

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de 8 Mai 1945 – Guelma -

Faculté des Mathématiques, d'Informatique et des Sciences de la matière

Département d'Informatique



Mémoire de fin d'étude Master

Filière : Informatique **Option :** Système Informatique

Thème :

« conception d'un robot maquette suiveur de trajectoire »

Encadré Par :

Dr. Brahimi Said

Présenté par :

Menasria Hamza

Septembre 2021

Dédicace

Je tiens c'est avec grand plaisir et honneur que je dédie ce modeste travail :

A l'être la plus chère de ma vie, ma mère Liamna Hessainia.

A celui qui m'a fait de moi un homme, mon père Lakhder.

A mon frère Lotfi Et mes sœurs Assia, Imene Qui m'ont toujours soutenue et encouragé durant toutes ces années d'études.

« Une Spéciale dédicace à La seul qui nous a beaucoup idée : Dr. Bensallah Karima. « Et Finalement à mes amis Hazem, Jalel ,Zaim, Oussama,Borhan ,Iskander, Khierddine , Taleb Ikram qui n'ont jamais cessé de me soutenir.

À l'âme de mon frère Idris qui nous a quitté le 9 janvier 2021 c'est vrai que vous êtes partis mon frère mais je ne t'oublierai jamais votre souris, présence, simplicité je dédie ce travail à ton et je demande à tous ceux qui lisent cette dédicace de t'appeler à la miséricorde, Repose en paix Idris.

Merci.

Remerciements

Tout d'abord on remercie le bon dieu tout puissant de nous avoir donné la volonté et la santé pour terminer ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent en premier lieu à notre encadrant Monsieur Brahimi Said d'avoir accepté de nous encadrer. On vous remercie pour tous vos conseils et votre disponibilité, vos compétences ont fortement contribué à la réalisation de ce travail.

Aussi notre chaleureux remerciement aux profs à l'image de Mr : Hadrjis Mourad qui été ma source d'inspiration pendant mon parcours universitaire et au chef de département Mr Kouahla Zinnedine qui m'a tant donnée les coups de main et surtout pour sa motivation au moment d'échec.

On s'adresse aussi nos remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de présider, examiner et juger notre travail. Nos remerciements vont à toute personne qu'on a contacté durant notre projet.

Nous aimerons également remercier vivement tous mes camarades et amies pour leur conseils, encouragement et soutien. On n'oublierait pas non plus de remercier chaleureusement tous les membres de nos familles et qui nous ont aidé et soutenu chacune à leur manière.

Résumé

Depuis longtemps, le suivi de trajectoire d'objets attire beaucoup d'intérêt dans diverses applications. Le suivi de trajectoire d'objet est la détermination de sa trajectoire au cours du temps à partir des données fournies par différents types de capteurs. Bien que de nombreuses approches de suivi de trajectoire ces dernières années aient été développées pour son traitement, il demeure un problème ouvert.

Dans la cadre de ce projet de fin d'étude, nous nous intéressons plus particulièrement au suivi de trajectoire d'objets dans un environnement intérieur en se basant sur des données sensorielles hybrides comme la caméra, l'odométrie et/ou le centrale inertielle. Le suivi de trajectoire d'objets dans un environnement intérieur reste une tâche complexe en raison de nombreux défis notamment ceux liés aux limitations des capteurs (bruit, imprécision, etc.).

De nombreuses techniques de suivi de trajectoire ont été proposées dans la littérature pour faire face à ces défis et pour assurer une bonne qualité de suivi, certains se sont basées sur le GPS ou sur des balises radio ou visuels déployés dans l'environnement, tandis que d'autres se sont basées sur des capteurs embarqués comme l'accéléromètre, gyroscope et/ou d'autres capteurs. Cependant, Il n'existe aucune technique de suivi unique qui peut être adéquate dans toutes les applications.

Mots clés : Accéléromètre, localisation basée sur les balises, trajectoire construction, IoT, géo-localisation, Environnement : Java (ou Python ou autre), Arduino.

Sommaire

Table des figures	1
Liste des tableaux	1
Introduction Générale	1
1 Revue de la littérature	4
1.1 Introduction	4
1.2 Les systèmes de positionnement par satellites	4
1.2.1 GPS	5
1.2.2 Principe du positionnement par satellite	5
1.2.3 Le positionnement relatif par satellite	7
1.2.4 Erreurs du système GPS	8
1.2.5 Les erreurs dues aux satellites	8
1.2.6 Les erreurs provenant des récepteurs	8
1.2.7 Les erreurs de propagation de signaux	9
1.3 Les capteurs proprioceptifs	9
1.3.1 L'odomètre	9
1.3.2 Erreurs de l'odométrie	10
1.3.3 Erreurs liées à la dynamique du véhicule (les erreurs aléatoires)	10
1.3.4 Erreurs systématiques ou liées à un dysfonctionnement du capteur	11
1.4 Les capteurs inertiels	12
1.4.1 Erreurs du système Inertiel	13
1.5 Filtre de Kalman	14
2 Généralité sur le robotique mobile	18
2.1 Introduction	18

2.2	Les méthodes de localisation	19
2.2.1	La localisation du mobile	19
2.2.2	Localisation relative (l'estime)	19
2.2.3	La localisation absolue	20
2.3	La localisation de l'environnement	22
2.3.1	Les systèmes télémétriques	22
2.4	Navigation Robotique	22
2.4.1	Planification de trajectoire	23
2.4.2	Commande réactive	27
2.5	Conclusion	30
3	Conception et implémentation	31
3.1	Introduction	31
3.2	Conception du robot	31
3.2.1	Cahier de charge	32
3.3	Conception du système embarqué	32
3.3.1	La localisation par capteur inertielle (MPU6050)	32
3.3.2	Mise à jour du système de navigation inertielle	33
3.4	Conception hardware et mécanique	34
3.4.1	Carte Arduino Uno	35
3.4.2	Motor Driver (L293N)	36
3.4.3	Plaque d'essai (Breadboard) et câbles	36
3.4.4	Moteurs à courant continu (DC)	37
3.4.5	Source d'alimentation (batteries)	37
3.4.6	Kit de véhicule (châssis et roues)	38
3.5	Implémentation	38
3.5.1	Environnement	38
3.5.2	Intégration de ces capteur	39
3.6	Représentation du robot	40
	Conclusion générale	43
	Bibliographie	45

Table des figures

1.1	Constellation de satellites NAVSTAR du système GPS [9].	5
1.2	Constellation de satellites NAVSTAR du système GPS [7].	6
1.3	GPS Différentiel.	7
1.4	Plate-forme inertielle [34].	12
1.5	Principe d'une centrale inertielle [34].	13
1.6	L'implémentation discrète d'un filtre de Kalman standard.	17
2.1	Carte de l'environnement et représentation sous forme de graphe .	23
2.2	Illustration de l'algorithme de Dijkstra.	25
2.3	8 Champ potentiel.	26
2.4	Schéma-bloc d'une boucle de commande par PID.	28
2.5	Schéma-bloc d'une boucle de commande par retour d'état.	29
2.6	Schéma représentant le principe du guidage.	30
3.1	Schéma des différentes unités du robot.	31
3.2	MPU- 6050.	32
3.3	Structure du système de navigation inertielle.	33
3.4	Les 3 axes de gyroscope et accéléromètre.	33
3.5	Algorithme du filtrage de Kalman.	34
3.6	Microcontrôleur - Arduino uno.	35
3.7	Motor Driver (L293N).	36
3.8	Plaque d'essai (Breadboard) et câbles.	37
3.9	Moteurs à courant continu (DC).	37
3.10	Pile Li-ion rechargeable 3.7V.	38
3.11	Kit de véhicule.	38
3.12	Schéma pour la localisation du robot sur Fritzing.	40
3.13	Représentation du robot.	40
3.14	Représentation du robot.	40

3.15 Schéma pour la localisation du robot sur Fritzing.	41
3.16 Schéma pour la localisation du robot sur Fritzing.	41

Introduction Générale

Contexte/problématique

La progression technologique et la disponibilité des Kits et plateformes de véhicule au marché permet de construire aisément des robots mobiles pouvant être contrôlés d'une manière automatique et intelligente. Ces véhicules sont l'une des plus grandes inventions dans l'histoire moderne car sont largement utilisés dans les environnements industriels, le plus souvent pour des tâches répétitives en suivant un chemin bien défini. Celui-ci est parfois matérialisé 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. Dans ces environnements, les applications sont innombrables et très variées. Cela peut aller des tâches simples comme celles de nettoyage et d'entretien, à d'autres nécessitant certaine capacité d'intelligence comme celles d'assistance à une personne handicapée dans des tâches d'exploration, de surveillance et de préhension etc ... À l'heure actuelle, on peut citer l'exemple de robot qui peut remplir les fonctions d'infirmière en fournissant des médicaments et l'assistance des patients infectés par le coronavirus pour réduire et contrôler la propagation de la pandémie.

Il est à noter que le développement de tels robots exige l'introduction des techniques de navigation et localisation qui vont leur permettre d'être conscient à leur espace et réagir ainsi d'une manière adéquate et intelligente. Il est à noter le développement des systèmes de navigation au sein de véhicules nécessite souvent trois fonctions :

- La localisation ;
- La planification du parcours ;
- La Commande réactive.

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.

La planification du parcours est la fonction qui permet de trouver un chemin faisable à partir de la position initiale jusqu'à la position finale cible qui évite les obstacles. Elle peut être résumée sur la question suivante : «Comment je vais du point A (ma position) à un point B (destination)?». Dans la littérature, il y en a beaucoup, notamment : méthodes basées sur les graphes et celles basées sur le champ de potentiel. La commande réactive cherche à optimiser la trajectoire locale du robot en tenant compte des circonstances actuelles du robot. Elle permet ainsi au robot d'adapter son action et sa façon de suivre le plan préalablement établi en fonction des changements dans l'environnement (découverte d'un nouvel obstacle, objets dynamiques...).

Les contraintes dynamiques sur le robot sont considérées directement dans le calcul de la commande. Cette troisième fonction, connue généralement sous le nom de Mapping, peut être résumée sur la question : «Comment se présente l'environnement?»

En générale, les techniques de navigation sont classées en deux catégories, techniques basées sur l'infrastructure (Systèmes basés sur les balises) et celles sans infrastructure. La première catégorie nécessite que les balises soient installées dans l'environnement et que la position du robot soit calculée en fonction de la position de ces balises.

La deuxième catégorie, quant à elle, ne nécessite pas d'installation de matériel supplémentaire ce qui la rend, peut être, plus rentable dans le cas de navigation dans un terrain naturelle. Un tel cadre d'utilisation requiert que le système robotisé doive disposer d'un niveau minimum d'autonomie et de facilités de navigation.

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. Surtout avec la demande croissante de systèmes de navigation intérieure.

Travail à faire

L'objectif de ce travail est d'établir un robot qui suit une trajectoire d'une manière intelligente (la conscience de son déplacement et déviation). Nous avons fait un robot équipé d'un système de navigation basé sur un module des capteurs inertiels. Ces derniers sont (gyroscope qui mesure la déviation, et l'accéléromètre qui calcule le déplacement du robot).

De plus, Nous avons proposé d'utilisé le filtre de Kalman pour l'estimation des positions du robot et la correction des erreurs des capteurs inertielles.

Organisation du mémoire

Cet mémoire est constitué de 3 chapitres et un introduction général Dans le introduction , une mise en contexte les objectifs y sont présentés.

Dans le premier une revue de la littérature sur les différents systèmes de positionnement utilisés dans le domaine véhiculaire tel que les méthodes de positionnement absolu(GPS), les méthodes de positionnement relatif et filtre de Kalman.

Dans le chapitre 2 nous allons décrire les méthodes de navigation (la localisation , la planification de trajectoire et la commande réactive)d'intérieur en robotique mobile.

Enfin dans le chapitre 3 on finira par une conception et l'implémentation d'un prototype .

Chapitre 1

Revue de la littérature

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire Les systèmes de positionnement et de navigation par satellite, les capteurs proprioceptifs et les techniques de fusion. Nous commencerons par présenter les bases du positionnement par GPS avant de présenter les équations nécessaires pour la navigation inertielle et odométrique. Les capteurs de navigation permettent de déterminer la configuration courante du véhicule à tout instant et en tout point du globe : la position, l'orientation, la vitesse et le temps.

Les capteurs relatifs, nommés aussi capteurs proprioceptifs, permettent de déterminer la position et l'orientation du mobile en intégrant ses déplacements orientés successivement depuis sa configuration initiale. Ils sont utilisés pour la navigation à l'estime.

1.2 Les systèmes de positionnement par satellites

Les systèmes de positionnement et de navigation par satellite encore appelés GNSS (Global Navigation Satellite System) sont fondés sur la détermination de la position à partir de la méthode par trilatération (ou triangulation dans certains documents). Celle-ci nécessite de connaître la position d'au moins quatre satellites et la mesure de la pseudo-distance entre la position du récepteur (inconnue) et celle de chaque satellite (connue). Parmi les systèmes de positionnement par satellites existant ou en construction, on peut en présenter le GPS

[47].

1.2.1 GPS

Le GPS a été réalisé par l'armée américaine à l'origine des années 1970 il est sous leur contrôle et leur autorise à leur disposition sélective du signal en chiffrant quelques informations. Ce système dépend d'un 24satellite NAVSTAR (Navigation System by Timing And Ranging) partagé sur 6 orbites inclinées de 55° et situées à une altitude de 20184 km (Figure 2.1) de 5 stations au sol (pour calculer la trajectoire des satellites GPS) qui se trouve aux États-Unis et qui contient des récepteurs utilisés pour se positionner. [9].



FIGURE 1.1 – Constellation de satellites NAVSTAR du système GPS [9].

1.2.2 Principe du positionnement par satellite

Pour le principe on s'inspirera du positionnement par GPS, car il est le plus utilisé et déjà commercialisé. Initialement développé dans un but militaire par le département de la défense des États-Unis, le GPS est accessible désormais aux civils et fournit un positionnement continu et des informations de synchronisation, n'importe où dans le monde dans toutes les conditions météorologiques. Parce qu'il sert un nombre illimité d'utilisateurs, ainsi que d'être utilisé. pour des raisons de sécurité, le GPS est un système à sens unique [30]. C'est-à-dire que les utilisateurs ne peuvent que recevoir les signaux satellitaires. Il s'agit

d'un réseau de 24 satellites évoluant à 20184km d'altitude en orbite de la terre. Lorsqu'un récepteur GPS est mobile, sa vitesse et la direction de son mouvement peuvent être également déterminées. Toute la technologie de géolocalisation par GPS repose sur le principe suivant : un récepteur situé au sol reçoit des signaux émis par au moins 3 satellites. La position des satellites étant connue, on détermine les coordonnées du récepteur en calculant une pseudo-distance entre chaque satellite et le récepteur. La position du récepteur est obtenue comme une intersection de trois sphères. Chaque sphère a pour centre un des trois satellites et pour rayon la pseudo distance séparant ce satellite du récepteur [7] (Figure 1.2) .

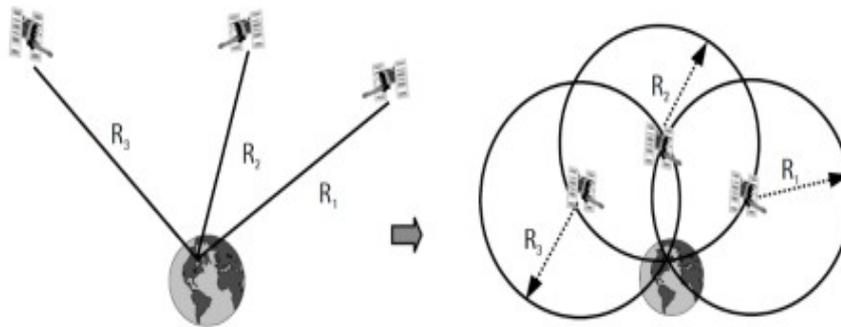


FIGURE 1.2 – Constellation de satellites NAVSTAR du système GPS [7].

$$\rho_i = \sqrt{(x_{si} - x_R)^2 + (y_{si} - y_R)^2 + (z_{si} - z_R)^2}$$

Avec : ρ_i La pseudo-distance x_{si}, y_{si}, z_{si} Les coordonnées connues du satellite i x_R, y_R, z_R Les coordonnées du récepteur.

La précision des récepteurs GPS commercialisé est de l'ordre de 5 mètres dans des conditions optimales avec un taux de rafraîchissement de 1 Hz.

Le positionnement par GPS présente plusieurs avantages qui font de lui un outil très prisé dans les systèmes de navigation. En effet, le GPS offre un positionnement absolu, une précision à long terme (il n'y a pas de dérive.), une couverture mondiale et un prix abordable.

1.2.3 Le positionnement relatif par satellite

Il s'agit de certaines variantes du GPS : le DGPS (Differential GPS) et le RTK (Real Time kinematic ou cinématique temps réel). Le fonctionnement est le même que le système de positionnement GPS, mais il offre une meilleure performance.

Dans le cas du DGPS, le récepteur est équipé d'un boîtier supplémentaire permettant de recevoir des corrections fournies par des stations DGPS fixes dont les positions sont connues avec une précision centimétrique. Ces corrections sont intégrées soit directement dans le calcul de la position, ou dans la mesure des pseudo-distances (Figure 1.3). La technologie DGPS augmente considérablement la précision du positionnement, permettant de passer à une erreur de l'ordre de 1m. Certains récepteurs exploitent directement la phase sur les ondes porteuses à travers le déphasage entre le satellite et le récepteur. Ce déphasage est obtenu en comparant la phase du signal reçu par le récepteur et la phase du signal généré par l'oscillateur interne au récepteur et qui est une réplique du signal satellite. Cette mesure de phase permet d'obtenir une distance satellite récepteur à partir d'un produit avec la longueur d'onde. Lorsque ces données sont traités en temps réel, on parle de RTK (Real Time kinematic ou cinématique temps réel).

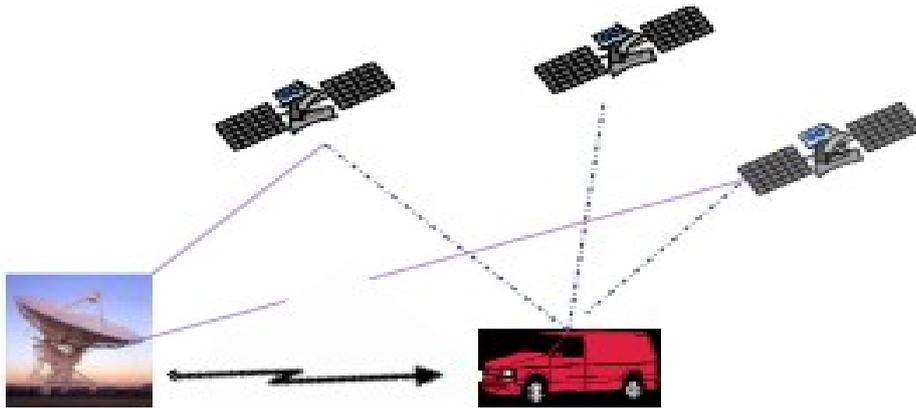


FIGURE 1.3 – GPS Différentiel.

1.2.4 Erreurs du système GPS

Le positionnement par satellite peut être altéré par de nombreuses sources d'erreurs. Celles-ci peuvent être aléatoires ou systématiques. Ces erreurs peuvent être classées suivant qu'elles soient dues soit aux satellites, soit aux récepteurs ou soit à la propagation du signal.

1.2.5 Les erreurs dues aux satellites

Les erreurs provenant de satellites comprennent : les éphémérides ou erreurs orbitales (informations sur les orbites des satellites) causent une mauvaise estimation des pseudo-distances et induisent une erreur de l'ordre de 2 à 5 m [25]. Les erreurs d'horloge des satellites bien que très précises, ces horloges qui permettent la synchronisation lors de la génération de signaux GPS ne sont pas parfaites et causent une erreur de l'ordre de 2.59 à 5.18 m [25].

L'effet de la disponibilité sélective : il s'agit d'une dégradation intentionnelle du signal imposée par le département de défense des États-Unis ; lorsqu'elle est activée elle engendre une erreur allant de 100 à 150m. Le gouvernement américain a arrêté la disponibilité sélective en Mai 2000, ce qui a amélioré de manière significative l'exactitude des récepteurs civils du GPS. En plus de ces erreurs, l'exactitude (précision) de la position GPS calculée est également affectée par la géométrie des satellites. La qualité du positionnement dépend fortement de l'élévation des satellites et de leurs positions relatives par rapport au récepteur. Cette qualité peut être caractérisée par le calcul des facteurs de dégradation géométriques appelés DOP (Dilution Of Precision) et donnant ainsi une idée de la confiance à apporter à une mesure [21].

1.2.6 Les erreurs provenant des récepteurs

Les erreurs provenant des récepteurs comportent des erreurs d'horloge du récepteur, les multitrajets et le bruit du récepteur. Les multitrajets sont les sources d'erreurs les plus prépondérantes. Le signal GPS arrive au récepteur après plusieurs réflexions sur des immeubles et autres objets proches du récepteur ; dans certains cas le signal GPS est même perdu. Les multi trajets causent des erreurs d'une dizaine de mètres sur le positionnement ce pendant de nos jours avec l'avance technologique, on arrive à minimiser ce type d'erreurs. Le bruit du récepteur résulte des limitations de l'électronique du récepteur. Un bon

récepteur performant sera moins sujet à ce type d'erreur. Le bruit cause une erreur de l'ordre de 0.6 m [25].

1.2.7 Les erreurs de propagation de signaux

Les erreurs de propagation de signaux comprennent les retards du signal GPS lors de son passage à travers l'ionosphère et des couches troposphériques de l'atmosphère. En fait, c'est seulement dans le vide (espace libre) que les signaux GPS se propagent à la vitesse de la lumière. L'effet de l'ionosphère sur la mesure des distances aux satellites peut varier de 0 à 50 m tandis que le retard troposphérique qui dépend de la température, de la pression et de l'humidité est d'environ 2 m pour un satellite au zénith jusqu'à 30 m pour une élévation de 5°.

1.3 Les capteurs proprioceptifs

Ce sont des capteurs qui nous informent sur l'état du véhicule. Ces informations peuvent être combinées à un système de positionnement absolu tel que le GPS pour augmenter la fiabilité d'un système de navigation.

1.3.1 L'odomètre

L'odomètre est un capteur qui réside principalement sur les roues du véhicule. Il calcule la distance franchi par la véhicule en estimant les rotations élémentaires de ses roues. Grâce à l'incrémentation de temps, on déduit la vitesse du véhicule. En commençant d'un coin initiale connue et en intégrant les déplacements mesuré, comme on peut calculer à chaque instant la position courante du véhicule, en outre au niveau de la différence de distance franchi par la roue droite et la roue gauche, l'odométrie différentielle permet d'obtenir en plus, une information d'orientation du véhicule et pour savoir les coordonnées de déplacement on doit connaitre le diamètre des roues et de l'entraxe des roues. D'une manière générale le déplacement du véhicule d'un instant k à un instant $k+1$ pendant un temps Δt donnée par :

$$x_{k+1} = x_k + \Delta D \cos(\Theta_k) \Delta t$$

$$y_{k+1} = y_k + \Delta D \sin(\Theta_k) \Delta t$$

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k +$$

Avec x_{k+1}, y_{k+1} les positions en x et y et Θ_{k+1} l'orientation du véhicule.

$$\Delta D = \frac{\Delta D_d + \Delta D_g}{2}$$

et

$$\Delta \Theta = \frac{\Delta_d - \Delta D_g}{E}$$

respectivement le déplacement et la rotation élémentaire où ΔD_d et ΔD_g représentent les déplacements élémentaires des roues droite et gauche et E est la distance qui sépare les points de contact avec le sol des roues droite et gauche. L'objectif de ce positionnement par odométrie (Dead reckoning en anglais) à des avantages tels qu'une :

- Facilité et faible coût de mise en œuvre. cadence d'acquisition de mesure (échantillonnage) élevée (de l'ordre de 100Hz).
- Bonne précision à court terme.
- Disponibilité : les odomètres sont autonomes et très fiables.

1.3.2 Erreurs de l'odométrie

Le principal défaut de cette technique est une dérive de la position proportionnellement à la distance parcourue par le véhicule ; cependant les erreurs sont classées suivant qu'elles soient systématiques ou non-systématiques.

1.3.3 Erreurs liées à la dynamique du véhicule (les erreurs aléatoires)

Erreurs liées à la dynamique du véhicule (les erreurs aléatoires) Elles sont liées aux contacts roues/chaussée et aux différentes inerties de mouvement et présentent un caractère aléatoire et dépendent de la qualité de la chaussée (irrégularités, présence verglas...) mais aussi de l'adhérence des pneumatiques (pression des pneus, usure...), du poids du véhicule ...

— **Patinage des roues :**

L'odomètre va mesurer une distance alors que le véhicule est immobile ce qui conduit à une surestimation de la distance parcourue. Cette erreur peut aussi apparaître lors de virage, ou l'on voit la roue extérieure tourner

plus rapidement que la vitesse réelle du véhicule. Cette source d'erreur a déjà été étudiée dans le passé, on peut notamment voir des éléments de solution dans [10] et [31].

— **Dérapiage :**

Le véhicule continu de glisser pourtant les roues sont bloquées (en cas de freinage brusque); le capteur ne détectera pas la distance parcourue lors de ce laps de temps.

— **Route accidentée :**

Elle conduit aussi à une mauvaise estimation (sous-estimation) de la distance parcourue, car certaines rotations des roues ne seront pas prises en compte par les codeurs. Ces sources d'erreur sont plus difficiles à prédire et à évaluer car liées à la dynamique du véhicule. La précision sur la distance parcourue est alors affectée. Cette erreur est toutefois négligeable car très inférieure aux 2 erreurs présentées précédemment.

1.3.4 Erreurs systématiques ou liées à un dysfonctionnement du capteur

Erreurs systématiques ou liées à un dysfonctionnement du capteur Les erreurs systématiques sont dues à un mauvais paramétrage mécanique du véhicule ou des capteurs. Par exemple l'estimation de la distance parcourue peut être grandement affectée lorsque les 2 roues n'ont pas le même diamètre ou lorsque le diamètre d'une roue change à cause de l'usure du pneu, de la variation de température, de pression... Des procédures de calibration ont été imaginées pour étalonner les capteurs dans ce cas des travaux [19, 35]. Cette fois-ci, les erreurs n'entrent pas dans le bon fonctionnement de l'odomètre. On peut noter ici 2 types d'erreurs, les erreurs critiques, et les erreurs quantifiables. En ce qui concerne les erreurs critiques, elles sont liées à la perte totale de l'information délivrée par l'odomètre. Il s'agit en fait, d'un bris du capteur. Cette erreur est facilement identifiable, et la seule solution consiste à remplacer le capteur. D'autres erreurs peuvent tout de même être quantifiées et compensées par la suite. Par exemple, la perte d'un des repères peut être observée, ce qui va entraîner une sous estimation de la distance parcourue.

1.4 Les capteurs inertiels

La localisation inertielle est un système qui utilise des mesures fournies par des accéléromètres et des gyroscopes. Ces données sont intégrées pour mesurer la position et l'orientation d'un objet relativement à un point de départ, vers un autre point avec une vitesse connue. Les accéléromètres et les gyroscopes sont logés dans un dispositif appelé centrale inertielle CI ou IMU Inertial Measurement Unit (Figure 1.4).

L'accélération linéaire en un point donné est estimée par un capteur nommé l'accéléromètre. Cette double intégration de ces données nous mène au calcul du déplacement élémentaire du véhicule. Fréquemment cette dernière conduit à des accumulations importantes d'erreurs.

Le gyroscope sert à mesurer une variation angulaire. Il estime la vitesse de rotation ω selon l'axe où il est monté dans le repère. Ils sont très importants au domaine robotique mobile car ils peuvent égaler les défauts des odomètres. Une erreur au niveau d'orientation odométrique prépare une erreur de position cumulative qui peut être diminuée, voire compensée par l'utilisation conjointe de gyroscopes [13].

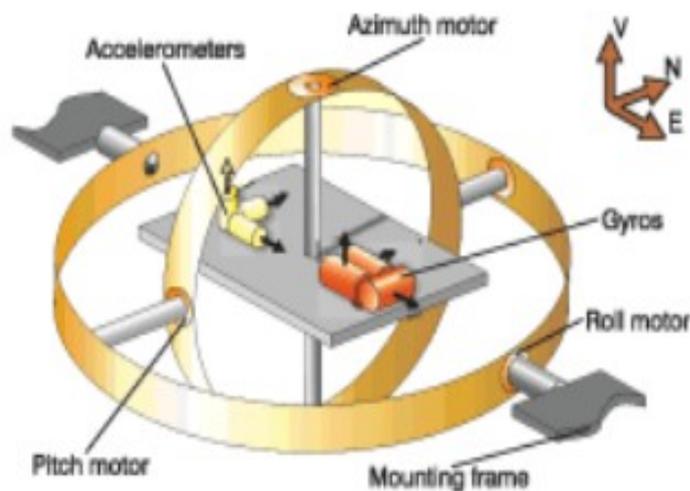


FIGURE 1.4 – Plate-forme inertielle [34].

La technique inertielle dessine beaucoup d'avantages à connaître qu'il n'est pas au sujet à des bouleversements extérieurs, qu'il n'intervient pas avec des équipements radiofréquence, Il est indépendant et offre des données avec une

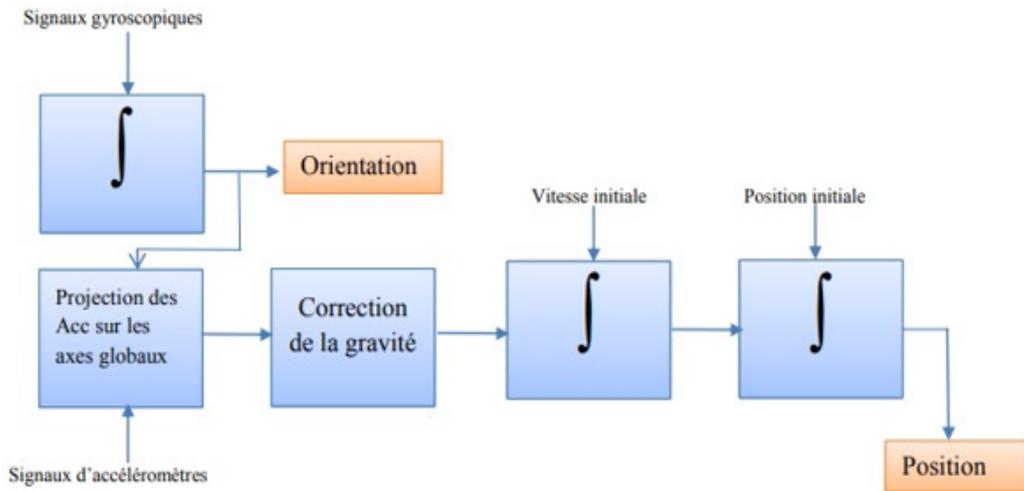


FIGURE 1.5 – Principe d’une centrale inertielle [34].

cadence de l’ordre de 100Hz, il offre aussi des informations pouvant servir à une fusion de donnée ; Ainsi son plus gros inconvénient est qu’il dérive. La figure [1.5] présente le fonctionnement d’une centrale inertielle.

1.4.1 Erreurs du système Inertiel

1.4.1.1 Le biais

Le biais est l’erreur la plus évidente. Il s’agit tout simplement d’une valeur additionnelle (moment du premier ordre non nul). Pour l’accéléromètre, un biais constant ϵ lorsqu’il est doublement intégré conduit à une erreur dans le calcul de la position (t qui augmente d’une manière quadratique avec le temps.

$$s(t) = \epsilon \frac{t^2}{2}$$

Où t est le temps d’intégration. Il est possible d’estimer le biais en mesurant une moyenne d’ensemble de la sortie de l’accéléromètre lorsque le système ne subit aucun mouvement. Pour le gyroscope, le biais qui cause une erreur angulaire croît linéairement avec le temps.

$$\theta(t) = \epsilon.t$$

Il est également possible de l’estimer comme dans le cas de l’accéléromètre et une fois trouvé, il est facile de le compenser par une simple soustraction. Cette

évolution du biais dans les deux cas, nommée dérive, est entre autres due aux variations de la température. Par conséquent la dérive est particulièrement forte pendant les premières minutes après la mise sous tension quand les composants électroniques s'échauffent. Les variations possibles à chaque mise sous tension sont souvent données sous le nom de « stabilité de biais » dans les spécifications techniques d'une centrale inertielle.

1.4.1.2 Bruit

Toutes les mesures seront certainement bruitées. Il s'agit du bruit dans les composants électroniques (thermomécanique), le bruit de quantification, etc. Il se modélise par une séquence aléatoire blanche de moyenne nulle non corrélée ; dans ce cas chaque variable aléatoire est identiquement distribuée avec une variance σ^2 [34].

Pour le gyroscope, l'effet de ce bruit se traduit par une marche aléatoire dont l'écart-type croît proportionnellement à la racine carrée du temps dans la valeur obtenue après intégration.

$$\sigma\theta(t) = \sigma \cdot \sqrt{(\Delta t \cdot t)}$$

De la même manière, pour l'accéléromètre on remarque que le bruit blanc crée une marche aléatoire de second ordre de moyenne nulle et d'écart-type qui croît proportionnellement à $t^{3/2}$ dans l'estimé de la position ; soit :

$$\sigma_s \approx \sigma \cdot t^{3/2} \cdot \sqrt{\Delta t / 3}$$

1.4.1.3 Facteurs d'échelle (erreur de calibration)

Ils sont surtout dus aux erreurs de fabrication ou d'alignement, au vieillissement du capteur, aux non-linéarités et n'évoluent pas considérablement. En conséquence, il peut être calibré une fois pour toutes dans la plupart des cas.

1.5 Filtre de Kalman

L'algorithme de fusion fréquemment utilisé est le filtre de Kalman, qui est une méthode de filtrage récursif qui a été développé par Rudolph Kalman publié en 1960 [20] permettant d'obtenir une meilleure estimation des variables d'état

d'un système avec une correction proportionnelle à l'erreur entre une prédiction des sorties et des mesures.

Le terme état du véhicule fait référence aux propriétés du véhicule dans son environnement. Il s'agit entre autre de son orientation, son accélération, sa vitesse, sa position, ... Ainsi, estimer l'état d'un véhicule c'est estimer ces grandeurs via des capteurs. Dans ce qui suit l'état du véhicule sera noté X . Le filtre de Kalman suppose que l'évolution de l'état du système est linéaire (discret ou continue) ayant n variables d'état (vecteur d'état) qui ne sont pas observables. Ce modèle est décrit par l'équation suivante.

$$X_k = AX_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$$

Où : La matrice A (de dimension n) relie l'état de l'instant $k-1$ à k et peut être constante ou variable dans le temps, A est souvent appelée matrice de transition d'état.

La matrice B (de dimension l) relie les signaux de contrôle u aux états entre les instants $k-1$ et k , B peut être constante ou variable.

Le vecteur u (de dimension l) représente les signaux de commande (u est optionnel). Le vecteur w (de dimension n) est un vecteur qui représente le bruit.

De plus le filtre de Kalman suppose que les mesures provenant des capteurs sont liées au vecteur d'état du système par l'équation linéaire suivante.

$$z_k = HX_k + v_k$$

Où :

La matrice H (de dimension $m \times n$) relie l'état X à l'instant k aux mesures z à l'instant k . Cette matrice appelé matrice de transition des états aux mesures est constante ou variable dans le temps., le vecteur v (de dimension m) est une variable aléatoire qui représente le bruit de mesure du système est également blanc et normalement distribué, $v \sim N(0, R)$, avec R la covariance du bruit de mesure, aussi une matrice pouvant être constante ou variable.

Le filtre de Kalman calcule d'abord une prédiction du vecteur d'état \hat{X}_{k-} à l'aide du modèle du système et de l'estimé du vecteur d'état à l'instant précédant. puis un estimé à posteriori \hat{X}_k suivant les mesures z_k à l'instant k En appliquant le

théorème de Bayes étant donné les mesures z on obtient :

$$\rho(X_k|z_k) \sim N(E[X_k], E[(X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)]) = N(\hat{X}_k, P_k) \quad (3.3)$$

Où : $E[X]$ est le premier moment ou encore la moyenne du vecteur d'état à l'instant k $E[(X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)]$ est le moment de second ordre ou encore la covariance de l'erreur de l'estimation $e_k = X_k - \hat{X}_k$ calculer la prédiction du vecteur d'état, les mesures provenant des capteurs ainsi que la prédiction fournie par le modèle sont utilisés pour effectuer l'estimation à l'instant k . est utilisée d'où la relation :

$$X_k = \hat{X}_k + K_k(z_k - H\hat{X}_k)$$

Notez que le filtre de Kalman suppose que le système est markovien. Où : Le terme $(z_k - H\hat{X}_k)$ appelé résidus et reflète la différence entre la prédiction et les mesures. La matrice K_k de dimension $n \times m$ est appelée gain de Kalman. Le gain de Kalman est calculé à chaque instant k en utilisant la matrice de covariance de l'erreur de l'estimé à priori P_k^- a matrice de covariance de l'erreur de la prédiction du vecteur d'état est définie par :

$$P_k^- = E[(e_k^-)(e_k^-)^T] = E[(X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)^T]$$

,

Étant donné que l'erreur de l'estimé à postériori est supposée diminuer et dépend de la matrice de covariance de l'erreur de l'estimé à priori P_k^- le gain de Kalman P_k devrait être choisi en conséquence. Le gain de Kalman s'exprime :

$$K_k = P_k - H^T(H P_k + R)^{-1} H \quad (3.6)$$

Lorsque l'erreur de mesure R diminue, le gain de Kalman augmente, et ainsi le filtre de Kalman "croira" plus les mesures. De la même manière si l'erreur de la prédiction décroît, le gain de Kalman décroît également et le filtre se basera plus sur la prédiction (les prédictions). L'implémentation discrète d'un filtre de Kalman standard est illustrée sur la Figure [1.6](#).

Les estimés initiaux doivent être définis avant de commencer la procédure

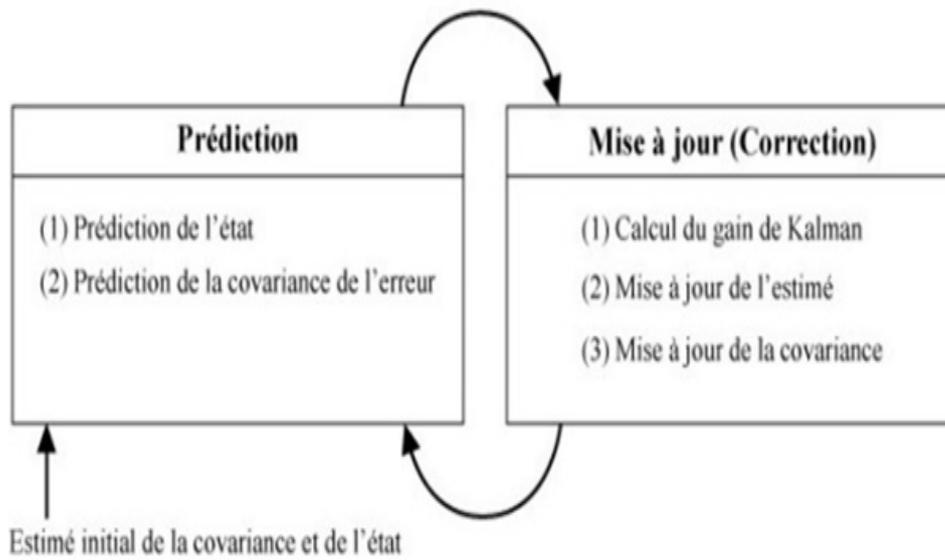


FIGURE 1.6 – L’implémentation discrète d’un filtre de Kalman standard.

itérative. Il est à noter que les matrices de covariances du processus et des mesures Q et R sont mutuellement indépendants. Cette partie est inspirée de [25], [26], [29] et [33].

Chapitre 2

Généralité sur le robotique mobile

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire Les méthodes de navigation d'intérieur en robotique mobile. Nous commencerons par présenter la localisation avant de présenter la planification de trajectoire et la commande réactive. La localisation est une "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". La localisation instantanée est un des points les plus importants et les plus délicats des robots mobiles. Il est utilisé pour le positionnement : du mobile dans l'environnement ou bien d'un élément de l'environnement par rapport au mobile.

Ensuite, l'objectif de la planification de trajectoire est de trouver un chemin réalisable à partir de la position initiale jusqu'à la position finale. Dans ce cadre on a présenté les méthodes basées graphe et champs de potentiel sont décrites ci-dessous.

Enfin, et pour termine l'opération de navigation on a présenté la commande réactive avec méthode de guidage simple.

2.2 Les méthodes de localisation

parmi les points les plus délicats en robots mobiles est La localisation instantanée . Il est utilisé :

- pour le positionnement du mobile dans l’environnement.
- pour le positionnement d’éléments de l’environnement par rapport au mobile..

2.2.1 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 de plus l’attitude (direction) d’un axe du mobile avec une direction fixée constitue une seconde information sur la localisation.

Les techniques utilisées sont de deux types :

- La localisation relative, basée sur les capteurs proprioceptifs..
- La localisation absolue, basée sur les capteurs extéroceptifs.

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

2.2.2 Localisation relative (l’estime)

La localisation relative consiste à évaluer la position, l’orientation et éventuellement la vitesse du robot mobile en intégrant les informations fournies par les capteurs dits proprioceptifs. 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.

2.2.2.1 L’odométrie

Est la plus largement utilisée pour localiser les robots mobiles à roues. il permet de déterminer la position et le direction d’un robots mobiles par intégration de ses mouvements élémentaires, et ce, par rapport à un repère lié à sa configuration(position et le direction) initiale. La mise en œuvre de l’odométrie

est très simple et moins cher. L'inconvénient de l'odométrie est une précision très faible sur des distances importantes, ce à cause des erreurs cumulatives [14].

2.2.2.2 Les systèmes inertiels

La mesure 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 est obtenue, dans la plupart des cas, à l'aide de gyroscope. 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.

2.2.3 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 (terre, mer, 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 variées [15, 8, 18]. Pour répondre à la problématique qu'est la localisation d'un robot dans son environnement, deux types de stratégies sont utilisables :

- La première stratégies basée sur l'utilisation des repère naturels.
- Les deuxièmes stratégies basée sur l'utilisation des repères artificiels.

Il est à noter que quelque soit le cas de figure, la localisation absolue nécessite toujours une représentation de l'environnement qui est appelée carte de l'environnement.

2.2.3.1 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 lourd à installer que les systèmes précédents. 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 :tel que les chariots filoguidés et les peintures réfléchives.
- Les marques discrètes : tel que les points lumineux ,un point rétro et réflecteur.

2.2.3.2 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. La fonction localisation peut se décliner en deux étapes :

1. La construction du modèle sensoriel. Elle consiste à conditionner les mesures capteur.
2. 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 position et l'altitude du robot.

2.3 La localisation de l'environnement

La localisation de l'environnement a plusieurs avantages tel que :

- L'aide à 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.

2.3.1 Les systèmes télémétriques

Les systèmes employés le plus fréquemment sont du type télémétrique. Son principe consiste soit à mesurer le temps de vol ou le déphasage d'une onde (acoustique ou optique) soit à appliquer une méthode de triangulation. Dans ce cas les mesures utilisées sont goniométriques. Deux cas sont possibles :

- soit l'on dispose de mesures d'angles de gisement absolues et deux balises suffisent [12].
- soit les mesures d'angles ne sont que relatives et il faut trois balises [24].

2.4 Navigation Robotique

A partir la localisation, le robot va pouvoir se déplacer dans son environnement et accomplir les objectifs qu'il doit réaliser. Dans ce cadre, différentes méthodes de guidage existent. On peut utiliser des méthodes de planification de trajectoire ou des méthodes de commande telles que la guidage simple.

2.4.1 Planification de trajectoire

L'objectif de la planification de trajectoire est de trouver un chemin réalisable à partir de la position initiale jusqu'à la position finale qui évite les obstacles. Un grand nombre de méthodes existent, quelques-unes de ces méthodes sont décrites ci-dessous : méthodes basées graphe, champs de potentiel [16].

2.4.1.1 Méthodes basées sur graphe

Le principe des méthodes basées sur graphe est de chercher un chemin entre deux nœuds dans un graphe utilisé pour donner une représentation topologique de l'environnement : les nœuds sont des états libres de l'environnement. Les arêtes représentent les chemins sans obstacles menant d'un état à un autre. La figure 2.1 montre un exemple de carte topologique.

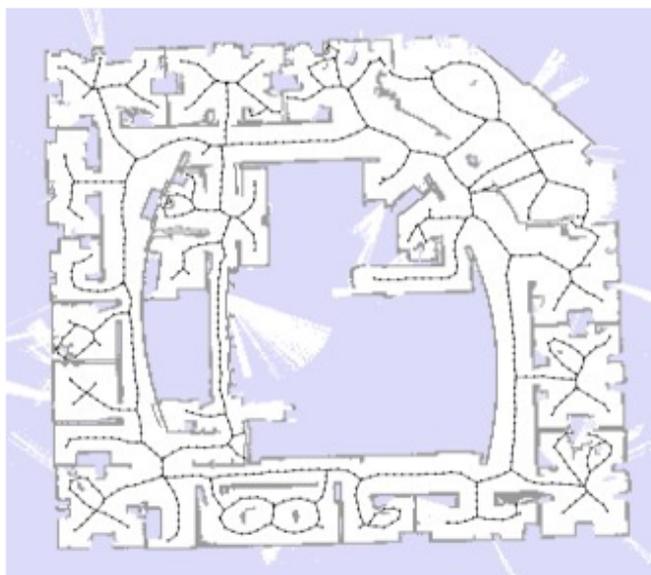


FIGURE 2.1 – Carte de l'environnement et représentation sous forme de graphe

Dans cette partie, on note X un état du robot. L'ensemble des états est noté \mathbb{X} . L'ensemble des états libres est appelé X_{libre} et l'ensemble des états occupés X_{occ} .

On a $X = X_{libre} \setminus X_{occ}$. On appelle X_{init} l'état initial et X_{obj} l'état objectif du robot. Le but de la planification est de trouver un chemin entre X_{init} et X_{obj} inclus dans X_{libre} . Un objectif supplémentaire peut être de trouver le chemin le plus court, appelé chemin optimal. Plusieurs algorithmes sont régulièrement

1. <https://www.cs.washington.edu/node/4231/>

utilisés en robotique mobile pour effectuer une planification de trajectoire à partir d'un graphe : tel que l'algorithme A^* et Dijkstra [11, 17].

Ces algorithmes supposent l'existence d'un graphe déjà construit. L'algorithme de Dijkstra recherche le plus court chemin dans un graphe pondéré entre l'état initial X_{init} et l'objectif X_{obj} de façon itérative. Les pondérations représentent les distances entre les états représentés par les nœuds du graphe. La figure 2.2² est un exemple d'application de l'algorithme. Tout d'abord, un sous-graphe est initialisé avec le nœud X_{init} . Le sous-graphe est composé par les nœuds colorés en rouge sur la première illustration en haut à gauche de la figure 2.2. La première étape consiste à ajouter au sous-graphe le nœud adjacent qui présente la distance la plus petite à X_{init} . Ce nœud est représenté en rouge sur la seconde illustration. La deuxième étape est la mise à jour des distances entre les nœuds adjacents au sous-graphe et X_{init} .

Si plusieurs chemins sont possibles entre les deux nœuds dans le sous-graphe, le chemin qui présente la plus petite distance est sélectionné. Les chemins minimaux sont surlignés en bleu sur les illustrations suivantes. Ces deux étapes sont répétées jusqu'à atteindre le nœud X_{obj} . A l'instant n , le nœud dessiné en jaune représente le nœud qui a été ajouté au sous-graphe à l'étape $n - 1$. On peut remarquer que le nœud ajouté n'est donc pas forcément adjacent au nœud précédent, le sous-graphe progresse dans toutes les directions. L'algorithme A^* est une variante de l'algorithme de Dijkstra qui permet de trouver une solution en un temps plus court. Une heuristique sur la direction à suivre est formulée afin de limiter le nombre de nœuds ajoutés au sous-graphe. Cependant, la solution obtenue n'est pas obligatoirement la solution optimale. Pour ces deux algorithmes, le temps d'optimisation augmente avec le nombre de sommets ou d'arêtes du graphe.

2. <http://www.math.cornell.edu/mec/Winter2009/Thompson/search.html>

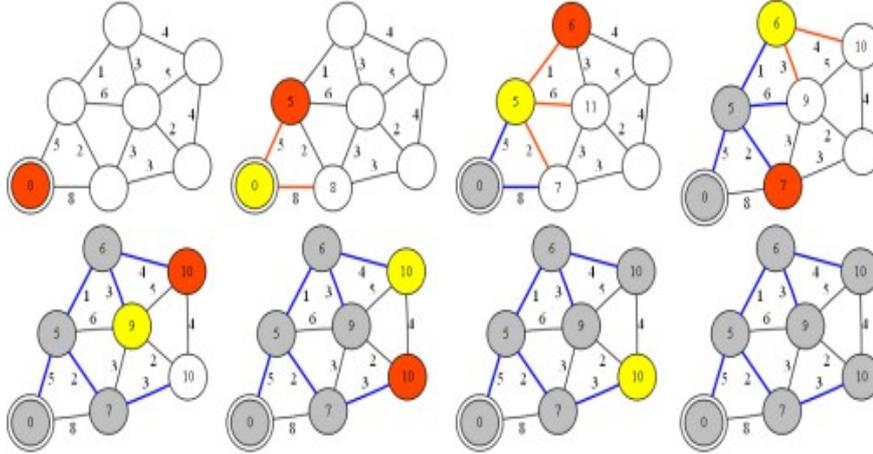


FIGURE 2.2 – Illustration de l'algorithme de Dijkstra.

2.4.1.2 Champs de potentiel artificiels

La méthode de champs de potentiel artificiels a été introduite par [22]. Elle consiste à considérer le robot comme une particule sous l'influence d'un champ de potentiel afin de le guider vers son objectif X_{obj} tout en évitant les obstacles. Le robot se déplace dans un champ de forces composé d'une force attractive qui l'attire vers son objectif X_{obj} et d'une force répulsive, qui l'éloigne des obstacles. Un champ de potentiel $\varphi(X)$ est défini comme :

$$\varphi(X) = \varphi_{att}(X) + \sum_{i=1}^m \varphi_{rep}^i(X)$$

Avec $\varphi_{att}(X)$, le champ attracteur, défini généralement comme une fonction de la distance au point X_{obj} .

$$\varphi_{att}(X) = \|x - X_{obj}\|$$

$\varphi_{rep}^i(X)$ est le champ répulseur défini pour chaque obstacle i avec m le nombre total d'obstacles. Il existe de nombreuses formulations pour définir le champ répulseur. La force est calculée comme le gradient négatif de $\varphi(X)$:

$$F(X) = -\nabla \varphi(X)$$

On obtient un champ vectoriel qui donne pour chaque position X de l'espace la direction de la plus forte pente dans le champ de potentiel. La figure 2.3 montre un exemple de champ de potentiel artificiel et du champ vectoriel correspondant.

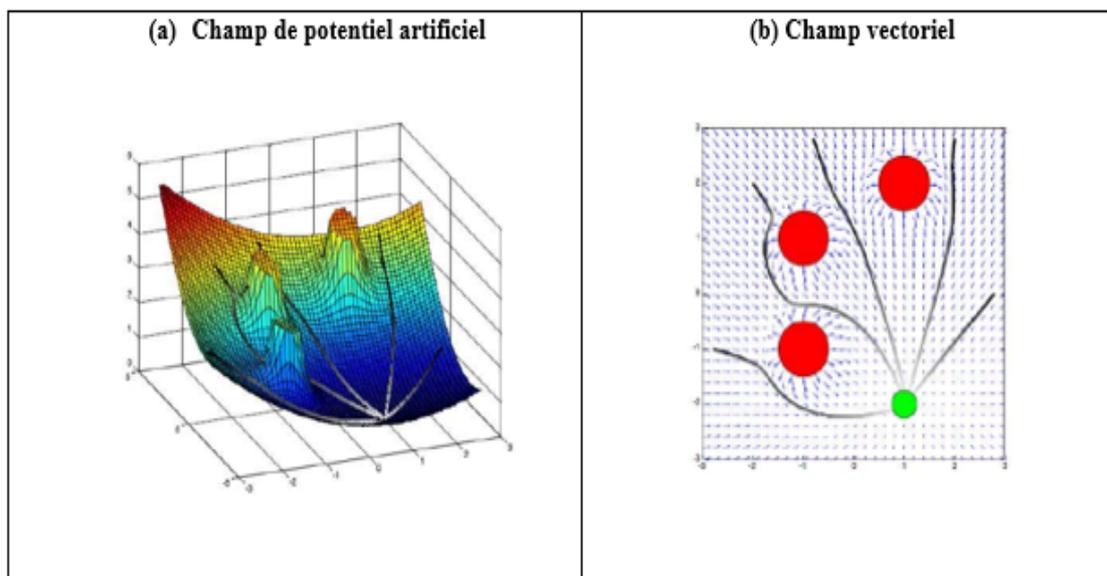


FIGURE 2.3 – 8 Champ potentiel.

Illustration d'un champ de potentiel artificiel et du champ vectoriel correspondant. Les obstacles sont les cercles rouges et l'objectif est en vert. Quatre trajectoires obtenues au départ de quatre points différents sont dessinées. Les images sont issues de [27]. A chaque itération, la trajectoire du robot est définie pour suivre la direction de F au point X . Dans [32], la fonction F est modifiée afin de devenir une fonction de l'entrée en commande U , ce qui permet d'obtenir directement la commande à envoyer au robot.

Cette méthode présente l'avantage d'être rapide et économe en calculs. Elle peut être facilement appliquée aux environnements dynamiques. Elle est efficace pour l'évitement d'obstacles mais elle est difficilement adaptable à des missions plus complexes dans lesquelles les objectifs de mission ne sont pas traduisibles en champ de potentiel. Le problème majeur de la méthode est la présence de minima locaux dans le champ de potentiel dans lesquels le robot peut se retrouver piégé. Pour cela, de nombreuses améliorations ont été proposées : redéfinition du champ de potentiel, définition d'objectifs virtuels intermédiaires, méthode de suivi de mur, voir [23]. La méthode CHOMP [28] s'inspire de la méthode des champs de potentiel artificiels pour raffiner des trajectoires obtenues à partir

d'algorithmes de planification. Généralement, ces trajectoires sont non lisses et ne répondent pas aux contraintes dynamiques du robot. L'algorithme permet d'optimiser la trajectoire pour obtenir une trajectoire lissée et évitant les obstacles, en utilisant un champ de potentiel caractérisé par les obstacles et les contraintes sur le robot. Cette méthode peut également optimiser la trajectoire à partir d'une simple trajectoire initiale, même dans le cas où elle rencontre des obstacles.

2.4.2 Commande réactive

Les méthodes de planification de trajectoire décrites dans la partie précédente présentent des limites de fonctionnement qui les rendent difficilement applicables pour les missions considérées dans cette thèse. Les méthodes de planification basées sur les graphes ne sont pas compatibles avec des environnements inconnus et un fonctionnement temps-réel. Les méthodes sur les champs de potentiels artificiels ne sont pas applicables pour la réalisation de missions complexes. De plus, ces algorithmes donnent uniquement la trajectoire qu'il faut effectuer pour atteindre l'objectif, il est nécessaire de mettre en place une loi de guidage pour que le robot suive la trajectoire calculée. La commande réactive cherche à optimiser la trajectoire locale du robot à partir des informations connues à l'instant actuel. Elle permet une adaptation aux changements dans l'environnement (découverte d'un nouvel obstacle, objets dynamiques...). Les contraintes dynamiques sur le robot sont considérées directement dans le calcul de la commande. Le temps de calcul est indépendant de la taille de l'environnement. Cependant, la prédiction de la trajectoire est réalisée uniquement à court-terme et il est difficile d'anticiper par rapport à un objectif lointain.

2.4.2.1 Guidage simple

Une première approche simple pour la commande d'un robot mobile est de considérer une commande qui annule l'erreur entre la position courante et la position désirée. Pour cela, on peut faire appel à des correcteurs linéaires classiques comme le PID ou la commande par retour d'état.

Le régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) permet d'asservir un système en agissant sur l'erreur e entre la consigne et la mesure. La commande est exprimée sous la forme :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Avec K_p le gain proportionnel, K_i le gain sur la partie intégrale et K_d le gain sur la partie dérivée. Ces trois gains sont réglés de telle sorte que la réponse du système suive des caractéristiques désirés en termes de robustesse, de précision et de rapidité. La figure 2.4³ montre un schéma d'une boucle de commande régulée par un correcteur PID.

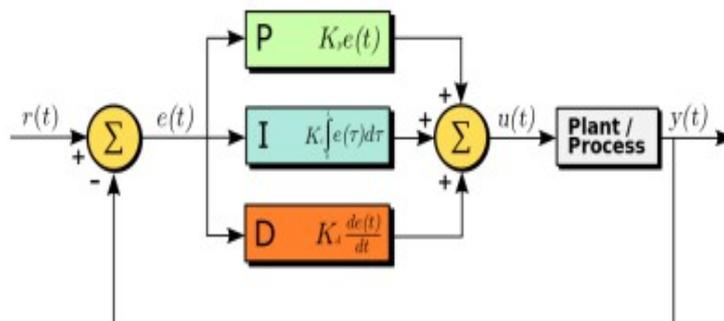


FIGURE 2.4 – Schéma-bloc d'une boucle de commande par PID.

La commande par retour d'état (ou commande par placement de pôles) définit la commande U à appliquer à un système exprimé sous la forme d'une représentation d'état :

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX$$

La commande se présente sous la forme :

$$U = r - KX$$

Avec r , le signal de référence et K la matrice de gain du retour d'état, dont les coefficients sont fixés afin d'obtenir les performances désirées. La figure 2.5 montre un schéma d'une boucle de commande avec retour d'état. Sur cette figure, x est supposé être la sortie du système (C est alors la matrice identité).

3. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PID.svg>, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17633925>

Dans le cas général, il faut mettre en place un observateur afin d'obtenir l'état x à partir de la sortie. Une exemple d'application de ce type de commande pour un robot mobile consiste à calculer la différence δ entre l'orientation du robot Θ et la direction entre la position actuelle du robot et le point à rallier Φ , comme illustré sur la figure 2.6. La commande en vitesse angulaire peut alors être définie par

$$\varpi = -k.\delta$$

avec k gain réel positif fixe. La commande en vitesse linéaire v est gérée dans une boucle de régulation indépendante. Cette commande a pour effet d'aligner l'orientation du robot sur la direction du point à rallier. Plus la différence δ est importante, plus la commande en vitesse angulaire est importante. Quand le robot est aligné avec le point, la commande en vitesse angulaire devient nulle et le robot avance alors jusqu'à atteindre le point. Cette commande permet de réaliser des missions de ralliement de points. Elle peut être utilisée par exemple pour le suivi d'une trajectoire définie par une liste de points de passage, à condition de ne pas avoir d'obstacles à proximité de la trajectoire. Par contre, ce type de commande ne peut prendre en compte que des objectifs définis sous la forme de points à rallier et ne s'adapte pas aux environnements complexes. Les correcteurs linéaires sont capables de contrôler des systèmes robotiques pour effectuer des missions simples. Cependant, si le modèle présente de fortes non-linéarités ou que les missions demandées sont complexes, ces méthodes ne peuvent plus être utilisées. Il faut alors envisager d'autres types de commandes comme la commande optimale ou la commande prédictive. Ces méthodes sont présentées dans les sections suivantes.

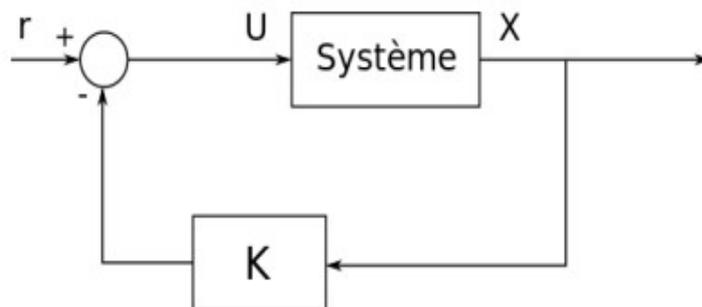


FIGURE 2.5 – Schéma-bloc d'une boucle de commande par retour d'état.

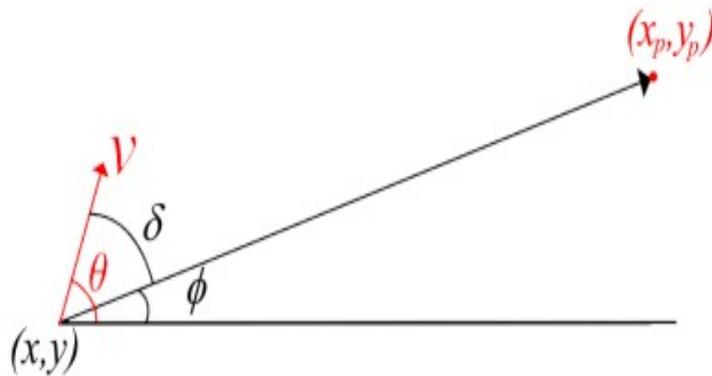


FIGURE 2.6 – Schéma représentant le principe du guidage.

2.5 Conclusion

Les deux grandes familles de méthodes de localisation, relative et absolue, contiennent chacune des avantages et des inconvénients. C'est pour quoi qu'une grande partie des systèmes de navigation intègre les deux solutions pour donner lieu à des algorithmes de recalage de l'estimation odométrique (ou bien estimation par capteur inertielle) par l'estimation absolue.

D'autre part, nous avons vu que l'algorithme de planification de trajectoires présente des inconvénients (temps de calcul) incompatibles avec le type de missions considérées dans cette mémoire.

Le guidage simple parmi les méthodes de commande réactive qui cherche à optimiser la planification du trajectoire du robot à partir des informations de la localisation donnée.

Chapitre 3

Conception et implémentation

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire la conception et l'implémentation du robot mobile. Nous commencerons par présenter la conception du système embarqué avant de présenter la conception hardware et mécanique et la implémentation . Enfin en termine par un teste réel.

3.2 Conception du robot

Le schéma ci-dessus représente La structure globale du notre robot :

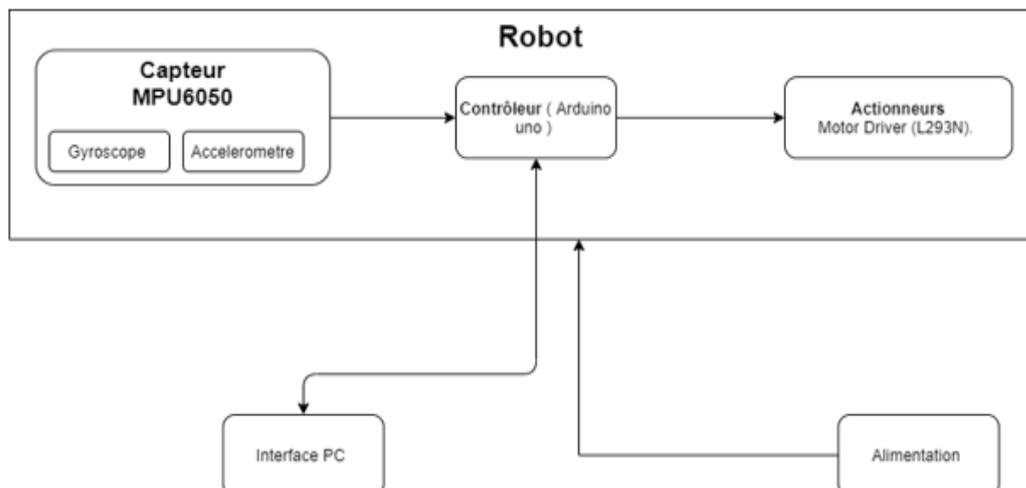


FIGURE 3.1 – Schéma des différentes unités du robot.

3.2.1 Cahier de charge

Notre objectif est de réaliser un robot qu'il a les caractéristiques suivantes : Il peut effectuer les quatre mouvements suivants (marche avant, marche arrière, tourné dans les deux directions et arrêter)

- Il devrait être facile à monter et à démonter.
- Il devrait avoir un mode de déplacer d'un point de départ à un point de cible à l'aide des capteurs inertiels.
- Il devrait avoir un mode dans lequel il peut naviguer et localiser d'une manier autonome a l'aide d'un accéléromètre et gyroscope.
- Il devrait être facile de manipuler, modifier et améliorer.

On peut déjà remarquer l'émergence de deux (02) modes :

1. Mode de Perception (robot intelligent)
2. Mode de navigation autonome (navigation par capteurs inertiels)

3.3 Conception du système embarqué

3.3.1 La localisation par capteur inertielle (MPU6050)

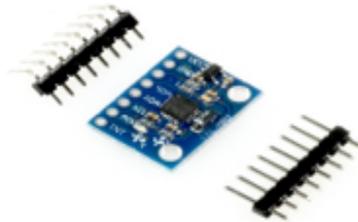


FIGURE 3.2 – MPU- 6050.

L'MPU6050 comporte 6 axes,3 axes pour gyroscope et 3 axes pour accéléromètre.

Donc on parle à un système de navigation inertielle une fois couplée le gyroscope avec l'accéléromètre on la position, la vitesse et l'orientation d'une plateforme mobile. Les algorithmes contenus dans un système de navigation inertielle s'appellent la mécanisation d'une unité de mesure inertielle (IMU).

- Le gyroscope retourne une vitesse angulaire de rotation selon 3 axes, 0 si pas de rotation (degrés/seconde) et par intégration dans le temps on

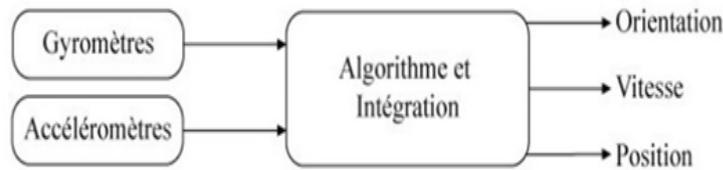


FIGURE 3.3 – Structure du système de navigation inertielle.

obtient un angle d'orientation (degrés). Dans notre travail on intéresse par l'angle d'orientation sur l'axe Z seulement.

- L'accéléromètre retourne une accélération (m/s^2),. La vitesse (m/s) peut s'en déduire par une première intégration dans le temps (à une vitesse initiale V_0 près), en faisant attention au cumul des erreurs de dérive. La position de déplacement (m) peut s'en déduire par une seconde intégration dans le temps. Dans notre travail on intéresse sur les axes X et Y seulement.

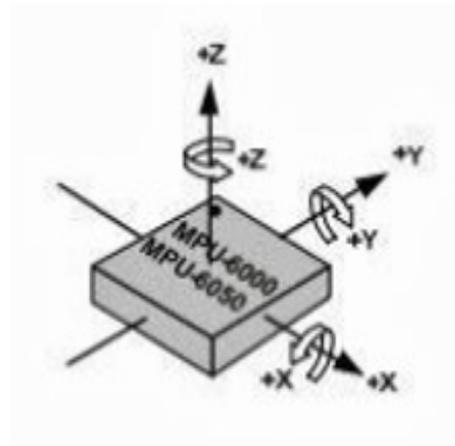


FIGURE 3.4 – Les 3 axes de gyroscope et accélérometre.

3.3.2 Mise à jour du système de navigation inertielle

Le filtrage de Kalman permet de e corriger les valeurs du SNI avec les valeurs d'erreur δX^+ provenant du filtrage de Kalman. La correction de l'état (position, vitesse) s'effectue avec les équations suivantes : $X^+ = X^- + \delta X^+$ Où δX^+ est l'erreur du système de navigation inertielle estimé par le filtrage de Kalman, X^- est l'état du système de navigation inertielle avant la correction et X^+ représente l'état après la correction. L'orientation corrigée avec : $R^+ = R^-(I[\delta p\ddot{O}])$

où $[\delta p \ddot{O}]$ est l'erreur des petits angles du IMU estimé par le filtrage de Kalman, R^- est l'orientation provenant du système de navigation inertielle avant la correction alors que R^+ représente l'orientation corrigée par le filtrage.

L'algorithme récursif du filtrage indirect de Kalman peut se présenter sous forme de diagramme à l'aide de la Figure 3.5

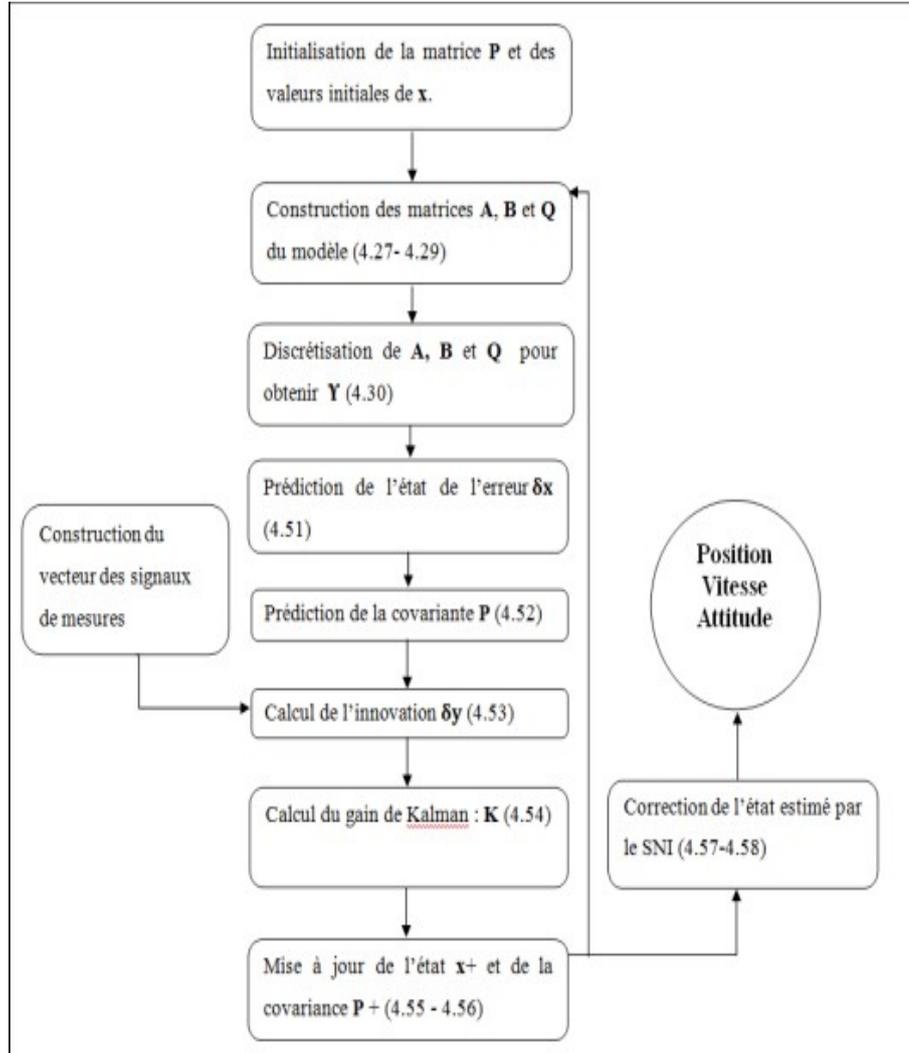


FIGURE 3.5 – Algorithme du filtrage de Kalman.

3.4 Conception hardware et mécanique

Pour la plate-forme hardware, on a décidé de choisir le microcontrôleur Arduino , avant de commencer l'élaboration de la base mécanique de robot, c'était le choix optimal pour notre robot car on peut facilement agencer les autres composantes autour de lui grâce à son plateforme d'entrées/sorties permettant de dialoguer (en temps réel) et exécuter les commandes, et aussi pour son inter-

face qui est largement utilisé partout dans le monde ce qui signifie qu'il y'a beaucoup d'informations et de ressources disponibles. Avec la liste des fonctionnalités qu'on a établies au-dessus, on peut aller chercher les pièces nécessaires pour la construction de notre robot. Voici l'ensemble des composants principale qu'on va utiliser pour la conception des deux robots mobiles :

- Carte Arduino Uno.
- Motor Driver (L293N).
- Plaque d'essai (Breadboard) et câbles.
- Moteurs à courant continu (CC).
- Source d'alimentation (batteries).
- Kit de véhicule (châssis et roues).
- module MPU(6050).

3.4.1 Carte Arduino Uno

La carte Arduino Uno permettra de contrôler toutes les autres parties (Figure 3.6).

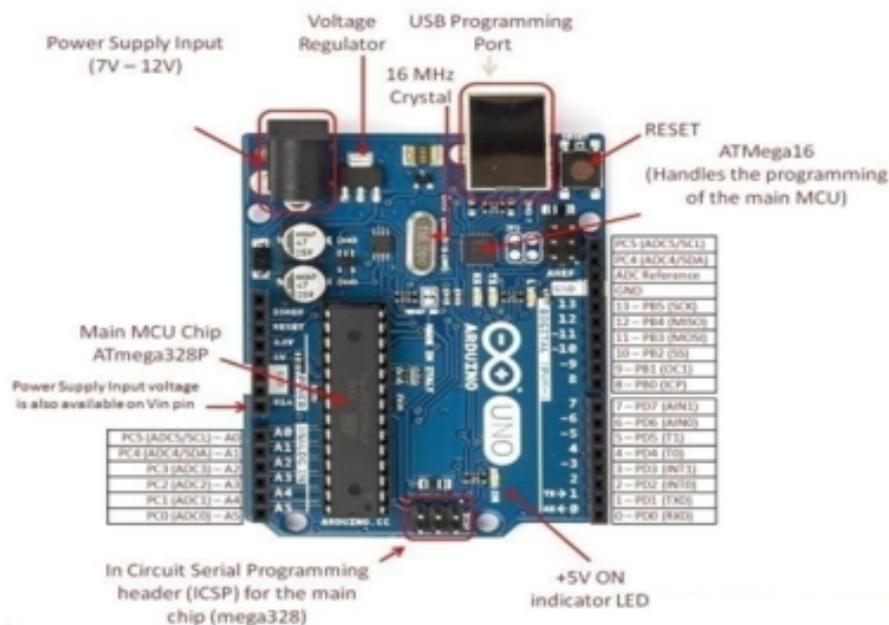


FIGURE 3.6 – Microcontrôleur - Arduino uno.

Le système Arduino est conçu d'une plateforme Open Source installée sur une carte programmée à microcontrôleur AVR permettant l'écriture, la compilation et le test d'un programme. Les cartes et modules Arduino sont conçus avec des entrées/sorties qui reçoivent des signaux de capteurs.

3.4.2 Motor Driver (L293N)

La carte Arduino ne peut pas contrôler directement un moteur. La partie délicate est d'être en mesure de faire fonctionner le moteur de manière sélective vers l'avant ou vers l'arrière, ce qui nécessite l'échange des entrées d'alimentation et de masse dans le moteur. Le module L298N permet de commander séparément 2 moteurs à courant continu DC de 3 à 30 V. Il fonctionne avec une interface de commande TTL 5V (donc compatible avec Arduino ou avec de nombreux autres microcontrôleurs en basse tension) (voir Figure 3.7).

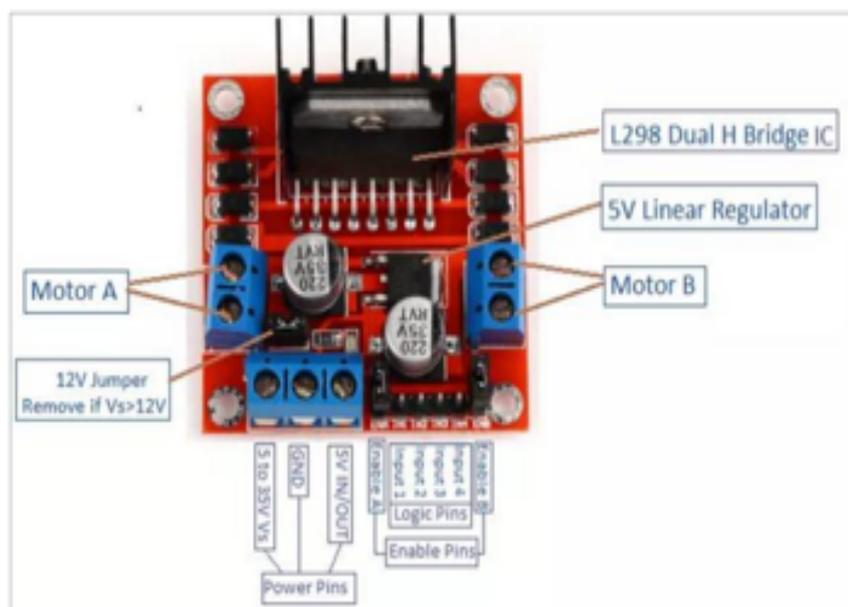


FIGURE 3.7 – Motor Driver (L293N).

3.4.3 Plaque d'essai (Breadboard) et câbles

L'une des restrictions que nous avons décidé d'imposer dans ce projet est que nous ne ferions pas des opérations de soudage, de sorte que nous pouvons assembler et à démonter le robot sans détruire les pièces. C'est un dispositif qui permet de réaliser le prototype d'un circuit électronique et de le tester. L'avantage de ce système est d'être totalement réutilisable, car il ne nécessite pas de soudure (Figure 3.8).

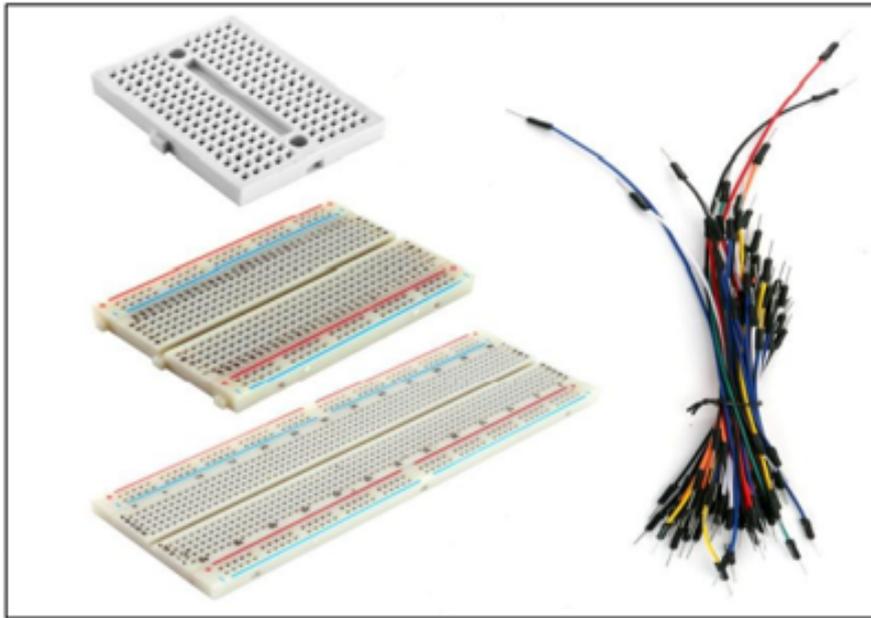


FIGURE 3.8 – Plaque d’essai (Breadboard) et câbles.

3.4.4 Moteurs à courant continu (DC)

nous avons utilisé deux moteurs à courant continu pour commander les deux roues. Pour notre projet, nous avons utilisé des moteurs à courant continue DC 3V-6V .



FIGURE 3.9 – Moteurs à courant continu (DC).

3.4.5 Source d’alimentation (batteries)

Pour alimenter notre robot on va utiliser plus de quatre batteries pile Li-ion rechargeable de 3.7V brancher en série entre eux (Figure [3.10](#)).



FIGURE 3.10 – Pile Li-ion rechargeable 3.7V.

3.4.6 Kit de véhicule (châssis et roues)

Il existe plusieurs choix possibles, Dans ce cas on a utilisé un kit de Châssis de Robot 2WD Basic (Acrylique), (Figure [3.11](#)).



FIGURE 3.11 – Kit de véhicule.

3.5 Implémentation

3.5.1 Environnement

1. Arduino IDE :

Environnement de développement intégré Arduino est une application multiplateforme qui est écrite dans des fonctions de C et C ++. Il est utilisé pour écrire et télécharger des programmes sur des cartes compatibles Arduino, mais aussi, avec l'aide de cœurs tiers, d'autres cartes de

développement de fournisseurs [1].

2. **SPYDER :**

Spyder 3 (nommé Pydee dans ses premières versions) est un environnement de développement pour Python. Libre (Licence MIT) et multiplateforme (Windows, Mac OS, GNU/Linux), il intègre de nombreuses bibliothèques d'usage scientifique : Matplotlib, NumPy, SciPy et IPython. Créé et développé par Pierre Raybaut en 2008, Spyder est maintenu, depuis 2012, par une communauté de développeurs qui ont pour point commun d'appartenir à la communauté Python scientifique [5].

3. **NumPy :**

est une bibliothèque pour langage de programmation Python, destinée à manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels ainsi que des fonctions mathématiques opérant sur ces [3].

4. **Tkinter (de l'anglais Tool kit interface) :**

est la bibliothèque graphique libre d'origine pour le langage Python, permettant la création d'interfaces graphiques. Elle vient d'une adaptation de la bibliothèque graphique Tk écrite pour Tcl [6].

5. **pySerial :**

est une bibliothèque du langage de programmation Python d'accès au port série [4].

6. **i2cdevlib :**

La bibliothèque de périphériques I2C est une collection de classes uniformes et bien documentées pour fournir des interfaces simples et intuitives à une collection toujours croissante de périphériques I2C. Chaque périphérique est conçu pour utiliser le code générique i2cdev, qui fait abstraction de la communication I2C au niveau des bits et des octets de chaque classe de périphérique spécifique, ce qui permet de garder le code de périphérique propre tout en offrant un moyen simple de modifier un seul classe pour porter le code de communication I2C sur différentes plateformes (Arduino, PIC, simple bit-banging, etc.). [2]

3.5.2 Intégration de ces capteur

Nous avons réalisé un Schéma démonstratif qui explique la localisation du robot à l'aide du module MPU6050, il est réalisé sur Fritzing (Figure 3.12).

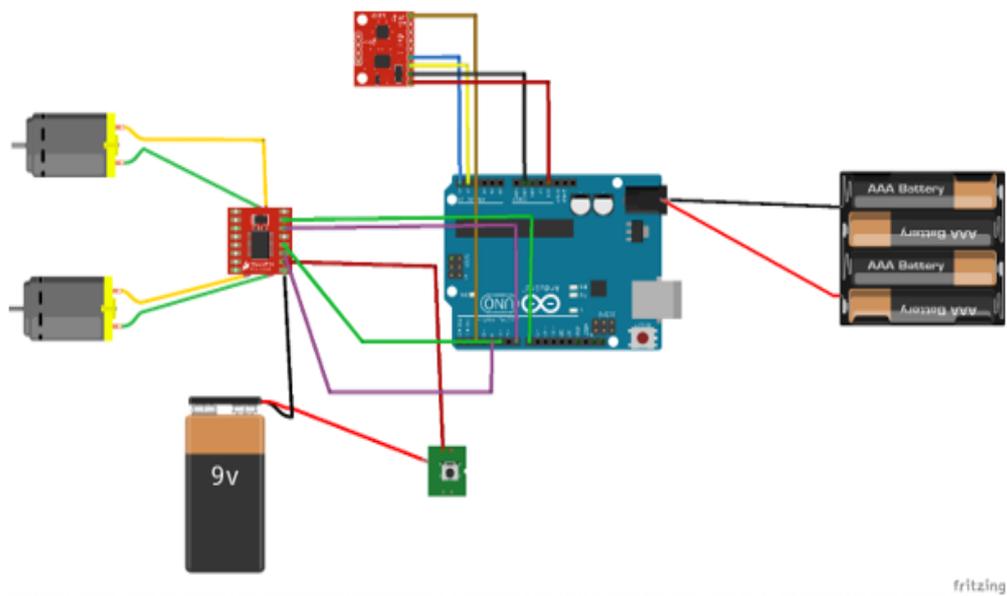


FIGURE 3.12 – Schéma pour la localisation du robot sur Fritzing.

3.6 Représentation du robot



FIGURE 3.14 – Représentation du robot.

L'interface de notre système est la suivante (Voir figure 3.15) :



FIGURE 3.15 – Schéma pour la localisation du robot sur Fritzing.

Les résultats obtenues sont mentionnés su la figure 3.16 :

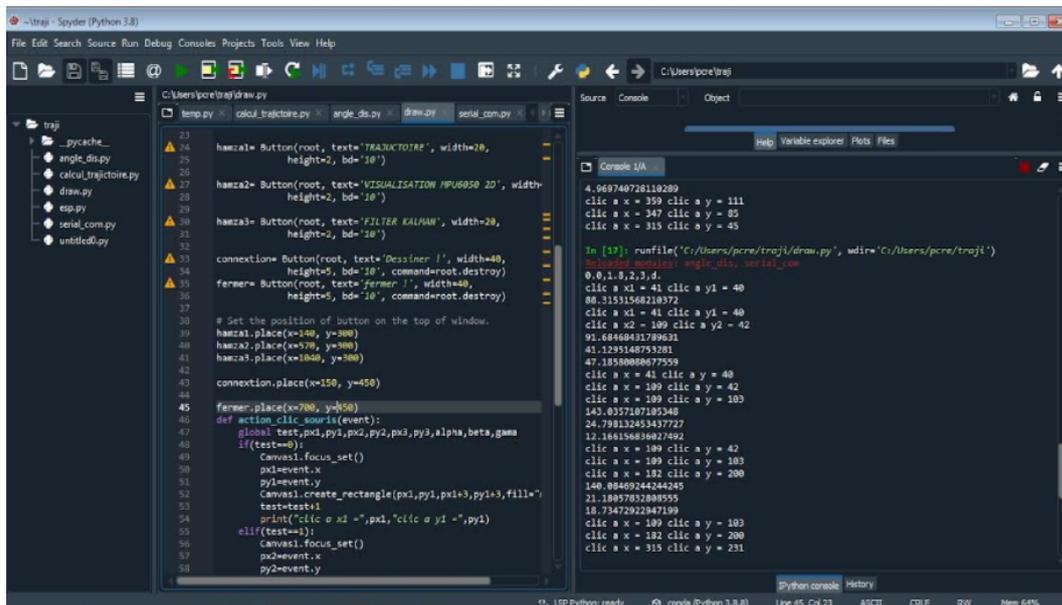


FIGURE 3.16 – Schéma pour la localisation du robot sur Fritzing.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire nous avons présenté les systèmes de positionnement et de navigation par satellite (capteurs extéroceptifs), les capteurs proprioceptifs et le filtre de Kalman. Nous commencerons par l'explication du positionnement par GPS ensuite l'explication du système de navigation inertielle et odométrique.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au domaine de la robotique mobile dans les environnements intérieurs, dans ce cadre nous avons présenté la localisation avant de présenter la planification de trajectoire et la commande réactive.

Un prototype de robot a été réalisé pour la navigation dans le domaine domestique à l'aide de filtre de Kalman et les capteurs proprioceptifs (gyroscope et accéléromètre).

Bibliographie

- [1] Arduino_ide. https://fr.wikipedia.org/wiki/Arduino_1DE.
- [2] i2cdevlib. <https://www.i2cdevlib.com/>.
- [3] Numpy. [wikipedia.org](https://www.wikipedia.org).
- [4] Pyserial. <https://fr.wikipedia.org/wiki/PySerial>.
- [5] Spyder (logiciel). [wikipedia.org](https://www.wikipedia.org).
- [6] Tkinter. [wikipedia.org](https://www.wikipedia.org).
- [7] Iyad ABUHADROUS : *Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur*. Thèse de doctorat, Paris, ENMP, 2005.
- [8] MJ ALDON et L LE BRIS : Mobile robot localization using a light-stripe sensor. *In Proceedings of the Intelligent Vehicles' 94 Symposium*, pages 255–259. IEEE, 1994.
- [9] NN ALEXANDRE : *Localisation robuste multi-capteurs et multi-modèles*. Thèse de doctorat, ph. D. thesis, doctoral school of sciences and engineering, Evry Val d . . . , 2009.
- [10] Cai BAI-GEN, Wang JIAN, Yin QIN et Liu JIANG : A gnss based slide and slip detection method for train positioning. *In 2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing*, volume 1, pages 450–453. IEEE, 2009.
- [11] Michael BARBEHENN : A note on the complexity of dijkstra's algorithm for graphs with weighted vertices. *IEEE transactions on computers*, 47(2):263, 1998.
- [12] Margrit BETKE et Leonid GURVITS : Mobile robot localization using landmarks. *IEEE transactions on robotics and automation*, 13(2):251–263, 1997.
- [13] Johann BORENSTEIN et Liqiang FENG : Gyrodometry : A new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots. *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 423–428. IEEE, 1996.

- [14] Johann BORENSTEIN et Liqiang FENG : Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 12(6):869–880, 1996.
- [15] O DEVISE et Christian DONCARLI : Motion estimation of a mobile robot with uncalibrated bearings only measurements. *In Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems*, pages 421–426. Elsevier, 1993.
- [16] Chad GOERZEN, Zhaodan KONG et Bernard METTLER : A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous uav guidance. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 57(1):65–100, 2010.
- [17] Ruijie HE, Sam PRENTICE et Nicholas ROY : Planning in information space for a quadrotor helicopter in a gps-denied environment. *In 2008 IEEE International conference on Robotics and Automation*, pages 1814–1820. IEEE, 2008.
- [18] Jie HUANG, Tadawute SUPAONGPRAPA, Ikutaka TERAKURA, Noboru OHNISHI et Noboru SUGIE : Mobile robot and sound localization. *In Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS'97*, volume 2, pages 683–689. IEEE, 1997.
- [19] Liu JIANG, Cai BAI-GEN, Wang JIAN et Tang TAO : Grey theory based odometer scale factor calibration method for integrated navigation system. *In 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, volume 3, pages 507–510. IEEE, 2009.
- [20] Rudolph Emil KALMAN : A new approach to linear filtering and prediction problems. 1960.
- [21] Elliott D KAPLAN et Christopher J HEGARTY : Understanding gps, principles and applications. boston : Artech house, 1996.
- [22] Oussama KHATIB : Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *In Autonomous robot vehicles*, pages 396–404. Springer, 1986.
- [23] Guanghui LI, Yusuke TAMURA, Atsushi YAMASHITA et Hajime ASAMA : Effective improved artificial potential field-based regression search method for autonomous mobile robot path planning. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 3(3):141–170, 2013.
- [24] Claus B MADSEN et Claus S ANDERSEN : Optimal landmark selection for triangulation of robot position. *Robotics and Autonomous Systems*, 23(4):277–292, 1998.

- [25] Niklas MAGNUSSON et Tobias ODENMAN : Improving absolute position estimates of an automotive vehicle using gps in sensor fusion. 2012.
- [26] Harvey B MITCHELL : *Multi-sensor data fusion : an introduction*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [27] Pawit PHARPATARA : *Trajectory planning for aerial vehicles with constraints*. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay ; Université d'Evry-Val-d'Essonne, 2015.
- [28] Nathan RATLIFF, Matt ZUCKER, J Andrew BAGNELL et Siddhartha SRINIVASA : Chomp : Gradient optimization techniques for efficient motion planning. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 489–494. IEEE, 2009.
- [29] Isaac SKOG et Peter HANDEL : In-car positioning and navigation technologies—a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(1):4–21, 2009.
- [30] Mathieu ST-PIERRE : *Étude et amélioration d'un module de positionnement d'un système d'information intégrée pour la navigation routière*. Thèse de doctorat, éditeur non identifié, 2004.
- [31] Nobuhiro USHIMI, Motoji YAMAMOTO et Akira MOHRI : Two wheels caster type odometer for omni-directional vehicles. In *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)*, volume 1, pages 497–502. IEEE, 2003.
- [32] Teresa VIDAL-CALLEJA, Andrew J DAVISON, Juan ANDRADE-CETTO et David William MURRAY : Active control for single camera slam. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pages 1930–1936. IEEE, 2006.
- [33] Greg WELCH et Gary BISHOP : An introduction to the kalman filter, unc-chapel hill. Rapport technique, TR 95-041, 2006.
- [34] Oliver J WOODMAN : An introduction to inertial navigation. Rapport technique, University of Cambridge, Computer Laboratory, 2007.
- [35] Libin ZHU et Wei WANG : Cdgps-based calibration of odometer's scale factor with temperature for vehicle navigation system. In *2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing*, volume 1, pages 317–320. IEEE, 2010.