

Exploiter les caractéristiques d'un radar panoramique hyperfréquence pour cartographier et se localiser à la volée

Damien Vivet¹

1 : Lasmea-UMR-CNRS 6602, Campus des Cézeaux, 24 Avenue des Landais, 63177 Aubière Cedex - France.

Contact : prenom.nom@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé

Cet article concerne la cartographie d'un environnement d'extérieur à partir d'un robot mobile muni de capteurs. Le robot cherche en simultané à se localiser dans le milieu qu'il explore. Le monde visité est initialement considéré comme statique mais le challenge à relever est d'être en mesure de cartographier et de se localiser tout en identifiant et en suivant d'éventuelles entités mobiles. La particularité ici est que le capteur employé est un radar hyperfréquence pouvant effectuer des acquisitions sur 360°. Il utilise le principe de modulation de fréquence. L'intérêt d'un tel capteur est sa grande robustesse aux conditions environnementales ainsi que sa longue portée qui permettent de viser des applications robotiques en milieu étendu à haute vitesse. De plus, la prochaine version du radar, baptisé IMPALA, sera capable de fournir nativement des informations sur la vitesse des objets dans l'environnement du robot. Parmi les nombreuses difficultés liées à cette problématique, les distorsions géométriques des relevés introduites par les déplacements du robot sont un phénomène souvent négligé. Plus la vitesse d'acquisition du capteur en question est faible relativement au mouvement du porteur, plus la distorsion est grande et doit donc être prise en compte. Aussi, à l'opposé d'autres approches qui ne traitent les informations qu'une fois un relevé sur 360° acquis, les données radar sont exploitées en continu et sont interprétées à la volée. L'objectif est de réduire les effets de distorsion dus aux mouvements du capteur. La technique de localisation et de cartographie à la volée proposée exploite les propriétés du filtre de Kalman étendu.

Abstract

This paper is concerned with the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) problem in large outdoor environment. This is the first necessary step to tackle the Simultaneous Localization and Mapping problem with Mobile Object Tracking (SLAMMOT). The sensor used for this study is a 360° field of view radar scanner based on the Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Technology. The main advantage of this sensor is its high robustness to environmental conditions and its long-range so it could permit high speed SLAM applications. One of the obstacles to SLAM at high-speed is that data becomes locally distorted during the acquisition. The slower the sensor is, compared to the robot motion, the most the distortion has to be consider. This is the reason why we are interested in collecting data continuously but also in interpreting data on-the fly. We propose a continuous radar acquisition method with on the fly data interpretation in order to reduce distortion effect due to the motion of the sensor. This on-the fly SLAM method is based on the well-known extended Kalman filter.

Mots-clés : Cartographie, Localisation, Radar, Distorsion.

Keywords: Mapping, Localization, Radar, Distortion.

1. Introduction

Afin de rendre possible la navigation autonome de véhicules dans des environnements extérieurs étendus, il faut disposer de capteurs capables de fonctionner sous toutes les conditions clima-

tiques, en présence de brouillard ou dans des situations de faible éclairage. Par ailleurs, pour être pleinement autonome, le robot mobile doit être en mesure à la fois de cartographier et de se localiser dans l'environnement qu'il explore. Le monde visité est souvent supposé constitué d'éléments purement statiques. Le défi scientifique à relever dans le domaine de la cartographie et la localisation simultanées, thème identifié sous l'acronyme anglais SLAM pour Simultaneous Localization And Mapping, est de réaliser cette tâche tout en identifiant et en suivant d'éventuelles entités mobiles. On parle alors de SLAMMOT pour Simultaneous Localization and Mapping with Mobile Object Tracking.

Une des particularités de ces travaux est l'utilisation d'un capteur radar panoramique (cf. fig. 1). Ce capteur fournit des informations sur la puissance du signal radar réfléchi par les cibles grâce à une antenne effectuant une rotation de 360° par seconde avec une résolution angulaire de 1° permettant la détection de cible dans la plage de distance 3 à 100 mètres. Cette longue portée ainsi que la grande robustesse des ondes radar aux conditions atmosphériques en font un capteur particulièrement bien adapté pour une application de SLAM en environnement extérieur étendu. De plus, la prochaine version du radar, baptisé IMPALA, sera capable de fournir nativement des informations sur la vitesse des objets dans l'environnement du robot grâce à l'étude de l'effet Doppler.

L'utilisation d'un tel capteur pose cependant quelques difficultés. En effet, le radar est un capteur lent qui effectue une acquisition de panoramique par seconde. Durant cette acquisition, le véhicule se déplace et ce mouvement introduit des effets de distorsion qui altèrent la répartition spatiale des mesures. Ce phénomène est souvent négligé lorsqu'on utilise un capteur plus rapide tel qu'un télémètre laser à nappes. Il doit être pris en compte avec des capteurs plus lents comme les imageurs laser 3D ou lorsque la vitesse de déplacement des véhicules augmente.

Des études antérieures ont été menées pour corriger globalement les mesures afin qu'elles soient utilisables une fois le panoramique réalisé. L'approche présentée ici consiste, non pas à attendre la constitution d'un panoramique corrigé, mais à traiter continûment les rayons radar pour les interpréter à la volée, sans attendre la révolution de l'antenne radar. L'objectif est de réduire les effets de distorsion dus aux mouvements du capteur. Les résultats d'une localisation et cartographie simultanées fondée sur le principe d'interprétation à la volée sont présentés ici. Ils constituent les premiers pas vers le SLAMMOT à base de relevés radar. Cette tâche difficile est l'étape nécessaire pour explorer des environnements inconnus en s'affranchissant de systèmes de localisation coûteux.

La section 2 présente un tour d'horizon des recherches dans le domaine du SLAM/SLAMMOT. Il permettra de positionner les travaux par rapport à l'existant. Dans la section 3, le capteur radar, développé par une équipe de recherche du Cemagref, est introduit. Les données radar sont brièvement présentées. La section 4 détaille le principe d'acquisition et d'interprétation à la volée des données radar. La section 5 est illustrée par les premiers résultats expérimentaux obtenus. Les conclusions et les perspectives du projet sont décrites section 6.

2. Travaux antérieurs

2.1. Dans le domaine du SLAM/SLAMMOT

Le problème de la localisation et cartographie simultanées (SLAM) a été grandement étudié ces dix dernières années. Pour un large survol des différentes approches développées dans ce domaine, le lecteur pourra consulter [1] [8] [9] [22]. Les travaux en localisation et cartographie en environnement extérieur étendu dépendent directement de l'efficacité et de la robustesse du capteur employé, et plus particulièrement de sa portée et de sa résistance aux variations des conditions environnementales (climat, brouillard, luminosité, etc.). La plupart des approches de cartographie génèrent un modèle de carte 2D à partir des données de distance issues des capteurs. Les lasers et les caméras sont des capteurs très utilisés pour de telles applications. Ils sont bien adaptés pour des environnements d'intérieur mais leur forte sensibilité aux conditions atmosphériques, entre autres, poussent le développement d'applications à base de capteurs actifs comme les radars ou les sonars. Les radars hyperfréquences fournissent une solution alternative pour le fonctionnement en extérieur grâce à leur grande robustesse et leur détection longue portée. La plupart des méthodes SLAM existantes font l'hypothèse d'un environnement statique. Si une entité mobile



FIGURE 1 – Le radar K2Pi.

est présente, et si une mauvaise association de données est faite entre cet objet et un amer de la carte, une grande partie des algorithmes fourniront des résultats erronés conduisant à une carte faussée. Une solution à ce problème est d'isoler les entités mobiles et les entités statiques. Cette distinction peut être notamment accomplie par le radar en mesurant la fréquence Doppler introduite par les cibles et ainsi alimenter le processus de cartographie et de localisation d'un côté et celui de suivi des objets mobiles de l'autre.

Pour gérer le problème des entités mobiles, Hahnel [10] filtre les objets mobiles et crée une carte par soustraction d'acquisitions laser successives pour faire disparaître tous les objets fixes. Pour cette méthode d'extraction des entités mobiles, l'hypothèse forte sous-jacente est que les objets mobiles sont toujours en mouvement. Wang [22] met à jour une grille d'occupation et détecte les objets mobiles qui entrent dans une région précédemment détectée comme libre.

Afin d'effectuer du SLAM ou SLAMMOT en extérieur, les capteurs laser sont très largement utilisés [10] [22] [17] [11] [2]. Les travaux de recherche s'appuyant sur ce type de capteur ne devraient pas cesser compte tenu du succès de l'imageur laser 3D « Velodyne HDL-64 3D LIDAR » [14]. Pour fournir la localisation et la carte, les données de distance fournies par ces capteurs sont traitées pour en extraire des amers géométriques ou pour en déduire des transformations rigides entre des relevés successifs.

2.2. Dans le domaine de la cartographie radar

Moins de recherches s'appuyant sur des capteurs comme le sonar sous-marin [18] ou le radar à modulation de fréquence existent. Le radar fut pourtant utilisé avec succès dans le domaine de la navigation autonome en milieu extérieur [3] [5]. Il a notamment été utilisé par Clark dans [7] à la fin du siècle dernier dans un environnement contenant un certain nombre de balises isolées hautement réfléchissantes. Poursuivis par Dissanayake [8], ces travaux permirent d'aboutir à une solution bien formalisée du problème du SLAM. Dans [16], Mullane présente une méthode pour construire une carte de type grille d'occupation. Dans [6], une approche SLAM orientée trajectoire est présentée. La mise en correspondance successive de panoramiques radar complets par transformée de Fourier-Mellin permet d'obtenir une localisation du véhicule. Durrant-Whyte [4] a mis au point un système de navigation de véhicules autonomes dans des zones portuaires en utilisant des capteurs radars fonctionnant, une nouvelle fois, avec des balises réfléchissantes disposées à des endroits fixes connus. Chandran [12] propose d'améliorer la cartographie en corrigeant les positions d'acquisitions successives par maximisation d'un critère de qualité de la carte afin de réduire les distorsions.

3. Radar Panoramique Hyperfréquence

Le Cemagref est un organisme partenaire de ce projet scientifique. L'une de ses équipes développe la technologie radar depuis le début des années 80. Il a mis au point divers capteurs destinés à la localisation des engins agricoles [15] ou à la qualification de l'état de surface du sol [19, 20]. Le radar panoramique présenté sur la fig. 1, nommé K2Pi, est une réalisation de cet institut. Ce capteur est muni d'une antenne tournante qui explore l'espace sur 360° en une seconde. Le radar présente des avantages essentiels pour un fonctionnement en milieu extérieur, à savoir une insensibilité presque totale aux conditions atmosphériques telles que la pluie, le brouillard, ou les conditions de visibilité. Il génère une image télémétrique des obstacles présents dans l'environnement, à raison d'une acquisition par degré, avec une portée maximale fixée aujourd'hui à 100 m. Pour des mesures radar de faible portée (c-à-d quelques centaines de mètres) la technologie

TABLE 1 – Caractéristiques du radar FMCW K2Pi.

Fréquence porteuse F0	24 GHz
Puissance émetteur Pt	20 dBm
Gain d'antenne G	20 dB
Résolution angulaire	1°
Portée Min/Max	3/100 m
Précision en distance (cible témoin à 100 m)	0.02 m
Résolution en distance	1m
Taille (longueur-largeur-hauteur)	27-24-30 cm
Poids	10 kg

classique de radar pulsé n'est pas la solution la plus adaptée car elle nécessiterait, pour avoir une bonne précision, une électronique très rapide et coûteuse. La technique adoptée est donc celle de modulation de fréquence en onde continue qui permet une très faible puissance d'émission ce qui rend le radar sans danger pour les utilisateurs et l'environnement. Les caractéristiques du radar sont présentées dans la Table 1.

Le principe de modulation de fréquence en onde continue est connu et utilisé depuis plusieurs dizaines d'années. Lorsque la portée du radar est de quelques centaines de mètres, la modulation de fréquence présente l'avantage de ne nécessiter qu'une faible puissance d'émission et de transposer les variables temporelles dans le domaine des fréquences plus facilement mesurable. Le principe de ces types de radars consiste à mixer, d'un côté le signal émis et modulé suivant une rampe, et de l'autre, le signal reçu après réflexion sur l'objet donc retardé. La portée de chaque cible peut être déterminée en mesurant l'écart de fréquence.

4. Formulation du problème

Collecter des données intègres depuis un véhicule en mouvement est souvent difficile lorsque le temps d'acquisition n'est pas négligeable comparé au déplacement de la plate-forme. Dans les applications de cartographie, un des challenges à relever lorsque le déplacement d'un capteur est rapide relativement à son temps d'acquisition est le fait que les mesures présentent des distorsions et sont, de ce fait, difficiles à associer. Ce problème n'apparaît pas seulement avec des capteurs comme le radar mais également avec des capteurs de type laser. Les vitesses de déplacement des systèmes robotiques en sont ainsi limités. En effet, à vitesse réduite, la distorsion de ce genre de capteur est souvent négligée mais ne peut plus l'être à grande vitesse. En conséquence, l'approche « stop and scan » est souvent utilisée (par exemple [21] en laser 3D). Elle consiste à stopper la plate-forme pour effectuer des acquisitions. Or ce type de comportement n'est pas souhaité. Dernièrement, Bosse [13] a proposé un système de correction d'acquisition afin de corriger l'effet de distorsion lors d'une mesure 3D laser et ainsi reformer une acquisition non déformée. Le présent article prolonge cette approche en recherchant non pas une correction de l'acquisition des données radar, mais une interprétation de celles-ci à la volée pour s'affranchir des effets de distorsion.

4.1. Approche EKF-SLAM basée amers

Le problème de SLAM peut être décrit sous la forme d'un réseau bayésien. La pose du robot \mathbf{X}_k évolue selon un modèle probabiliste $p(\mathbf{X}_{k+1}|\mathbf{X}_k, \mathbf{u}_{k+1})$ faisant référence au modèle d'évolution où \mathbf{u}_{k+1} est une commande bruitée au temps $k + 1$.

Les données extéroceptives fournies par le radar permettent au robot de déterminer la distance et l'orientation des amers observés dans son propre repère. Soit I_r représentant cette information. Les amers extraits de chaque faisceau radar sont des mesures bruitées modélisées par $p(I_r|\mathbf{X}_{v_k}, \mathbf{X}_{m_k})$. La formulation du problème de SLAM cherche à estimer la pose du véhicule et la carte que l'on exprime sous la forme vectorielle : $\mathbf{X}_k = [\mathbf{X}_{v_k}^T, \mathbf{X}_{m_k}^T]^T$, où $\mathbf{X}_{v_k}^T = [x_k, y_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \psi_k]$ est le vecteur d'état décrivant la pose, la vitesse et l'orientation du véhicule au temps courant. $\mathbf{X}_{m_k}^T$ est le vecteur

d'état de la carte défini par $\mathbf{X}_{m_k}^T = [\mathbf{X}_{L1_k}, \mathbf{X}_{L2_k}, \dots, \mathbf{X}_{Ln_k}]$. Chaque \mathbf{X}_{Li_k} représente la pose et les caractéristiques d'un amer, Li au temps k dans le repère global. Il est initialement supposé que le monde peut être raisonnablement représenté comme un ensemble de primitives géométriques discrètes.

L'estimateur utilisé ici est le filtre de Kalman étendu (ou EKF pour Extended Kalman Filter). A partir du vecteur d'état $\mathbf{X}_{k|k}$ et de sa covariance $\mathbf{P}_{k|k}$, les nouvelles estimées $\mathbf{X}_{k+1|k}$ et $\mathbf{P}_{k+1|k}$ sont calculées classiquement comme suit : $\mathbf{X}_{k+1|k} = f(\mathbf{X}_{k|k}, \mathbf{u}_{k+1})$ et $\mathbf{P}_{k+1|k} = \nabla f \mathbf{P}_{k|k} \nabla f^T + \mathbf{Q}_k$ où ∇f est la Jacobienne de f et \mathbf{Q}_k le bruit de process.

4.2. Acquisition continue des données radar

Chaque faisceau radar émis dans une direction est représenté sous forme de spectre de puissance qui porte des informations sur l'environnement dans la direction d'émission de l'onde. L'interprétation de ces spectres de puissance permet d'extraire des pics significatifs et donc d'isoler des impacts radar. Le traitement des données radar n'étant pas le sujet de cette proposition, il ne sera pas détaillé.

La mesure extraite, notée \mathbf{I}_r , est une fonction de l'état du véhicule \mathbf{X}_{v_k} , de la pose de l'amer \mathbf{X}_{Li} mais également de la mesure de l'effet Doppler due au déplacement propre du radar lors de l'acquisition (rotation et translation). Le modèle d'observation donné par $\mathbf{I}_r = g(\mathbf{X}_{v_k}^T, \mathbf{X}_{Li}^T, \mu_r)$ est défini comme suit :

$$\mathbf{I}_r = \frac{d}{\alpha} + \frac{2V \cos(\theta)}{\lambda} + \mu_r \quad (1)$$

où $d = \sqrt{(x_k - x_{Li})^2 + (y_k - y_{Li})^2}$ est la distance de l'amer au véhicule, $V = \sqrt{\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2} \cos(\psi_k)$ est la vitesse du véhicule, θ est la valeur angulaire du codeur de l'antenne radar, λ la longueur d'onde du radar, α un facteur d'échelle constant et μ_r un bruit de mesure.

Il est bien évident que chaque mesure est fonction de la position à laquelle celle-ci a été réalisée. Le déplacement du radar lors de l'acquisition d'un panoramique est donc un paramètre important. En effet, l'antenne radar effectue une rotation par seconde ce qui est relativement lent. Par exemple, à une vitesse de déplacement de 5 m.s^{-1} , on observerait une distorsion de 5 m entre le début et la fin d'acquisition des panoramiques radar. Le déplacement du porteur radar n'est donc pas négligeable entre deux faisceaux successifs (plus d'un centimètre de distorsion par faisceau).

4.3. Interprétation à la volée des données radar

Une estimation du déplacement est donc requise pour effectuer un recalage des points précédemment observés dans le repère courant du véhicule. En se basant sur le modèle d'évolution du système et sur les données proprioceptives disponibles, il est possible d'obtenir une estimation de la position courante du véhicule et donc de ré-exprimer les observations précédentes dans le repère courant. Il n'est cependant pas viable de recalculer un panoramique entier avec cette technique à cause des dérives odométriques et des erreurs de modèle. En effet, le déplacement du véhicule serait à première vue partiellement compensé mais les données présenteraient toujours des effets de distorsions cette fois dues à l'accumulation d'erreur des modèles utilisés. Une approche pour minimiser cette accumulation d'erreur est d'interpréter, à la volée, les données recalées lorsque ces dernières apportent suffisamment d'information.

De plus, mis à part les effets de distorsion dus aux mouvements du capteur, d'autres phénomènes entrent en jeu. En effet dans une approche par capteur laser, la mise en correspondance des observations ponctuelles des impacts par méthode de « scan-matching » ou ICP (pour Iterative Closest Point) est viable. Dans le cas du radar, les phénomènes de speckle (multi réflexions et interférences) font qu'un impact observé d'une certaine position ne sera pas forcément observé à nouveau d'une autre position voisine. Ceci explique l'utilisation de balises fortement réfléchissantes dans les travaux de Durrant-Whyte et Clark [4, 7]. Afin d'éviter l'utilisation de telles balises, l'utilisation d'amers géométriques semble donc primordiale.

Dans une première approche, l'extraction à la volée de primitives géométriques de type droite a été menée. Les droites seront considérées comme des amers géométriques de base dans cette application SLAM. Lors du déplacement du robot, les observations effectuées ainsi que leurs covariances associées à l'instant $k - 1$ dans le repère R_{k-1} sont propagées vers le repère courant R_k grâce à l'estimation de déplacement du véhicule et donc à la transformation rigide estimée à l'aide

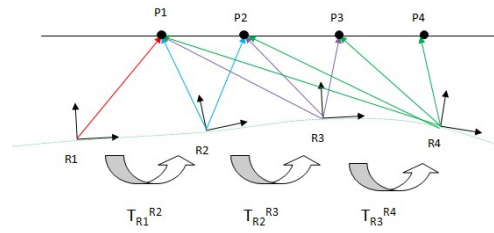


FIGURE 2 – Principe de la propagation des observations lors du mouvement du véhicule. Une fois l'estimation de déplacement du véhicule connue, il est possible d'exprimer les perceptions précédentes dans le repère véhicule courant.

du modèle d'évolution du système $T_{R_{k-1}}^{R_k}$. Ainsi par itérations successives, à un instant donné t , les observations effectuées aux instants k avec $k < t$ depuis les positions R_k sont exprimées dans le repère R_t . Ce principe est représenté fig. 2.

A ce stade, tout se passe comme si l'interprétation des données observées précédemment avait été retardée. Lorsque, depuis une position R_k , N observations sont disponibles, ces N observations sont considérées comme une mesure effectuée à l'instant k . Plutôt que de représenter cette mesure sous forme de nuage de point, une représentation sous forme d'amer géométrique simple correspondant à la meilleure droite passant par ce nuage est adoptée. Une méthode classique de moindres carrés médians est alors menée. Si aucune droite satisfaisante ne peut être trouvée, la mesure de N points n'apporte pas d'informations et est donc ignorée. Cette observation est alors classiquement intégrée dans le processus d'EKF-SLAM.

5. Résultats Expérimentaux

La complexité des signaux radar rend très difficile l'extraction d'informations précises sur l'environnement. En plus des distorsions, de nombreux effets tels que les effets Doppler, les effets de speckle ou encore les multi-échocs doivent être considérés. La première étape est de détecter et de construire itérativement des primitives géométriques. Pour cela, notre application de SLAM à la volée a été appliquée sur des données simulées. Ces données sont générées à l'aide d'un simulateur radar développé par le Cemagref. Il permet de créer des environnements statiques ou dynamiques dans lesquels les signaux radar sont modélisés précisément. C'est à dire que les données simulées prennent en compte à la fois les effets Doppler et les phénomènes d'interférence comme le speckle.

Un unique impact radar n'apporte pas suffisamment d'information pour être utilisé dans une application de SLAM à la volée. En effet, les phénomènes parasites précédemment décrits impliquent l'utilisation d'amers géométriques. Il faut donc acquérir plusieurs rayons radar avant de pouvoir interpréter les données. Chaque impact détecté lors du déplacement du véhicule est entaché d'erreur. De plus, lors de la propagation de cette mesure vers la pose courante du véhicule, l'erreur d'évolution du système doit également être prise en compte. De ces données incertaines est extrait un amer géométrique de type droite qui est lui même entaché d'erreur. La figure 3 représente une détection d'entité géométrique à partir de plusieurs impacts capteur ponctuels.

Ce principe d'interprétation à la volée a été appliqué sur des données simulées. Des amers géométriques de type droite ont été détectés et utilisés en continu lors du déplacement du véhicule. Une trajectoire d'environ 400m est effectuée à $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans un environnement simulé. Sur la fig. 4, le résultat d'une cartographie radar à la volée est présentée. Lors du déplacement du véhicule, les mesures sont propagées de façon continue dans le repère courant du véhicule. Chaque droite est initialisée à partir de $N = 12$ impacts successifs (soit un maximum de 30 droites détectées par panoramique). Cet amer géométrique de type droite est utilisé comme observation dans le processus SLAM, il est alors associé à un amer existant ou ajouté dans la carte à la volée sans attendre la fin d'acquisition du panoramique radar.

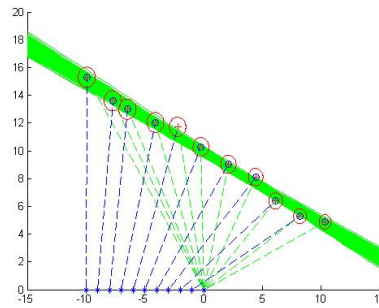


FIGURE 3 – Méthode d'extraction d'amer. Les données incertaines acquises lors du déplacement du véhicule sont propagées vers le repère courant grâce au modèle d'évolution du système. Cet ensemble d'impacts associés à leurs incertitudes est alors traité afin d'être représenté par une droite également incertaine avec son domaine d'incertitude (en vert).

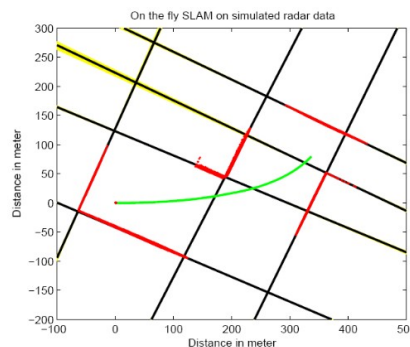


FIGURE 4 – L'environnement exploré est représenté en rouge à l'aide de l'ensemble des impacts radar détectés. La carte de primitives géométriques est présentée par des droites noires associées à leurs incertitudes respectives en jaune. La trajectoire du véhicule est représentée en vert.

6. Conclusions et Perspectives

Les premiers résultats de localisation et cartographie simultanées (SLAM) en utilisant un radar panoramique hyperfréquence ont été présentés. Du fait que les informations natives fournies par le radar sont extrêmement complexes et soumises à de nombreux phénomènes comme la distorsion, le speckle ou le Doppler, une méthode d'interprétation à la volée a été mise en place. Cette première approche s'appuie sur des primitives géométriques simples de type droites qui sont plus facilement observables sur les données radar que des amers ponctuels soumis aux phénomènes de multi-réflexion et d'interférences. Elle permet, au fur et à mesure de l'arrivée des données, d'extraire des entités géométriques où la distorsion a été localement compensée et de s'en servir comme observation dans notre processus SLAM. La prochaine étape consistera à robustifier cette approche en la généralisant pour d'autres primitives géométriques qui permettront une extraction des entités de la carte. Une fois l'extraction et la classification des entités possibles, une extension du principe SLAM basé amers pourra être effectuée en prenant en compte les informations Doppler de vitesse des objets pour viser une application de SLAMMOT [22].

Bibliographie

1. Bailey, T., Durrant-Whyte, H.F., "Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) : Part II - State of the Art". Robotics and Automation Magazine, 10 p., 2006.
2. Michael Bosse and Robert Zlot, "Map Matching and Data Association for Large-Scale Two-dimensional Laser Scan-based SLAM". In Int. J. Robotics Research; 27(6) :667-691,

- doi:10.1177/0278364908091366, 2008.
3. Dissanayake, M. W. M. G. and Newman, P. and Durrant-Whyte, Hugh F. and Clark, Steve and Csorba, M. "An Experimental and Theoretical Investigation into Simultaneous Localisation and Map Building" In The Sixth International Symposium on Experimental Robotics VI, p.265–274, 2000
 4. Durrant-Whyte, H. Pagac, D. Rogers, B. Stevens, M. Nelmes, G. "Field and service applications - An autonomous straddle carrier for movement of shipping containers - From Research to Operational Autonomous Systems". In Robotics and Automation Magazine, IEEE, Volume : 14, Issue : 3, p.14–23, Sept. 2007
 5. Durrant-Whyte, Hugh F. "An autonomous guided vehicle for cargo handling applications". In Int. J. Rob. Res., p.407–440, vol 15, number 5, 1996.
 6. P. Checchin, F. Gérossier, C. Blanc, R. Chapuis and L. Trassoudaine. "Radar Scan Matching SLAM using the Fourier-Mellin Transform". Submitted in IEEE Int. Conf. on Field and Service Robotics, Cambridge, Massachusetts, USA, July 2009.
 7. S. Clark and G. Dissanayake. "Simultaneous localization and map building using millimeter wave radar to extract natural features". In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1316–1321, Detroit, Michigan, May 1999.
 8. Dissanayake, G., Newman, P., Durrant-Whyte, H.F., Clark, S., Csobra, M., "A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem". IEEE Trans. on Robotics and Automation, 17(3), pp. 229-241, 2001.
 9. Durrant-Whyte, H.F., Bailey, T., "Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) : Part I - The Essential Algorithms". Robotics and Automation Magazine, 9 p., 2006.
 10. Hahnel, D., Burgard, W., Fox, D., Thrun, S., "An efficient FastSLAM algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements". In Proc. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2003.
 11. A. Howard, D.F. Wolf and G.S. Sukhatme. "Towards 3D Mapping in Large Urban Environments". In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 419–424, 2004.
 12. M. Chandran and P. Newman. "Motion Estimation from Map Quality with Millimeter Wave Radar". In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
 13. Bosse, M., Zlot, R. "Continuous 3D Scan-Matching with a Spinning 2D Laser" In 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12 - 17, 2009, Kobe, Japan
 14. J. Leonard, J. How, S. Teller, M. Berger, S. Campbell and G. Fiore, L. Fletcher, E. Frazzoli, A. Huang, S. Karaman and O. Koch, Y. Kuwata, D. Moore, E. Olson, S. Peters and J. Teo, R. Truax, M. Walter, D. Barrett, A. Epstein and K. Maheloni, K. Moyer, T. Jones, R. Buckley, M. Antone and R. Galejs, S. Krishnamurthy and J. Williams. "A Perception Driven Autonomous Urban Vehicle", In *Journal of Field Robotics*, Vol. 25 , Issue 10, Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part III Pages 727-774, October, 2008.
 15. Monod, M.O., "Frequency modulated radar : a new sensor for natural environment and mobile robotics". Ph.D. Thesis, Paris VI University, France, 1995.
 16. J. Mullane, E. Jose, M.D. Adams and W.S. Wijesoma, "Including Probabilistic Target Detection Attributes Into Map Representations", *Int. Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 1, pp. 72-85, 2007.
 17. Pfaff, P. and Triebel, R. and Stachniss, C. and Lamon, P. and Burgard, W. and Siegwart, R. "Towards Mapping of Cities". IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Rome, Italy, 2007.
 18. D. Ribas, P. Ridao, J.D. Tardós and, J. Neira. "Underwater SLAM in a marina environment". IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Diego, USA, October 2007.
 19. Rouveure, R., "Short range soil characterization using microwaves techniques. Application to soil roughness measurement". Ph.D. Thesis, Clermont II University, France, 2001.
 20. R. Rouveure, P. Faure, P. Checchin, M.O. "Monod. Mobile Robot Localization and Mapping in Extensive Outdoor Environment based on Radar Sensor - First Results". PSIP 2007 - Physics in Signal and Image Processing , Mulhouse, France, February 2007.
 21. A. Nüchter, K. Lingemann, J. Hertzberg, and H. Surmann. "6D SLAM with approximate data association" In *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*, 2005.
 22. Wang, C.-C., "Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking". Doctoral dissertation, tech. report CMU-RI-TR-04-23, Robotics Institute, Carnegie Mellon Univ., 2004.