La localisation télémétrique est utilisée dans de nombreuses opérations, notamment la navigation des véhicules, le suivi des actifs, la surveillance de la position des objets mobiles, la réalité augmentée et bien d'autres. Elle est particulièrement utile lorsque la localisation doit être effectuée sur de grandes distances ou dans des environnements où les capteurs odométriques ne sont pas suffisamment précis, tels que les zones marines ou les zones urbaines denses.

La localisation télémétrique est une méthode basée sur la mesure de distance entre un objet et des points de référence, permettant d'estimer sa position. Elle est largement utilisée dans divers domaines où une localisation précise sur de longues distances est nécessaire. La combinaison de la localisation télémétrique avec d'autres méthodes, telles que l'émulsion de capteurs, peut améliorer la précision et la fiabilité de la localisation.[5], [7]

1.5.3. Localisation multi capteurs :

La localisation multi capteurs est une approche qui combine les informations provenant de plusieurs capteurs différents pour estimer avec précision la position et l'orientation d'un objet ou d'un véhicule. Elle vise à tirer parti des avantages de chaque capteur et à compenser les limitations individuelles de chaque capteur.

De multiples capteurs permettent de bénéficier de différentes sources d'informations pour améliorer la robustesse et la précision de la localisation. Par exemple, l'émulsion de capteurs peut combiner des données provenant de capteurs tels que les systèmes de positionnement global (GPS), les capteurs inertiels (gyroscopes, accéléromètres), les caméras, les lidars ou les radars.

Chaque capteur apporte des informations uniques sur la position de l'objet. Par exemple, le GPS fournit des informations de position globale, mais peut être sujet à des erreurs dans des environnements urbains denses ou en présence d'obstacles. Les capteurs inertiels fournissent des mesures de mouvement, mais sont sensibles à l'accumulation d'erreurs au fil du temps. Les caméras

peuvent fournir des informations visuelles pour la détection d'objets ou la surveillance d'environnement, mais peuvent être affectées par des conditions de luminosité ou d'occlusion.

En fusionnant les informations provenant de différents capteurs, la localisation multi capteurs permet de compenser les limites individuelles et d'obtenir une estimation plus précise et fiable de la position. Des algorithmes sophistiqués sont utilisés pour combiner et traiter les données des capteurs, en prenant en compte leurs caractéristiques, leurs incertitudes et leurs éventuelles corrélations.

La localisation multi capteurs est largement utilisée dans des domaines tels que la navigation autonome des véhicules, la robotique mobile, les systèmes de suivi d'actifs, la réalité augmentée, etc. Elle permet d'obtenir des résultats plus précis et cohérents, en exploitant les forces de chaque capteur et en minimisant leurs faiblesses.

La localisation multi capteurs est une approche puissante qui combine les informations de différents capteurs pour estimer avec précision la position et l'orientation d'un objet. Elle permet d'améliorer la fiabilité et la précision de la localisation en tirant parti des avantages de chaque capteur et en compensant leurs limitations individuelles.[12]

1.6. Conclusion :

La robotique mobile offre des nouvelles possibilités passionnantes dans de nombreux domaines. Les robots mobiles autonomes peuvent se déplacer de manière autonome dans divers environnements, offrant des avantages tels qu'une efficacité, une sécurité et une productivité accrues. La capacité d'effectuer des tâches répétitives, dangereuses ou complexes libère les gens pour travailler sur des tâches de plus grande valeur. Les progrès technologiques continuent d'améliorer la navigation, la perception et la communication des robots mobiles, les rendant de plus en plus efficaces et polyvalents. À mesure que les robots mobiles évoluent, il est important de libérer tout leur potentiel et de favoriser la recherche et l'innovation pour relever les défis futurs.

Chapitre II : Localisation des robots mobiles

2.1 Introduction :

Le problème de la localisation en robotique mobile réside dans la détermination de la posture. (Position et orientation) du robot mobile dans l'environnement. Malheureusement, Il n'est pas possible de mesurer directement la posture du robot. En effet, les robots ne possèdent pas de capteurs parfaits permettant de déterminer directement leur posture. On notera que le GPS est un système permettant de mesurer directement la position. Cependant ce système n'est pas parfait et est difficilement exploitable en milieu clos (intérieur de bâtiments, forêts) Partant du principe que seulement une donnée de capteur ne permet pas d'avoir une localisation efficace, le problème de localisation consiste alors à traiter des données de natures différentes (mesures de différents capteurs, utilisé plusieurs balises...) afin de déterminer la posture d'un robot. [15]

Ce chapitre est une introduction au domaine de la localisation en robotique mobile. La problématique de la localisation et l'intérêt de connaître de la position et de l'orientation d'un robot par rapport à son environnement y sont présentés ainsi que les différentes approches de localisation.

2.2 Localisation du robot mobile :

Quel que soit le champ d'application auquel il est destiné, un robot mobile, pour être utilisable, doit avoir un système qui permet un certain degré d'autonomie dans la localisation et la navigation. Pour schématiser, il doit être capable de répondre à trois types de questions : « où suis-je ? », « où vais-je ? » et « comment y aller ? ». La première question ou lève le problème de la localisation. Les deux autres sont liées à la planification de trajectoire et à la navigation proprement dite. La bonne exécution des deux dernières tâches est fortement liée à la première.[15]

Cette étude se restreint au robot mobile navigant sur un plan (2-D), ce qui englobe une très large partie des systèmes existants. Localiser le robot revient alors à déterminer trois paramètres : deux coordonnées cartésiennes pour la position et un angle pour l'orientation. De façon plus formelle, la tâche de localisation consiste à calculer la transformation de passage d'un repère lié au robot à un repère lié à l'environnement (Figure II.1).

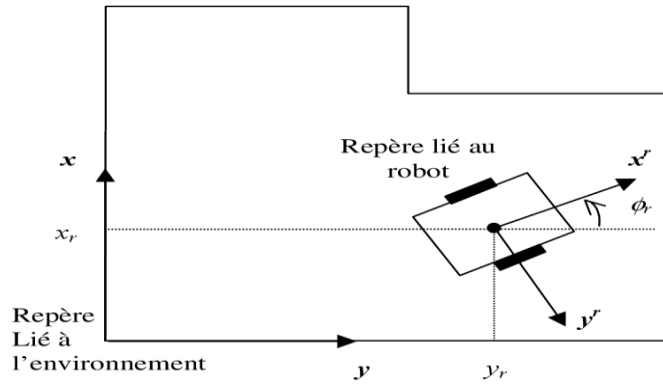


Figure II-1 Formalisme du problème de localisation d'un robot mobile [5]

2.2.1 L'odométrie :

L'odométrie est une méthode employée pour estimer la position, la trajectoire et le mouvement d'un objet en fonction des informations fournies par ses capteurs. Le terme "odométrie" est principalement utilisé dans la filière de la robotique et de la navigation pour décrire le processus de suivi et de mesure du déplacement d'un robot ou d'un véhicule autonome.

En général, l'odométrie repose sur l'utilisation de capteurs tels que des encodeurs de roues, des gyroscopes et des accéléromètres. Les encodeurs de roues mesurent le nombre de tours effectués par chaque roue, ce qui permet de calculer la distance parcourue. Les gyroscopes évaluent l'angle du robot ou du véhicule, pendant que des accéléromètres mesurent des accélérations linéaires.

En combinant les informations fournies par ces capteurs, il est possible d'estimer la position et l'orientation du robot ou du véhicule à chaque instant. Cependant, il est important de noter que l'odométrie est sujette à des erreurs cumulatives, ce qui signifie que l'estimation de la position devient de moins en moins précise au fil du temps. Ces erreurs peuvent être causées par des facteurs tels que des glissements des roues, des variations de la friction ou des perturbations externes.

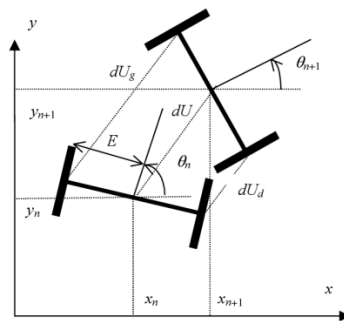


Figure II-2 : calcul de la position grâce à l'odométrie [16]

2.2.1.1 Principe d'odométrie :

Afin de calculer le mouvement global du robot il est nécessaire d'établir un modèle décrivant le déplacement du robot. Sachant que dans notre cas le robot est contrôlé par le différentiel de vitesse entre les deux roues motrices et en supposant que la trajectoire du robot est un cercle de rayon R parcouru à la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ (R positif si le cercle est parcouru dans le sens trigonométrique), dans ce cas on aura :

$$v = R \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II. 1})$$

En notant par e la longueur de l'entraxe, on déduit les vitesses des roues gauche et droite :

$$\begin{cases} vg = \left(R - \frac{e}{2}\right) \frac{d\theta}{dt} = \left(R - \frac{e}{2}\right) \frac{v}{R} \\ vd = \left(R + \frac{e}{2}\right) \frac{d\theta}{dt} = \left(R + \frac{e}{2}\right) \frac{v}{R} \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

Vg représente la vitesse de roue gauche

Vd représente la vitesse de roue droite

Le système (II.2) décrit le modèle direct du déplacement du robot, c'est-à-dire, le calcul des vitesses des roues vg et vd à partir des paramètres de la trajectoire, v et R .

Cependant, l'odométrie calcule la position du robot à partir des mesures odométriques, il est donc nécessaire de calculer le modèle inverse du déplacement du robot, afin de retrouver les paramètres de la trajectoire. Il nous faut donc inverser le modèle (II.2) pour reconstruire le rayon de courbure local et la vitesse du robot. L'inversion du modèle (II.2) donne :

$$\begin{cases} v = \left(\frac{vg - vd}{2}\right) \\ R = \left(\frac{e}{2} \frac{vd + vg}{vd - vg}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

A présent, on est en mesure de calculer et de mettre à jour la position du robot en temps réel. À chaque instant, les mesures odométriques nous donnent les déplacements des roues dg et dd depuis l'instant précédent le modèle inverse (dans lequel l'intervalle de temps a été éliminé et les vitesses remplacées par des déplacements) nous permet de calculer le déplacement d du robot et le rayon de courbure instantané R de la trajectoire.

On calcule le changement d'orientation d du robot et les coordonnées du centre O du cercle trajectoire :

On met à jour la position du robot :

$$\begin{cases} \theta \leftarrow \theta + d\theta \\ x \leftarrow x_O + R \cos(\theta) \\ y \leftarrow y_O + R \sin(\theta) \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

2.2.1.2 Avantages et inconvénients de l'odométrie :

L'odométrie est maintenant largement répandue en robotique mobile, du fait de sa facile mise en œuvre, son faible coût ainsi que sa cadence d'acquisition de mesures très élevée. Ce système est autonome et fournit une bonne précision à court terme.

Cependant, une meilleure précision est souhaitable à moyen et long terme. En effet, les systèmes utilisant l'odométrie dérivent à cause du patinage des roues, des glissements etc. Par conséquent les mesures de distance et d'angle accumulent des erreurs avec le temps, mais pas la mesure de la vitesse. Par ailleurs pour avoir une information absolue ou une information en 3D, il faut associer un capteur externe (par exemple le GPS). [15]

Toutes les erreurs de l'odométrie peuvent être divisées en deux catégories :

- les erreurs systématiques sont dues à un mauvais paramétrage mécanique du véhicule où des capteurs (diamètres de roues différents, longueur de l'entraxe, non alignement des Roues, résolution des codeurs, fréquence d'échantillonnage inexacte ...)
- les erreurs non systématiques sont liées aux contacts roues/chaussée. Elles présentent un caractère aléatoire et dépendent de la qualité de la chaussée (irrégularités, présence verglas...).

2.2.2 La Télémétrie :

La télémétrie en localisation robotique fait référence à l'utilisation de techniques de télémétrie pour estimer la position et l'orientation d'un robot dans son environnement. La télémétrie consiste à mesurer et à recueillir des données à distance à l'aide de capteurs appropriés.[17]

Dans le contexte de la localisation robotique, la télémétrie est souvent utilisée pour mesurer la distance entre le robot et les objets environnants, ainsi que pour obtenir des informations sur les angles, la vitesse et d'autres paramètres liés à la position du robot.

En utilisant ces capteurs de télémétrie, les robots peuvent collecter des données sur leur environnement, les analyser et estimer leur position.

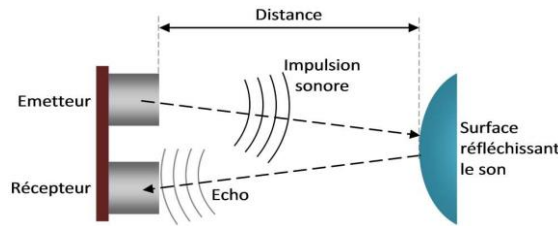


Figure II-3 : principe de fonctionnement d'un capteur ultrason [8]

2.2.2.1 Localisation sur balises :

La localisation sur balises en robotique fait référence à une méthode de localisation qui utilise des balises spécifiques placées dans l'environnement pour permettre au robot de déterminer sa position. Les balises sont des dispositifs émettant des signaux ou des repères détectables par le robot, qui les utilise pour estimer sa position par rapport à ces balises.[18]

Voici comment fonctionne généralement la localisation sur balises :

Placement des balises : Les balises sont placées de manière stratégique dans l'environnement où le robot va se déplacer. Le placement des balises dépend de la configuration de l'espace et des exigences spécifiques du système de localisation.

Détection des balises : Le robot est équipé de capteurs appropriés pour détecter les signaux émis par les balises. Ces capteurs peuvent être des capteurs radio, des capteurs infrarouges, des caméras ou d'autres dispositifs de détection.

Mesure de la distance et de l'orientation : Une fois les balises détectées, le robot utilise des techniques de mesure de distance ou d'orientation pour estimer sa position par rapport aux balises. Cela peut se faire en utilisant la puissance du signal, le temps de vol du signal, la triangulation ou d'autres méthodes. [18]

Estimation de la position : En utilisant les informations des balises et les techniques de mesure, le robot est capable d'estimer sa position dans l'environnement. Cela peut se faire en utilisant des algorithmes de trilatération, de triangulation ou d'estimation bayésienne.

Recalage et suivi : Au fur et à mesure que le robot se déplace dans l'environnement, il peut continuellement recalibrer sa position en détectant et en mesurant les signaux des balises. Cela permet de corriger les erreurs accumulées et de maintenir une localisation précise.

La localisation sur balises présente plusieurs avantages. Elle permet une précision élevée, notamment lorsque les balises sont placées de manière stratégique dans

l'environnement. Elle est également résistante aux problèmes de dérive et de bruit de capteur, car le robot utilise les signaux des balises comme référence. [18], [19]

Cependant, la localisation sur balises peut présenter des limitations. Elle nécessite une infrastructure de balises préalablement installée, ce qui peut nécessiter une planification et une configuration spécifiques. De plus, si le robot se trouve en dehors de la portée des balises ou si les balises sont obstruées, la précision de la localisation peut être compromise.

Formules avec mesures de distance :

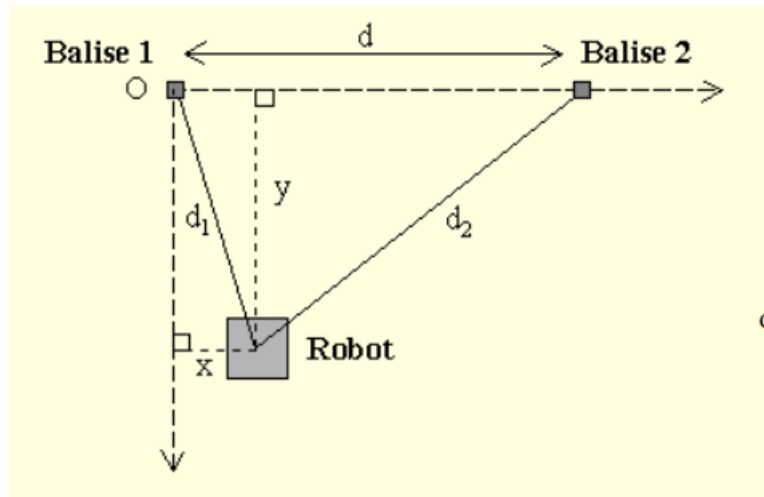


Figure II-4: Multi-balises simples [7]

Pour trouver coordonnées (x,y) du robot on peut utiliser les formules avec mesures de distance

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = d_1^2 \\ (d - x)^2 + y^2 = d_2^2 \end{cases} \quad (\text{II. 5})$$

$$\text{d'où } \begin{cases} \frac{d_1^2 - d_2^2 + d^2}{2d} \\ y^2 = d_1^2 - \left(\frac{d_1^2 - d_2^2 + d^2}{2d} \right)^2 \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

2.2.2.2 Avantages et inconvénients de La Télémétrie :

Il existe plusieurs Avantages de la télémétrie en mentionnant :

Mesures à distance : La télémétrie permet de mesurer et de collecter des données à distance, sans nécessiter de contacts physiques avec les objets ou les environnements mesurés. Cela facilite la surveillance et l'acquisition d'informations dans des zones inaccessibles ou dangereuses pour les humains.

Temps réel et suivi continu : La télémétrie permet d'obtenir des données en temps réel, ce qui permet aux robots de réagir rapidement aux changements de l'environnement et d'ajuster leurs actions en conséquence. Elle permet également un suivi continu, offrant une surveillance constante et une mise à jour en temps réel des informations.

Large éventail d'applications : La télémétrie est utilisée dans de nombreux domaines de la robotique, tels que la navigation autonome, la cartographie, la surveillance environnementale, l'inspection industrielle, etc. Elle peut être adaptée à diverses applications en fonction des besoins spécifiques. [17]

Inconvénients de la télémétrie en robotique :

Limitations de portée : La portée de la télémétrie peut être limitée en fonction de la technologie utilisée. Par exemple, les capteurs de télémétrie laser peuvent avoir une portée maximale au-delà de laquelle les mesures peuvent être imprécises ou impossibles à obtenir.

Sensibilité aux conditions environnementales : Certains types de télémétrie peuvent être sensibles aux conditions environnementales telles que la lumière ambiante, la présence de poussière, de fumée ou d'autres obstacles. Cela peut affecter la qualité des mesures et entraîner des erreurs ou des incohérences. [16], [17], [19]

Coût et complexité : Certains systèmes de télémétrie peuvent être coûteux à mettre en place, en particulier lorsqu'ils nécessitent des capteurs sophistiqués ou des équipements supplémentaires. De plus, la mise en œuvre et la calibration de ces systèmes peuvent être complexes et requérir une expertise technique.

2.3 Localisation multicapteur :

La localisation multicapteur dans le contexte de la robotique fait référence à l'utilisation simultanée de plusieurs capteurs pour estimer la position et l'orientation d'un robot dans son environnement. Cette approche vise à combiner les informations provenant de différents capteurs afin d'améliorer la précision et la fiabilité de la localisation du robot.

L'utilisation de plusieurs capteurs permet de compenser les limitations et les erreurs inhérentes à chaque capteur individuel, ce qui conduit à une localisation plus robuste et précise du robot.[19]

2.3.1 Localisation par recalage simple :

La localisation par recalage [20] simple est une méthode de localisation couramment utilisée en robotique pour améliorer la précision de la position estimée du robot. Elle repose sur l'alignement de points, de lignes ou de formes pour ajuster la position estimée en fonction des mesures effectuées par le robot.

Dans le contexte de la localisation par recalage simple, des repères visuels ou des caractéristiques spécifiques de l'environnement sont utilisés. Le robot effectue des mesures de ces repères à l'aide de capteurs tels que des caméras ou des scanners laser, puis les compare à une carte ou à une référence préalablement établie. [20]

La méthode de recalage simple consiste à trouver la meilleure correspondance entre les mesures actuelles du robot et les repères de référence. Elle peut être réalisée à l'aide d'algorithmes de correspondance de points tels que RANSAC (Random Sample Consensus) ou des techniques de corrélation des images.

L'avantage de la localisation par recalage simple réside dans sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité dans des environnements où des repères ou des caractéristiques spécifiques sont présents. Elle permet d'améliorer la précision de la localisation en utilisant des mesures visuelles ou de télémétrie et en les comparant à une référence.

Cependant, la localisation par recalage simple présente également des limitations. Elle peut être sensible au bruit de capteur, aux changements dans l'environnement et à l'occlusion des repères. De plus, elle peut nécessiter une configuration et un paramétrage appropriés pour obtenir des résultats fiables.

2.3.2 Localisation par moyenne pondérée :

La première technique pour utiliser conjointement les données issues de plusieurs capteurs consiste à les fusionner en pondérant leurs contributions respectives. Cette fusion tient compte des incertitudes sur les mesures effectuées, représentées par leurs variances respectives. Soit ξ_o et ξ_r les valeurs des mesures proprioceptives (indice o pour odométrie) et extéroceptives (indice r pour recalage) de la posture du robot. On peut estimer la position par le moyennage pondérée issu de la loi de Bayes. [20], [22]

$$\varepsilon = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_o^2 + \sigma_r^2} \varepsilon_o + \frac{\sigma_o^2}{\sigma_o^2 + \sigma_r^2} \varepsilon_r \quad (\text{II. 7})$$

Dont la variance est donnée par :

$$\frac{1}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma_o^2} + \frac{1}{\sigma_r^2} \quad (\text{II. 8})$$

On constate d'après (II.7) et (II.8) que si la confiance sur la mesure des capteurs extéroceptifs est faible (donc la variance associée importante) les mesures correspondantes n'affectent que peu l'estimation de posture. A l'inverse, si la variance des mesures données par l'odométrie augmente trop, les mesures issues des capteurs extéroceptifs deviendront

prépondérantes. Par ailleurs, on constate d'après (II-8) que la variance de l'estimation pondérée est meilleure que celle des mesures s'éparées.

2.3.3 Localisation par filtre de kalman :

Principe :

Le filtre de Kalman permet d'estimer l'état d'un système d'après d'une prédiction bruitée de son évolution et de mesures bruitées de cet état.

C'est un filtre récursif optimal, qui suppose que le système considéré est linéaire et les bruits blancs (de moyenne nulle). [23]

Pour la localisation en Robotique mobile, l'état du système est la position du robot, la prédiction de l'évolution proviendra des données odométriques et les mesures proviendront des perceptions, qui permettent de calculer la position grâce à la carte.

Dans la suite, nous présentons succinctement la description mathématique du filtre avant de donner un exemple d'application. Le filtre donne à chaque instant une estimation \hat{X}_t de la valeur de l'état X_t du système, ainsi qu'une estimation de la précision de cette estimation sous forme de sa matrice de covariance P_t . [23]

L'évolution de l'état du système est modélisée par l'équation linéaire suivante :

$$X_t = A.X_{t+1} + B.U_t + \epsilon_{evo} \quad (II.9)$$

Où A et B sont des matrices, u_t est l'odométrie relevée par le robot ou le vecteur des commandes qui lui sont données et ϵ_{evo} est le bruit sur l'estimation de l'état, supposé d'espérance nulle.

$$Q = E\{\epsilon_{evo} . \epsilon_{evo}^T\} \quad (II.10)$$

Une mesure Y_t effectuée sur l'état du système sera donnée par l'équation linéaire :

$$Y_t = H.X_t + \epsilon_{obs} \quad (II.11)$$

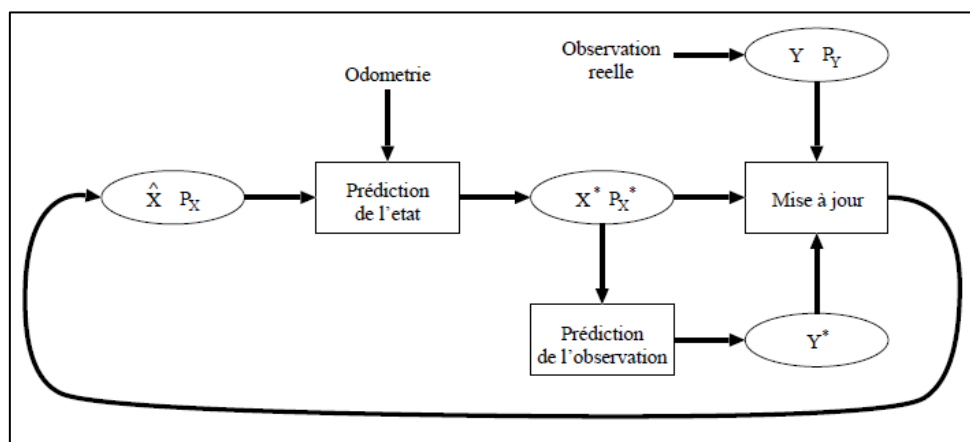


Figure II-5 : Schéma de fonctionnement du filtre de Kalman [17]

Le fonctionnement du filtre se déroule en quatre étapes (Figure II.5) :

a) Prédiction de l'état

À l'instant courant X_t^* , ainsi que de sa covariance P_t^* à partir du modèle d'évolution, de l'estimation au pas de temps précédent et de la commande depuis cet instant :

$$X_t^* = A \cdot \widehat{X}_t + B \cdot u_t \quad (\text{II. 12})$$

La covariance est également prédite par la formule :

$$P_t^* = A \cdot \widehat{P}_{t-1} A^t + B \cdot Q \cdot B^t \quad (\text{II. 13})$$

b) Prédiction de l'observation

À partir du modèle d'observation et de l'estimation de l'état :

$$Y_t^* = H \cdot X_t^* \quad (\text{II. 14})$$

c) Observation de l'état :

On obtient, grâce au système perceptif, une mesure Y_t , dont on estime le bruit P_Y grâce au modèle du processus de perception.

d) Correction de l'état prédit

Par mise à jour proportionnellement à l'erreur entre l'observation prédite et l'observation réalisée :

$$\widehat{X}_t = X_t^* + K(Y_t - Y_t^*) \quad (\text{II. 15})$$

$$\widehat{P}_t = P_t^* - KHp_t^* \quad (\text{II. 16})$$

Où K est le gain de Kalman, calculé pour minimiser l'erreur d'estimation au sens des moindres carrés et donné par la formule:

$$K = P_t^* H^t \cdot (H \cdot P_t^* \cdot H^t + P_y)^{-1} \quad (\text{II. 17})$$

Ces quatre étapes sont utilisées à chaque nouvelle information de déplacement et de perception, afin de mettre à jour l'estimation de l'état du système. [22], [23]

2.4 Conclusion

La localisation à l'aide du filtre de Kalman est une approche couramment utilisée pour estimer la position et l'orientation d'un robot mobile dans son environnement. Le filtre de Kalman est un algorithme de fusion de données qui combine les mesures des capteurs avec un modèle de mouvement pour estimer l'état d'un système de manière optimale.

L'avantage de l'utilisation du filtre de Kalman pour la localisation réside dans sa capacité à prendre en compte les incertitudes des mesures de capteurs et à les fusionner de manière optimale pour obtenir une estimation précise de la position et de l'orientation du robot. Il permet également de gérer les bruits de capteurs, les erreurs de modélisation et les perturbations environnementales.

Dans le chapitre suivant nous allons essayer de traiter la problématique de localisation goniométrique basée sur le filtre de Kalman.

Chapitre III : Localisation goniométrique d'un robot mobile

3.1. Introduction :

La localisation goniométrique est une technique fondamentale utilisée dans de nombreux domaines, tels que la navigation, la communication sans fil, la surveillance et la robotique. Elle consiste à déterminer la position d'un objet ou d'une source en utilisant des mesures d'angle. La goniométrie, branche des mathématiques traitant des angles, est au cœur de cette méthode de localisation. [15]

La localisation goniométrique offre plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de déterminer la position d'objets mobiles ou de sources sans avoir besoin d'une infrastructure fixe. Cela en fait une technique précieuse dans les situations où les systèmes de positionnement traditionnels, tels que le GPS, ne sont pas disponibles ou ne fournissent pas une précision suffisante. [1], [15]

En outre, la localisation goniométrique peut être mise en œuvre à l'aide de capteurs relativement simples et peu coûteux, tels que des antennes directionnelles ou des réseaux de capteurs. Ces capteurs mesurent les angles d'arrivée des signaux provenant de l'objet ou de la source à localiser, ce qui permet de calculer sa position en utilisant des techniques de triangulation ou d'autres algorithmes de traitement du signal.

Par contre, la localisation goniométrique présente aussi des défis. Les mesures d'angles peuvent être affectées par des erreurs, notamment en raison de l'effet de multipath, qui se produit lorsque les signaux se réfléchissent sur des surfaces et créent des chemins de propagation multiples. En outre, l'exactitude de l'emplacement dépend souvent du nombre de capteurs utilisés et de leur positionnement dans l'espace. [1-3]

Dans ce travail nous explorerons les principes fondamentaux de la localisation goniométrique, utilisés, ainsi que les applications et les défis associés à cette technique. En comprenant les bases de la localisation goniométrique, nous pourrions apprécier son rôle essentiel dans de nombreux domaines et envisager son potentiel pour de futures avancées technologiques.

3.2. La problématique :

On considère un robot R décrit par les équations d'état de type voiture suivantes:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_4 * \cos(x_3) * \cos(x_5) \\ x_4 * \cos(x_3) * \sin(x_5) \\ \frac{x_4 * \sin(x_3)}{3} \\ u1 \\ u2 \end{pmatrix} \quad (III.1)$$

Où x_4 est sa vitesse du robot, x_3 son orientation, (x_1, x_2) les coordonnées de son centre et x_5 l'angle des roues avants. Dans l'environnement du robot se trouve des amers $m_i = (x_{mi}, y_{mi})^T$ ponctuel dont on connaît la position. Le robot R perçoit ces amers seulement si la distance est suffisamment faible ($< 15m$). Dans un tel cas le robot mesure l'angle δ_i avec une grande précision. De plus à chaque instant t , le robot mesure les angles x_3 et x_5 sans erreurs. Il est aussi capable de mesurer la vitesse x_4 avec une erreur de variance 1. La figure suivante présente une situation où deux amers $m(1)$ et $m(2)$ sont vus par le robot.

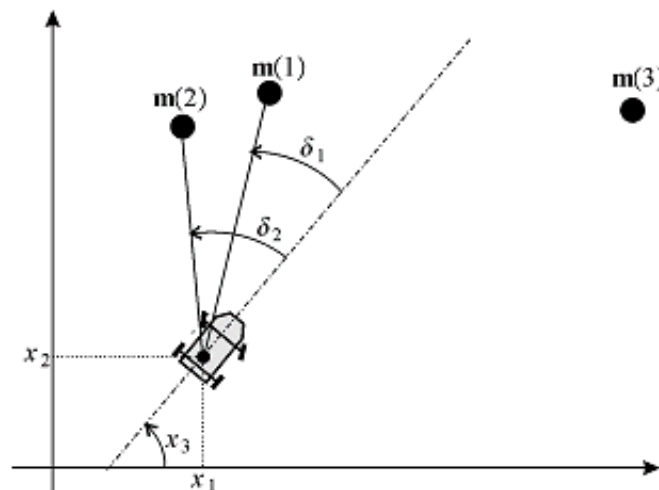


Figure III.1 : Le robot mobile dans un environnement.

Afin de se localiser, on souhaite utiliser un filtre de Kalman. Pour cela il nous faut des équations linéaires, ce qui n'est pas le cas ici. Puisque x_3 et x_5 sont connus la non-linéarité peut se fonder dans une dépendance temporelle. Posons pour cela $z = (x_1 \ x_2 \ x_4)$.

3.4 L'équation d'évolution d'état linéaire :

Le robot mesure les angles x_3 et x_5 sans erreurs car elles sont connues, on va éliminer ces deux entrées.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_4 * \cos(x_3) * \cos(x_3) \\ x_4 * \cos(x_3) * \sin(x_3) \\ u_1 \end{pmatrix} \quad (III. 2)$$

$$\dot{Z} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_4 \cos(x_3) \cos(x_3) \\ x_4 \cos(x_3) \sin(x_3) \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cos(x_3) \cos(x_3) \\ 0 & 0 & \cos(x_3) \sin(x_3) \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1 \end{pmatrix} \quad (III. 3)$$

$$\dot{Z} = A(t) \times Z + Bu(t) + T\alpha \quad (III. 4)$$

On utilise le principe d'Euler pour la discrétisation :

$$\dot{z} = A(t).Z + u \xrightarrow{\text{euler}} z(k+1) = z(k) + dt.z(k) \quad (III. 5)$$

$$z(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & dt.\cos(X3).\cos(X3) \\ 0 & 1 & dt.\cos(X3).\sin(X3) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . z(k) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1(t)dt \end{pmatrix} + \alpha(k) \quad (III. 6)$$

3.5 L'équation d'observation associée :

La figure suivante présente la relation entre la position du robot $X = \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \end{pmatrix}$, la position de Landmark $m_i = \begin{pmatrix} Xmi \\ Ymi \end{pmatrix}$, le vecteur d'orientation du robot $\begin{pmatrix} \cos(x3) \\ \sin(x3) \end{pmatrix}$ et l'observation δ_i .

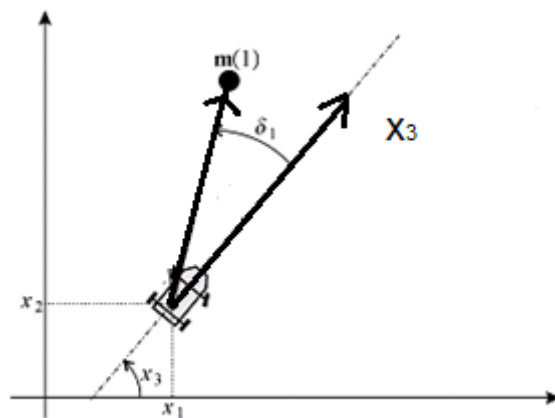


Figure III.2 : La position du robot par rapport une Landmark m.

Soit le vecteur $\vec{v} = \begin{pmatrix} \cos(x3) + \delta_i \\ \sin(x3) + \delta_i \end{pmatrix}$ et le vecteur $\overrightarrow{mi\ x} = \begin{pmatrix} Xmi - X1 \\ Ymi - X2 \end{pmatrix}$.

En observant la figure III.2 on remarque bien que ces deux vecteurs sont confondus.

D'une autre part on a Si \vec{v} et $\overline{mi.x}$ sont linéairement dépendants alors $\det(\vec{v}, \overline{mi.x}) = 0$

$$\text{Det}(v, \text{mix}) = (X_{mi} - X1) \times \sin(X3 + \delta i) - (Y_{mi} - X2) \times \cos(X3 - \delta i) = 0 \quad (\text{III. 7})$$

$$X_{mi} \times \sin(X3 + \delta i) - Y_{mi} \cdot \cos(X3 + \delta i) = -X1 \cdot \sin(X3 + i) + X2 \cdot \cos(X3 + i) \quad (\text{III. 8})$$

$$= (-\sin(X3 + \delta i) \cos(X3 + \delta i)) \cdot \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \end{pmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

$$Y_i = [(-\sin(X3 + \delta i) \quad \cos(X3 + \delta i))] \cdot \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \end{pmatrix} + B_i \quad (\text{III. 10})$$

Prenons : $y = \begin{pmatrix} X4 \\ Y_i \end{pmatrix}$

$$y(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\sin(X3 + \delta 1) & \cos(X3 + \delta 1) & \mathbf{0} \\ -\sin(X3 + \delta 2) & \cos(X3 + \delta 2) & \mathbf{0} \end{pmatrix} \cdot z(k) + B(k) \quad (\text{III. 11})$$

3.6 Implémentation du Filtre de Kalman pour la localisation :

L'organigramme suivant présent les étapes d'implémentation du filtre de kalman pour la localisation goniométrique basée sur l'équation d'évolution d'état (III.6) et L'équation d'observation associée (III.11).

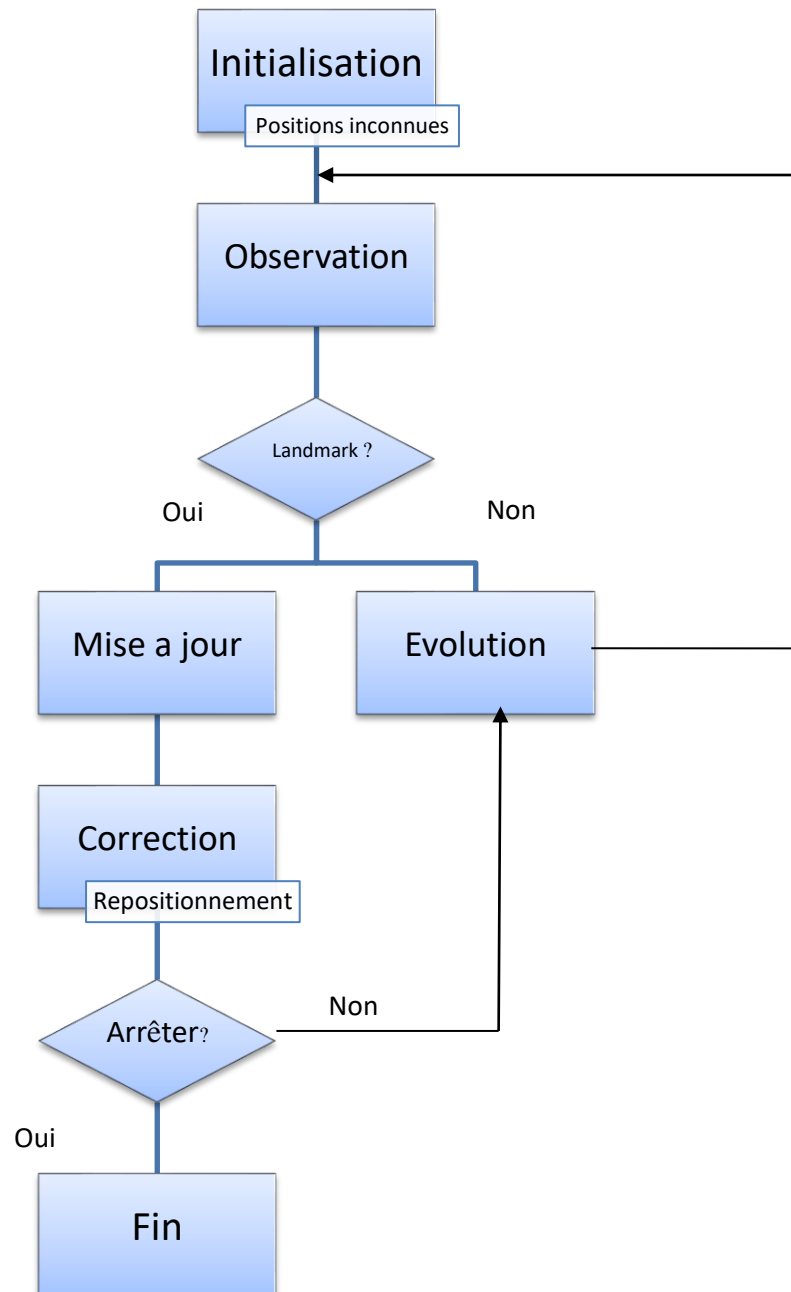


Figure III.3 : organigramme d'implémentation du filtre de kalman pour la localisation goniométrique

Voici une description détaillée des différentes étapes de la méthode de localisation du robot mobile basée sur l'algorithme de filtrage de Kalman et la localisation goniométrique :

a) Initialisation : Au début du processus, les positions du robot sont inconnues. Le robot se déplace aléatoirement le long d'une trajectoire dans l'environnement.

b) Observation : À chaque étape, le robot mobile observe l'état de ses capteurs pour déterminer s'il détecte des Landmarks (balises ou points de référence) dans son environnement.

c) Landmark ? :

Si le robot ne détecte pas de Landmark, cela signifie qu'il n'a pas d'une Landmark dans son champ de vision. Dans ce cas le robot passe à **l'étape d'évolution**, le robot utilise ses estimations précédentes et son modèle de mouvement pour calculer sa nouvelle position probable en fonction de sa trajectoire.

Si le robot détecte un ou plusieurs Landmarks, il mesure les angles entre lui-même et ces Landmarks. Ensuite, le robot utilise ces mesures d'angles pour estimer l'orientation du robot par rapport aux Landmarks détectés.

d) Mise à jour : Dans cette étape, le robot compare les valeurs mesurées des angles avec les valeurs estimées à partir de ses estimations précédentes.

Le robot utilise l'algorithme de filtrage de Kalman pour mettre à jour ses estimations de position et réduire les erreurs. L'algorithme utilise les informations des mesures d'angles, les estimations précédentes et les matrices de covariance pour le repositionnement du robot.

e) Arrêter ? : Le processus se poursuit jusqu'à ce que le robot atteigne une condition d'arrêt prédéterminée. Cette condition peut être basée sur un certain critère prédéfini, tel que l'atteinte d'une précision de localisation souhaitée ou un nombre prédéterminé d'itérations.

Si la condition de d'arrêt est satisfaite, le processus se termine et les estimations de la position finale du robot sont obtenues.

Si la condition de d'arrêt n'est pas satisfaite, le processus retourne à l'étape d'évolution, où le robot calcule sa nouvelle position probable en utilisant son modèle de mouvement et ses estimations précédentes.

L'algorithme de filtrage de Kalman et la méthode de localisation goniométrique permettent ainsi au robot mobile de se localiser précisément dans son environnement en utilisant uniquement des mesures d'angles par rapport aux Landmarks détectés.

3.7 Les résultats de simulation sur MATLAB

La figure suivante présente notre robot dans la position initiale avec des positions inconnues :

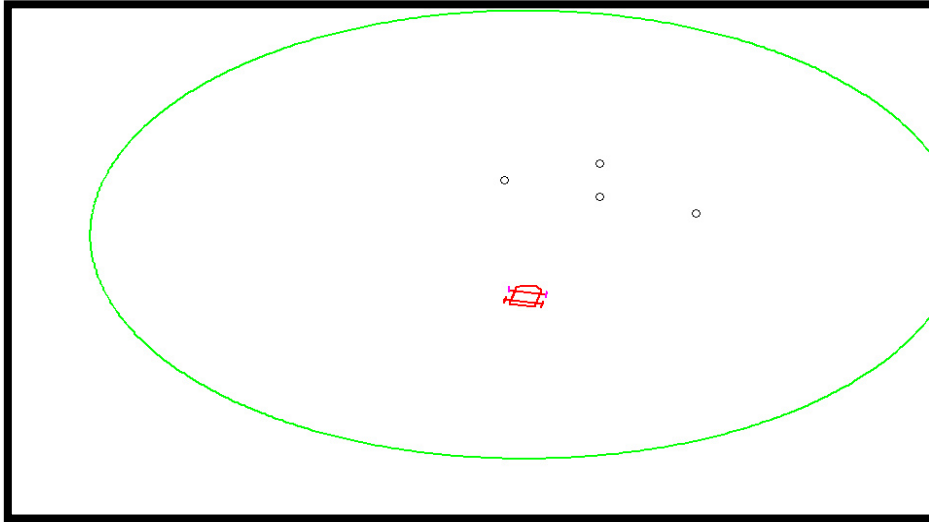


Figure III.4 :L'état initial du robot

Au début du processus, la localisation du robot est inconnue. Le robot se déplace aléatoirement le long d'une trajectoire dans l'environnement. Dans cette étape les incertitudes sur les positions du robot sont traduites par les diamètres de l'ellipses de confiance autour du robot.

La figure suivante présente l'état de robot après la reconnaissance d'une Landmark ou plus:

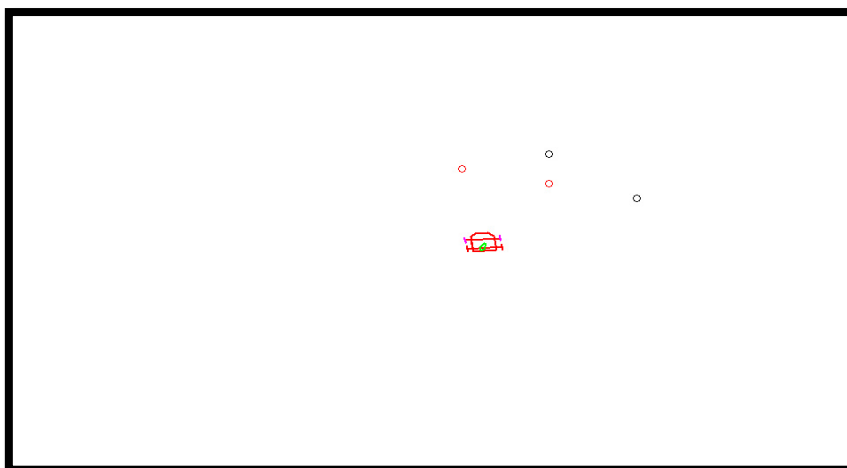


Figure III.5 : Observation des Landmarks.

On remarque bien que les incertitudes sur la position du robot sont réduites après la reconnaissance des Landmarks dans la carte, cette réduction est traduite par la minimisation

des diamètres de l'ellipses de confiance autour du robot après la reconnaissance de première Landmark.

La figure suivante montre l'augmentation des incertitudes sur la position du robot après la détection de première Landmark.

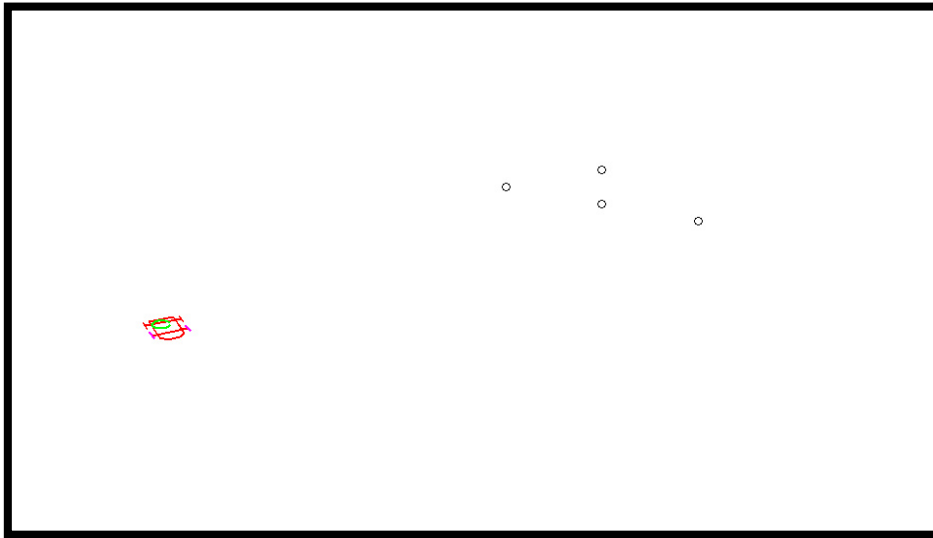


Figure III.6 : L'évolution du robot dans la carte.

L'augmentation des incertitudes sur la position du robot après la détection de première Landmark est justifiée par les erreurs systématiques dans l'équation d'évolution du robot.

La correction des erreurs engendrées par l'équation d'évolution du robot ce fait après la détection de la Landmark suivante. La figure III.7 explique cette situation.

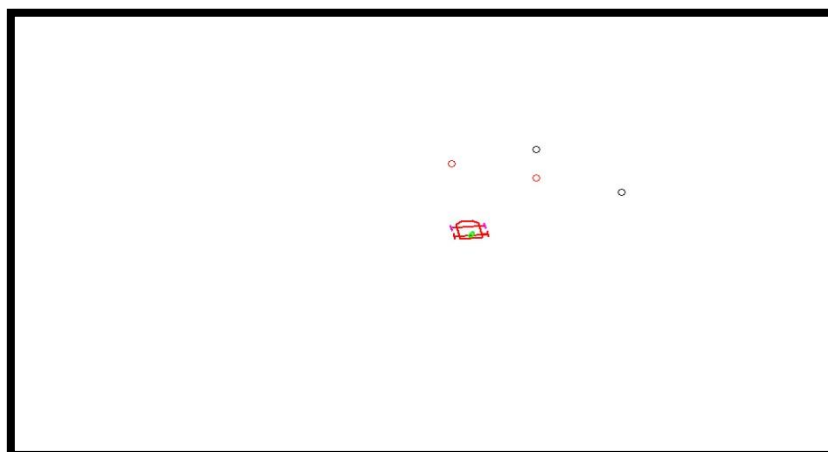


Figure III.7 Correction des erreurs d'évolution.

3.8. Conclusion :

La localisation goniométrique est une méthode efficace et largement utilisée pour déterminer la position d'objets ou de sources lumineuses à l'aide de mesures d'angle. Cette approche tire parti de la triangulation et des principes géométriques pour calculer la position d'un objet par rapport à un point de référence connu.

La localisation goniométrique présente plusieurs avantages, notamment la facilité de mise en œuvre, une précision modérée et une immunité aux interférences électromagnétiques. Il peut être utilisé dans divers domaines tels que la navigation, la surveillance, la robotique et les communications radio pour fournir des informations de localisation critiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

La localisation d'un robot mobile par le filtre de Kalman offre une approche puissante et largement utilisée pour estimer la position d'un robot en mouvement. Ce filtre, basé sur des principes probabilistes et de fusion de données, permet de combiner efficacement les mesures provenant de différents capteurs pour obtenir une estimation précise de l'état du robot.

Le filtre de Kalman permet de prendre en compte à la fois les informations mesurées du robot pour prédire son état futur et le mettre à jour en fonction des nouvelles mesures. Cette approche itérative permet d'atténuer les erreurs de mesure et d'améliorer la précision de la localisation au fil du temps.

L'avantage majeur du filtre de Kalman réside dans sa capacité à traiter les incertitudes et les bruits présents dans les mesures et les mouvements du robot. Il fournit une estimation optimale en minimisant l'erreur quadratique moyenne, ce qui le rend particulièrement adapté aux systèmes de localisation en temps réel.

Cependant, il convient de noter que la mise en œuvre et la calibration du filtre de Kalman peuvent être complexes, nécessitant une modélisation précise du robot et de ses capteurs, ainsi qu'une compréhension approfondie des propriétés des mesures et des processus de bruit. De plus, la performance du filtre de Kalman peut être affectée par des erreurs de modélisation, des non-linéarités ou des conditions environnementales particulières.

Malgré ces défis, le filtre de Kalman reste un outil essentiel pour la localisation des robots mobiles dans de nombreux domaines, tels que la robotique autonome, la cartographie, la navigation et l'industrie. Grâce à sa flexibilité et à sa capacité à intégrer différents types de capteurs, il permet d'obtenir des estimations précises de la position et de l'orientation du robot, ce qui ouvre la voie à de nombreuses applications innovantes.

Dans ce travail on a développé un algorithme de localisation goniométrique pour un robot mobile de type voiture en utilisant un estimateur d'état basé sur Filtre de Kalman. La validation de l'approche étudiée s'est faite par MATLAB. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'approche utilisée pour l'estimation des positions du robot à travers la carte de l'environnement précédemment connue, même sans connaître la position initiale.

Bibliographie

- [1] S. Noureddine, "Système de localisation pour robots mobiles.", Thèse de doctorat, *université de Batna*, 2005.
- [2] C. Drocourt, "Localisation et modélisation de l'environnement d'un robot mobile par coopération de deux capteurs omnidirectionnels.", Thèse de doctorat, *ANRT*, 2002.
- [3] O. Aider, "Localisation référencée modèle d'un robot mobile d'intérieur.", Thèse de doctorat, *Université d'Evry-Val d'Essonne*, 2002.
- [4] Citer le 20/06/2023 :
<https://www.roboticbeast.com/les-differents-types-de-robot-1/>.
- [5] A. Mallet, "Localisation d'un robot mobile autonome en environnements naturels.", Thèse de doctorat, *Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT*, 2001.
- [6] Guyonneau, Rémy. "Méthodes ensemblistes pour la localisation en robotique mobile." PhD diss., *Université d'Angers*, 2013
- [7] A. Lallement, "Localisation d'un robot mobile par coopération entre vision monoculaire et télémétrie laser.", Thèse de doctorat, *National Polytechnic Institute of Lorraine*, Nancy, France, 1999.
- [8] Citer le 20/06/2023 :
<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>.
- [9] Citer le 20/06/2023 :
Fischer German made Brass Marine Thermometer- Free Shipping to NZ and Australia - Time & Trends (timeandtrends.com)
- [10] Citer le 20/06/2023 :
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Gyrocompas>
- [11] Citer le 20/06/2023 :
https://fr.123rf.com/photo_3874613_un-compas-magn%C3%A9tique.html
- [12] G. Rémy, "Méthodes ensemblistes pour la localisation en robotique mobile.", Thèse de doctorat, *Université d'Angers*, 2013.
- [13] M. Nowakowski, "Localisation d'un robot humanoïde en milieu intérieur non-contraint.", Thèse de doctorat, *Paris Sciences et Lettres (ComUE)*, 2019.
- [14] F. Philippe. "Localisation et modélisation tridimensionnelles pour un robot mobile autonome tout terrain." Thèse de doctorat, *Université Paul Sabatier-Toulouse III*, 1994.
- [15] L. Delobel. "Agrégation d'information pour la localisation d'un robot mobile sur une carte imparfaite", Thèse de doctorat., *Université Clermont-Auvergne*, 2020.

- [16] M. BENCHELOUI, “reconstruction incrémentale de cartes d’environnement en robotique mobile”Magister thesis.Université de Batna 2,2011.
- [17] A. NDJENG, “Localisation robuste multi-capteurs et multi-modèles”,Thèse de doctorat., Université d’evry val d’essonne, 2009.
- [18] A. Lallement , “Localisation d’un robot mobile par coopération entre vision monoculaire et télémétrie laser” ,Thèse de doctorat., Institut National Polytechnique de Lorraine, 1999.
- [19] F. Beaubois, “Positionnement d’une balise sous-marine en environnement peu Profond.”, Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d’Opale,2016.
- [20] C. DROCOURT, “Localisation et modélisation de l’environnement d’un robot mobile par coopération de deux capteurs omnidirectionnels.”, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne,2002.
- [21] P. S. MAYBECK, “Stochastic Models, Estimation and Control.” ,Academic Press., 1979.
- [22] David FILLIAT, “Localisation par filtrage de Kalman.” TD, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées ParisTech, 2009.
- [23] OPDERBECKE. Jan, “Localisation d’un robot mobile par fusion de données multi sensorielles dans un environnement structure.”, Thèse de doctorat, Paris 6, 1994.