

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus

Mémoire de :

Master en automatique

Intitulé

**Comparaison entre deux approches pour la résolution du
problème du SLAM 2D**

Réalisé par

BENYOUCEF Rayane

Sous la direction de **Mr.M .CHAKIR**

Soutenu publiquement le 26 juin 2016

Membres du Jury

Président :	Pr. Boukhetala (ENP)
Encadreurs :	Dr. Chakir (ENP)
Examineur :	Dr. Stihi (ENP)

ENP 2016

REMERCIEMENTS

Louange à notre seigneur 'ALLAH' qui m'a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre créateur qui m'a incité à acquérir le savoir. C'est à lui que m'adresse toute ma gratitude en premier lieu.

Je voudrais remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, ce memoire ne serait pas aussi riche et n'aurait pu voir le jour sans l'aide de mon encadreur Mr. M.Chakir,

je n'oublie pas d'adresser ma gratitude à tous mes amies et collègues pour leurs soutiens et encouragements.



Dédicace

Après avoir rendu grâce à DIEU LE TOUT PUISSANT,

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents ;

Mes frères;

Ainsi qu'à tous mes chers amis.

BENYOUCEF Rayane



الملخص:

موضوع التنقل المستقل هو واحد من المجالات البحثية الرئيسية في مجال السيارات الذكية والروبوتات المتحركة. في هذا السياق، نحن نسعى لتجهيز الروبوت بالخوارزميات والأساليب التي تمكنها من العمل في بيئة معقدة وديناميكية، بأمان وفي الحكم الذاتي الكامل.

الخوارزميات تضمن تحديد الموقع ورسم الخرائط بشكل بارز بين الخوارزميات المختلفة المستخدمة في مجال الملاحة مستقلة. في الواقع، من دون معلومات كافية عن موقف الروبوت (الموقع) وطبيعة البيئة (الخرائط)، خوارزميات أخرى (تحديد المسار، تجنب عقبة ...) لا يمكن أن تعمل بشكل صحيح.

الكلمات المفتاحية: SLAM على أساس نظرية الرسم البياني، تمديد تصفية كالمان

Abstract

The theme of autonomous navigation is one of the main research areas in the field of intelligent vehicles and mobile robots. In this context, we seek to equip the robot with algorithms and methods enabling it to operate in a complex and dynamic environment, safely and in complete autonomy.

The algorithms ensuring the localization and mapping tasks prominently among the different algorithms used in the field of autonomous navigation. Indeed, without sufficient information on the robot position (location) and the nature of its environment (mapping), other algorithms (trajectory generation, obstacle avoidance ...) cannot function properly.

Key-words: Extended Kalman Filter, Graph-Based SLAM.

Résumé

La thématique de la navigation autonome constitue l'un des principaux axes de recherche dans le domaine des véhicules intelligents et des robots mobiles. Dans ce contexte, on cherche à doter le robot d'algorithmes et de méthodes lui permettant d'évoluer dans un environnement complexe et dynamique, en toute sécurité et en parfaite autonomie.

Les algorithmes assurant les tâches de localisation et de cartographie occupent une place importante parmi les différents algorithmes utilisés dans le domaine de la navigation autonome. En effet, sans informations suffisantes sur la position du robot (localisation) et sur la nature de son environnement (cartographie), les autres algorithmes (génération de trajectoire, évitement d'obstacles ...) ne peuvent pas fonctionner correctement.

Mots clés : Filtre de Kalman Etendu, SLAM basé sur la théorie des graphes

Table des matières

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

1. INTRODUCTION.....	7
2. La problématique.....	8
3. Formulation du problème de SLAM	8
3.1 La localisation.....	10
3.2 La cartographie	11
4. Représentation 2D d'un environnement d'intérieur	12
4.1 La carte métrique	12
4.2 La carte topologique	13
4.3 Grille d'occupation	13
6. Les capteurs.....	14
6.1 Les capteurs proprioceptifs.....	14
6.1.1 Les capteurs de position ou odométrie.....	15
6.1.2 Les capteurs cinématiques	15
6.2 Les capteurs extéroceptifs	16
6.2.1 Les télémètres	16
7. Résolution du SLAM par filtre de Kalman étendu : l'EKF-SLAM.....	18
7.1 Le Filtre de Kalman	19
7.2 Le filtre de Kalman étendu : EKF	20
8. Résolution du SLAM par Graph-Based SLAM	21
8.1 Construction d'un graphe	21
8.2 Optimisation du graphe	22
9. Comparaison entre les deux approches :	22
10. Conclusion.....	23
BIBLIOGRAPHIE.....	24

Liste des figures

Figure 1: L'idée de base du SLAM	9
Figure 2: La localisation: le système cherche à estimer sa position en utilisant les informations sur l'environnement dont il dispose.....	10
Figure 3: La cartographie : Le système crée la carte de l'environnement en se basant sur sa position connue et les informations de ses capteurs.....	11
Figure 4: Exemple de carte métrique 2D (vue de haut) composée d'amers ponctuels (cercles). La trajectoire d'un véhicule au sein de cette carte est également donnée.....	12
Figure 5: Exemple de carte topologique 2D (vue de haut). (a) projection dans le plan. (b) Structure topologique uniquement	13
Figure 6: Exemple d'une grille d'occupation 2D. Les valeurs d'occupation sont codées comme suit : (Vert : inconnu ; blanc : libre ; bleu : occupé) La superficie est (10 x 10m), une cellule correspond à (5 x 5cm).....	14
Figure 7: Codeur Optique.....	15
Figure 8: Accélomètre	15
Figure 9: gyroscope	16
Figure 10: capteur infrarouge réel et son principe de fonctionnement.	17
Figure 11: principe du télémètre à ultrasons.	17
Figure 12: principe de fonctionnement du télémètre laser.	18
Figure 13: Exemple de création d'un graphe	21

1. INTRODUCTION

La thématique de la navigation autonome constitue l'un des principaux axes de recherche dans le domaine des véhicules intelligents et des robots mobiles. Dans ce contexte, on cherche à doter le robot d'algorithmes et de méthodes lui permettant d'évoluer dans un environnement complexe et dynamique, en toute sécurité et en parfaite autonomie.

Les algorithmes assurant les tâches de localisation et de cartographie occupent une place importante parmi les différents algorithmes utilisés dans le domaine de la navigation autonome. En effet, sans informations suffisantes sur la position du robot (localisation) et sur la nature de son environnement (cartographie), les autres algorithmes (génération de trajectoire, évitement d'obstacles ...) ne peuvent pas fonctionner correctement.

Une capacité essentielle pour qu'un robot mobile soit capable de comprendre son environnement est de pouvoir en construire la carte. Une carte précise et détaillée représente une source d'information indispensable pour réaliser une bonne localisation du robot. Mais pour élaborer une carte correcte, une localisation du robot dans son environnement est aussi importante.

Les deux fonctions sont liées, ont la même priorité et doivent être achevées simultanément. Ce problème est déjà connu et référencé par le terme (SLAM : Simultaneous Localization And Mapping).

Le SLAM a d'abord été formulé par Smith et Cheeseman dans les années 1980. Depuis, la littérature concernant ce sujet est devenue très abondante et de nombreux algorithmes ont été développés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le problème du SLAM de manière générale, afin de mieux situer le contexte du travail de la thèse. Nous commençons d'abord par les origines et la formulation initiale du problème, ce qui nous ramène à la description probabiliste du SLAM faite en 1986 [6]. Nous présentons ensuite le cadre mathématique de traitement du problème, avec quelques formules clés qui lui sont liées enfin On va présenter différentes les principales méthodes utilisées dans la littérature afin de résoudre le problème du SLAM. On s'intéressera surtout au filtrage de Kalman étendu, ainsi qu'à une méthode de lissage probabiliste Graph-Based SLAM. Ainsi que des représentations de la carte de l'environnement d'évolution du robot et le différent capteur utilisé. On conclura par une brève comparaison entre les approches présentées.

2. La problématique

Le problème de localisation et cartographie simultanées (SLAM) traite deux questions importantes dans la robotique mobile. La première question est : Où suis-je ? La réponse à cette question définit la localisation du robot. La deuxième question concerne les caractéristiques de l'environnement du robot : À quoi ressemble l'environnement où je me trouve ?

Dans un système de SLAM, un véhicule robotisé placé dans un environnement inconnu, dans une position inconnue, doit construire la carte de l'environnement tout en essayant de se localiser par rapport à cette carte. Le robot dispose de plusieurs capteurs qui l'aident à récupérer les informations dont il a besoin. La réalisation de cette tâche peut paraître impossible dans la mesure où le robot a besoin d'une carte pour se localiser, mais en même temps il doit connaître sa position (se localiser) pour pouvoir construire la carte. [1]

3. Formulation du problème de SLAM

Le SLAM est composé d'un ensemble de méthodes permettant à un robot de construire une carte d'un environnement et en même temps de se localiser en utilisant cette carte.

La trajectoire du véhicule et la position des amers dans la carte sont estimées au fur et à mesure, sans avoir besoin de connaissances a priori.

Considérons un robot se déplaçant dans un environnement inconnu, en observant un certain nombre d'amers grâce à un capteur embarqué sur le robot. La figure 1 montre une illustration du problème. [1]

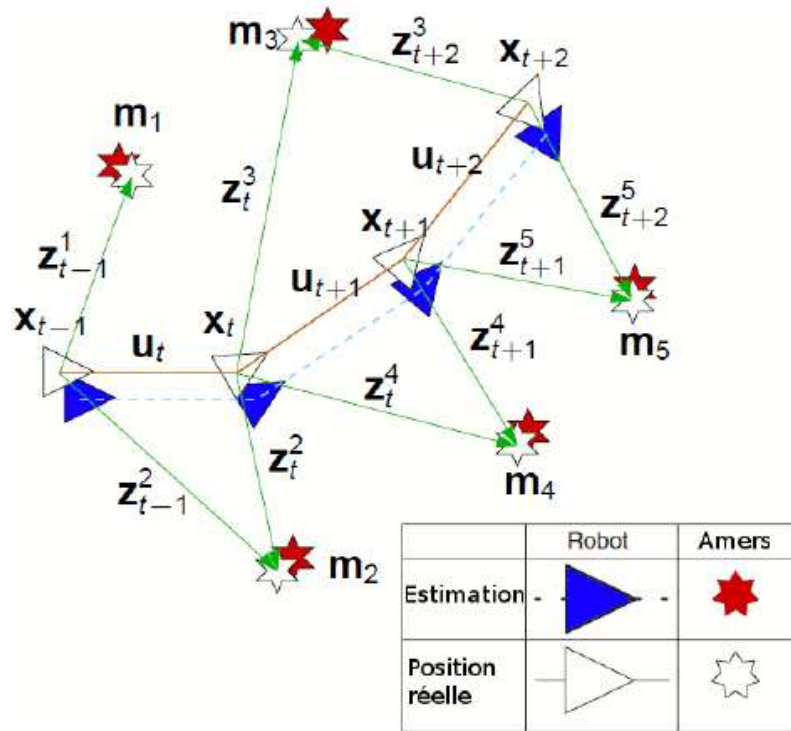


Figure 1: L'idée de base du SLAM

A l'instant k on définit les quantités suivantes :

- x_t : le vecteur d'état. Il contient la position du robot.
- u_t : le vecteur de contrôle. L'application de u_t à l'instant $t - 1$ mène le robot de l'état x_{t-1} à l'état x_t .
- m_i : vecteur contenant la position de l'amer i .
- z_t : l'observation à l'instant k .

On définit aussi les ensembles suivants :

1. $x_{0:t} = \{x_0, x_1, \dots, x_t\} = \{x_{0:t-1}, x_t\}$: l'ensemble des vecteurs d'état jusqu'à l'instant k .
2. $u_{0:t} = \{u_0, u_1, \dots, u_t\} = \{u_{0:t-1}, u_t\}$: l'ensemble des vecteurs de commande jusqu'à l'instant k .
3. $z_{0:t} = \{z_0, z_1, \dots, z_t\} = \{z_{0:t-1}, z_t\}$: l'ensemble des observations jusqu'à l'instant k .
4. $m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$: la carte de l'environnement contenant une liste d'objets statiques.

3.1 La localisation

Le problème de localisation du robot consiste à estimer sa position dans un environnement donné, en utilisant l'historique de ses observations, l'historique des commandes et la connaissance de l'environnement. La figure 2 schématise ce principe.

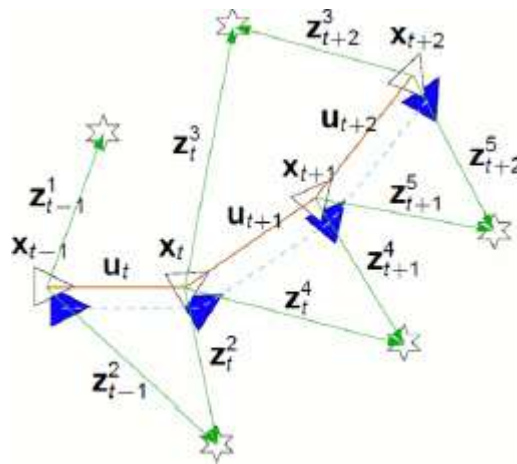


Figure 2: La localisation: le système cherche à estimer sa position en utilisant les informations sur l'environnement dont il dispose

On peut analytiquement représenter cette opération par l'estimation de la probabilité de distribution :

$$P(x_t | Z_{0:t}, U_{0:t}, m)$$

L'estimation d'une telle quantité définit la localisation globale, dans la mesure où on utilise toutes les données de l'historique des observations et des commandes pour estimer la position. On obtient ainsi une estimation robuste de la position a posteriori, mais on augmente largement la complexité des calculs.

Afin de simplifier l'algorithme, on peut définir une localisation locale, où on utilise uniquement les données de l'instant (t-1) pour estimer la position à l'instant t. On représente analytiquement cette opération par l'estimation de la distribution de probabilité :

$$P(x_t | z_{t-1}, u_{t-1}, x_{t-1}, m)$$

En utilisant cette méthode, on simplifie largement la complexité de l'algorithme, mais on risque de dévier de la position correcte du robot, sans pouvoir corriger cela. [1]

4. Représentation 2D d'un environnement d'intérieur

La cartographie en robotique mobile est un outil qui permet au robot de modéliser l'environnement dans lequel il évolue. Il y a plusieurs types de cartes établies, parmi eux nous citons les cartes métriques, topologiques et grille d'occupation. Ces cartes permettent seulement au robot de se localiser de manière globale, et de planifier la trajectoire de façon sous optimale. Les algorithmes du SLAM peuvent être classés en deux grandes catégories selon le modèle de représentation de l'environnement.

4.1 La carte métrique

Dans une carte métrique, l'environnement est représenté par un ensemble d'objets auxquels sont associées des positions dans un espace métrique, Les objets mémorisés dans la carte peuvent être très divers. Dans certaines implantations, ces objets correspondent aux obstacles que le robot pourrait rencontrer dans son environnement. La carte de l'environnement correspond alors directement à l'espace libre, c'est-à-dire à l'espace dans lequel le robot peut se déplacer. L'avantage principal des cartes métriques est de permettre de représenter l'ensemble de l'environnement, et non un petit sous-ensemble des lieux, en plus cette représentation est facilement interprétable par un humain.

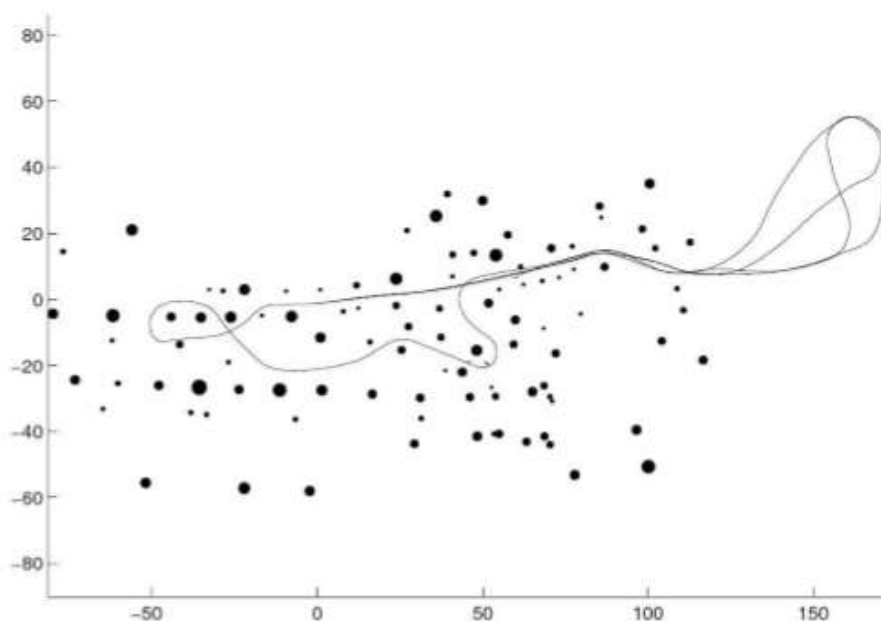


Figure 4: Exemple de carte métrique 2D (vue de haut) composée d'obstacles ponctuels (cercles). La trajectoire d'un véhicule au sein de cette carte est également donnée [3].

4.2 La carte topologique

Dans les cartes dites topologiques, l'environnement est segmenté sous la forme d'un graphe dont les nœuds correspondent à des lieux distincts, alors que les arêtes encodent les relations entre nœuds voisins. Cette représentation est notamment plus adaptée aux environnements de grande taille, et elle permet une navigation symbolique pour atteindre un lieu en particulier.

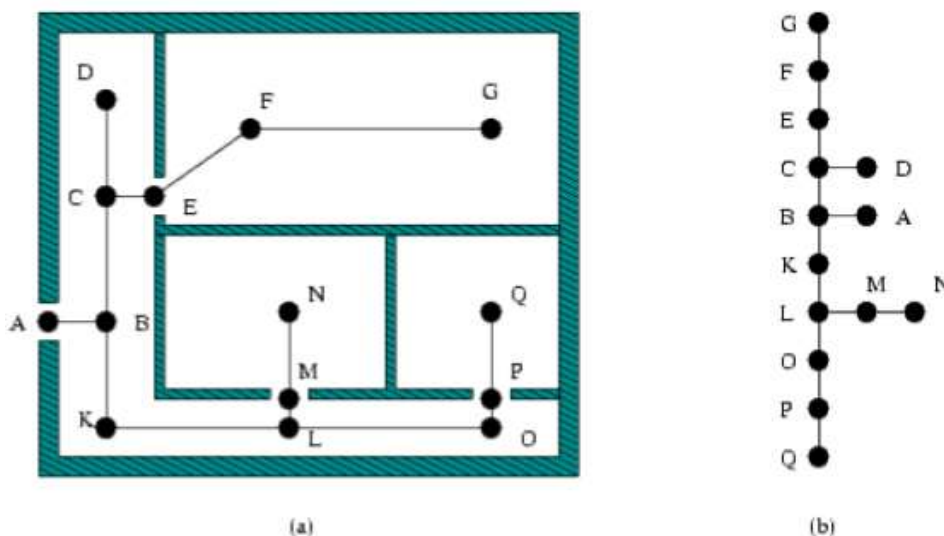


Figure 5 : Exemple de carte topologique 2D (vue de haut). (a) projection dans le plan. (b) Structure topologique uniquement[4].

4.3 Grille d'occupation

Dans la représentation de l'environnement sous forme d'une grille d'occupation, l'espace est partitionné en un ensemble de cellules distinctes. Un vecteur d'attributs (éventuellement un seul nombre ou un seul bit dans le cas de cartes binaires) est attaché à chacune des cellules pour représenter ses propriétés : souvent, il s'agit du degré d'encombrement par un obstacle (indice indiquant que la cellule correspondante est occupée ou non par un obstacle).

Les grilles d'occupation constituent une représentation surfacique simple et populaire. Dans ce type de modèle, l'espace est discrétisé selon une grille régulière en cellules carrées ou rectangulaires de même taille. Chaque cellule contient un indice (probabilité, histogramme, etc.) indiquant si l'espace correspondant est plutôt libre ou occupé. La figure 6 illustre une grille d'occupation.

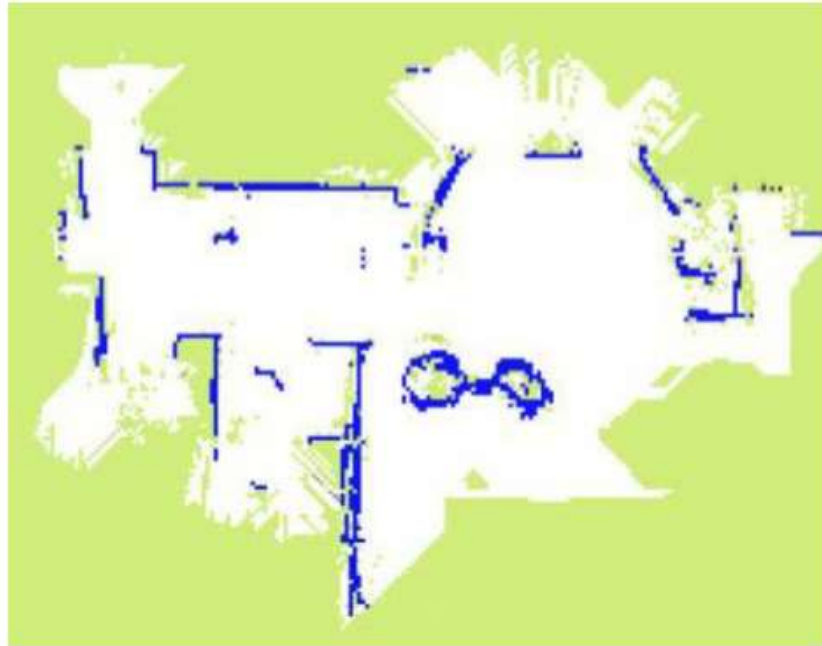


Figure 6: Exemple d'une grille d'occupation 2D. Les valeurs d'occupation sont codées comme suit : (Vert : inconnu ; blanc : libre ; bleu : occupé) La superficie est (10 x 10m), une cellule correspond à (5 x 5cm)

6. Les capteurs

Pour la perception de l'environnement, le robot a besoin de différents types de capteurs capables de le renseigner sur l'état du milieu où il opère, mais aussi sur son état, le choix de ces capteurs dépend de la tâche réalisée et le type d'environnement.

En robotique on classe généralement les capteurs en deux grandes catégories, on parle de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs.

6.1 Les capteurs proprioceptifs

Les capteurs proprioceptifs permettent des mesures de déplacements et d'attitude du robot, ils souffrent d'une dérive au cours du temps qui ne permet pas de les utiliser seuls sur une plateforme.

6.1.1 Les capteurs de position ou odométrie

Ils permettent d'estimer le déplacement du robot à partir de la rotation des roues, cette mesure est effectuée généralement par des codeurs optiques ou disques encodeurs (Figure I.11) qui pourront être directement montés sur l'axe des roues ou des moteurs afin d'en vérifier la vitesse. Le problème majeur de cette mesure est que l'estimation du déplacement fournie dépend de la qualité du contact entre la roue et le sol. Elle peut être relativement correcte pour une plateforme à deux roues motrices sur un sol plat, cependant ce type de capteurs permet une estimation de direction assez correcte.



Figure 7: Codeur Optique

6.1.2 Les capteurs cinématiques

- **Accéléromètre**

C'est des capteurs avec contact ou à effet piézoélectrique (Figure 8) servant à mesurer l'accélération d'un mouvement, on robotique mobile ils sont souvent peu exploités et restent généralement réservés au domaine aéronautique



Figure 8: Accéléromètre

- **Gyroscope**

Fixés sur une plateforme, ces capteurs (Figure 9) permettent de mesurer son orientation par rapport à un référentiel fixe et selon un ou deux axes, il existe plusieurs sortes de gyroscopes : mécanique, optique et à structure vibrante.

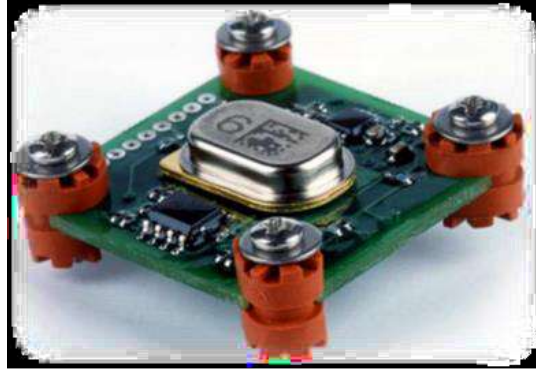


Figure 9: gyroscope

6.2 Les capteurs extéroceptifs

Il existe d'innombrables capteurs extéroceptifs utilisés dans la vie courante : température, pression atmosphérique et de fumée, mais dans le domaine de la robotique plus particulièrement en robotique mobile on utilise des capteurs de mesure de proximité et de distance vu les besoins de navigation ou de cartographie comme c'est le cas dans notre projet.

6.2.1 Les télémètres

Il existe différents types de télémètres qui permettent de mesurer la distance aux éléments de l'environnement utilisant divers principes physiques et technologiques, les plus répandus sont les suivant :

- **Télémètre infrarouge**

Ce type de capteur utilise la projection d'une lumière infrarouge, il mesure le retour ou non-retour d'une impulsion codée ce qui lui permet de déterminer la présence ou non d'un obstacle (Figure 10), il est possible aussi de réaliser une triangulation sur le faisceau de retours pour déterminer la distance de l'obstacle. Cependant, ce type de capteurs souffre d'une portée limitée et une sensibilité aux sources de lumière avec fort rayonnement infrarouge.

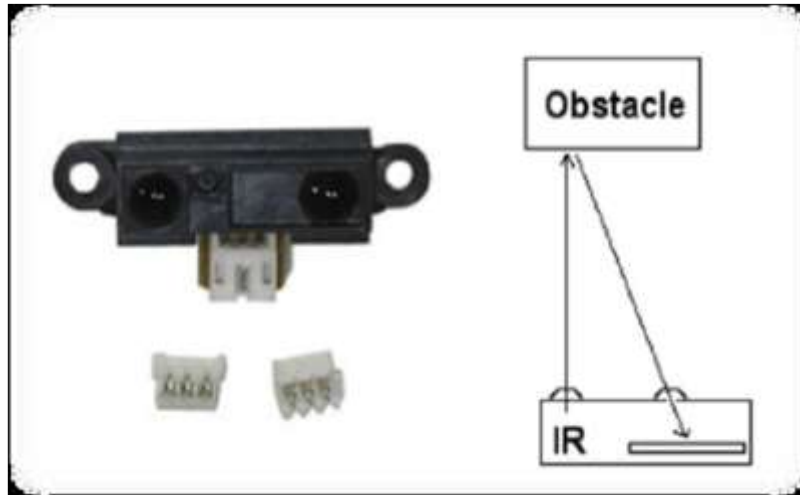


Figure 10: capteur infrarouge réel et son principe de fonctionnement.

- **Télémètre à ultrasons**

Ce capteur projette une onde sonore qui est réfléchiée par les obstacles, il calcule les distances des obstacles en mesurant le temps de vol de ces ondes (Figure 11). Ses principaux inconvénients sont :

- Il possède une zone aveugle.
- Deux capteurs ultrasons ne peuvent être utilisés simultanément.
- Onde sensible aux conditions environnementales.

D'autre part, les télémètres à ultrasons possèdent un angle d'ouverture large, cette caractéristique peut être à la fois un avantage et un inconvénient. C'est un inconvénient, car un obstacle détecté n'est pas localisé en angle à l'intérieur du champ de détection, mais aussi un avantage, car il détecte les objets en totalité

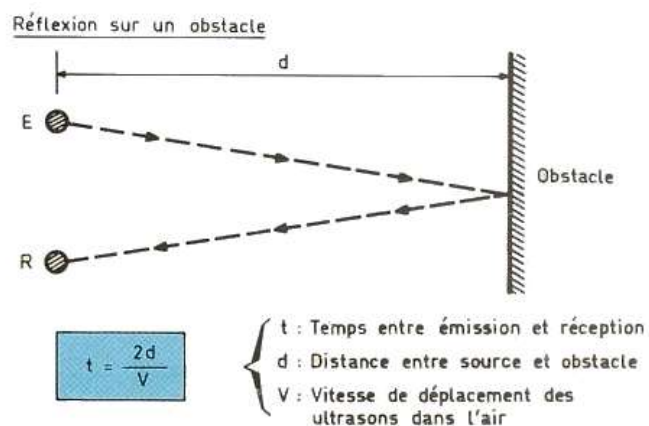


Figure 11: principe du télémètre à ultrasons.

- **Télémètre laser**

Les télémètres laser sont les capteurs les plus utilisés pour les applications de cartographie et de localisation. Il utilise un faisceau laser qui balaye un plan allant de 180 à 360 degrés selon le modèle, ce balayage est généralement parallèle au sol et qui permet de mesurer la distance des objets qui coupent ce plan(Figure 12).La méthode de mesure peut-être par calcul du temps de vol du faisceau ou bien par triangulation.

Ce type de capteurs fournit un nombre important d'informations sur l'environnement où évolue le robot, ils sont donc utilisés plus souvent en milieu intérieur, de plus ils ne peuvent pas détecter les obstacles non réfléchissant de la lumière laser comme les vitres.

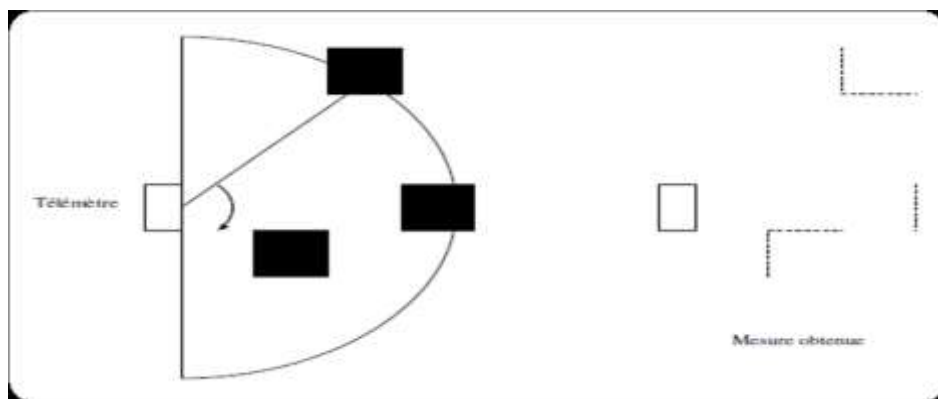


Figure 12: principe de fonctionnement du télémètre laser.

7. Résolution du SLAM par filtre de Kalman étendu : l'EKF-SLAM

On présente dans cette section l'algorithme d'estimation le plus couramment utilisé pour résoudre le problème du SLAM ([Thrun, 2002; Castellanos et al. 1999; Durrant-Whyte et al. 2001; Dissanayake et al. 2001; Newman, 2000]). Il s'agit du filtre de Kalman étendu : un algorithme dérive du filtre de Kalman. Nous rappelons dans un premier temps le filtre de KALMAN puis le principe général du filtre de KALMAN étendu ainsi que les équations. Ensuite, nous explicitons les principaux avantages et inconvénients de cet algorithme.[5]

7.1 Le Filtre de Kalman

Le Filtre de Kalman traite le problème d'estimation de l'état x d'un processus discret déterminé par l'équation suivante :

$$x_t = Ax_{t-1} + Bu_t + w_{t-1}$$

Avec des mesures z ayant un bruit gaussien v et qu'on peut exprimer ainsi :

$$z_t = Hx_t + v_t$$

Où :

_ v_t représente le bruit des mesures. $v \sim N(0;R)$

_ w_t représente le bruit du processus. $w \sim N(0;Q)$

- **Equations de prédiction et de mise à jour**

L'état du système au moment de la réception de la prochaine mesure peut être prédit :

$$x_{t+1/t} = Ax_{t/t} + Bu_t$$

La covariance de la prédiction de l'état :

$$P_{t+1/t} = AP_{t/t}A^T + Q_t$$

- **Equation de mise à jour des mesures**

L'innovation pondérée par le gain du filtre, plus l'état prédit, à partir de l'estimation de l'état mise à jour :

$$x_{t+1/t+1} = x_{t+1/t} + W_{t+1}v_{t+1}$$

La covariance de l'état mise à jour :

$$P_{t+1/t+1} = P_{t+1/t} - W_{t+1}S_{t+1}W_{t+1}^T$$

Où :

- L'innovation v est la différence entre la mesure réelle et la mesure prédite :

$$v_{t+1} = z_{t+1} - Hx_{t+1/t}$$

Le gain de Kalman W est :

$$W_{t+1} = P_{t+1/t}H_{t+1/t}^T S_{t+1}^{-1}$$

- La covariance de l'innovation S est :

$$S_{t+1} = H_{t+1/t}P_{t+1/t}H_{t+1/t}^T + R_{t+1}$$

Où R est la covariance du bruit de mesure. [1]

7.2 Le filtre de Kalman étendu : EKF

Les équations de transition et de mesure ne sont pas toujours linéaires. Le filtre EKF est une extension du filtre de Kalman permettant de traiter ces problèmes de non linéarité.

Les simplifications mathématiques introduites ont toutefois un inconvénient : les distributions de probabilités ne sont plus modélisées correctement et la linéarisation cause des inconsistances. Cependant, en pratique, les résultats sont souvent satisfaisants.

- **Equations de prédiction et de mise à jour**

$$x_{t+1/t} = f(x_{t/t}, u_t)$$
$$P_{t+1/t} = (\nabla_x f)_{t/t} P_{t/t} (\nabla_x f)_{t/t}^T + Q_t$$

Les équations de mise à jour des mesures ajoutent des informations à partir des nouvelles mesures afin de corriger les estimations faites à partir du modèle de transition. v est appelée l'innovation et correspond à l'ensemble de l'information non prédite ayant été obtenue à partir des mesures. W est le gain de Kalman, et il exprime le degré de confiance qu'on a dans les mesures.

$$v_{t+1} = z_{t+1} - h x_{t+1/t}$$
$$W_{t+1} = P_{t+1/t} (\nabla_x h)_{t+1/t}^T S_{t+1}^{-1}$$
$$S_{t+1/t} = (\nabla_x h)_{t+1/t} P_{t+1/t} (\nabla_x h)_{t+1/t}^T + R_{t+1}$$

R est la covariance du bruit de mesure. [1]

8. Résolution du SLAM par Graph-Based SLAM

Cette méthode est basée sur la théorie des graphes. Elle consiste à considérer les positions successives du robot et des différents amers comme les nœuds d'un graphe. Les arrêtes sont alors constituées des contraintes fournies par l'odométrie ou par l'observation des amers.

Pour illustrer ce propos voyons comment procède le robot pour construire la carte.

8.1 Construction d'un graphe

A l'instant de départ le robot observe le amer 1. Le graphe est donc constitué de deux nœuds, la position du robot et celle du amer, ainsi que d'une arrête : la contrainte observationnelle entre le robot et le amer 1.

A l'instant t_2 le robot a avancé d'une distance u_2 fournie par l'odométrie et observe les amers 1 et 2. Le graphe est maintenant constitué de quatre nœuds: les positions du robot a t_1 et t_2 , reliées par l'estimation de déplacement (odométrie); les positions des amers, reliées aux positions du robot par les contraintes observationnelles.

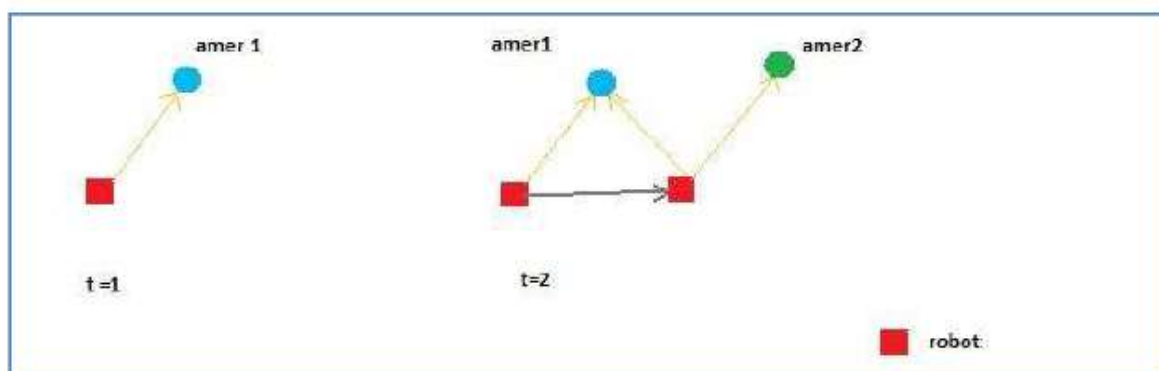


Figure 13: Exemple de création d'un graphe

8.2 Optimisation du graphe

Une fois le graphe construit on cherche à l'optimiser en minimisant l'erreur sur les contraintes du graphe. Du fait des incertitudes sur les mesures il existe en effet des erreurs dans l'estimation de position du robot et des amers.

Le « full SLAM problem » a été défini plus haut comme la probabilité d'avoir une trajectoire et un modèle de l'environnement pour un ensemble de mesures données (odométrie plus observations), ce qui s'écrit : $P(x_t, m/z_t, u_t)$

En prenant le log on obtient:

$$\text{Log } P(x_t, m/z_t, u_t) = \text{Const} + \sum P(x_t, m/z_{t-1}, u_t) + \sum P(z_t/x_t, m)$$

Chacun des éléments de cette somme correspond à un mouvement du robot et forme une arête du graphe. L'optimisation du graphe consiste donc finalement à calculer :

$$x_t^*, m^* = \arg \min_{x_t, m} P(x_t, m/z_t, u_t)$$

Ou * est le symbole pour la solution optimale.

9. Comparaison entre les deux approches :

([Mei, 2007]) :

- l'EKF-SLAM utilise une approximation linéaire. Ceci entraîne nécessairement des erreurs et peut rendre le filtre inconsistant (ce qui se traduit par une sous-estimation de l'erreur commise),
- la complexité algorithmique de l'EKF-SLAM empêche sa mise en œuvre dans le cas de grandes cartes car les opérations de stockage et de mise à jour de la matrice de variances-covariances totale (état du robot + amers) requiert une complexité en $O(M^2)$ (M désignant le nombre d'amers dans la carte).
- Le gros avantage du Graph-SLAM est qu'il permet de gérer les cartes composées d'un très grand nombre de nœuds ce qui est impossible avec les autres techniques. Cependant l'optimisation du graphe peut être très lourde.
- le fait de traiter l'intégralité de la trajectoire implique une augmentation considérable de la taille de l'état,

- l'intégralité de la trajectoire est remise à jour par l'algorithme. Ceci assure une bonne cohérence de l'ensemble de la trajectoire et évite les sauts souvent constatés dans le cas de l'EKF

10. Conclusion

On conclut que L'EKF-SLAM permet de maintenir la corrélation totale entre les amers grâce à la matrice de variances-covariances. En revanche, sa complexité algorithmique est importante et il a été montré que cet algorithme est largement inconsistant.

Enfin, l'algorithme de Graph-Based SLAM nous paraît le plus adapté. En effet, le fait d'utiliser l'intégralité de la trajectoire dans l'état nous permet dans un premier temps de corriger une éventuelle mauvaise estimation concernant l'état du robot (ce qui est quasiment impossible avec l'EKF-SLAM).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Oussama El Hamzaoui. Localisation et cartographie simultanées pour un robot mobile équipé d'un laser à balayage : CoreSLAM. Other. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012. French. <NNT : 2012ENMP0103>. <pastel-00935600>
- [2] Romain Drouilly. SLAM Visuel 3D pour robot mobile autonome. **Master de Sciences** Mention « Imagerie, Robotique et Ingénierie pour le Vivant ». Université de Strasbourg. Septembre 2011.
- [3] N. Tomatis, I. Nourbakhsh, and R. Siegwart. Hybrid simultaneous localization and map building: a natural integration of topological and metric. *Robotics and Autonomous Systems*, 44 :3–14, 2003.
- [4] D. Dufourd. Des cartes combinatoires pour la construction automatique de modèles d'environnement par un robot mobile. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [5] Cyril JOLY. Contributions aux méthodes de localisation et cartographie Simultanées par vision omnidirectionnelle. Spécialité « Informatique temps-réel, robotique et automatique ». L'École nationale supérieure des mines de Paris juin 2010