
Projet IMPALA

Radar panoramique hyperfréquence pour la localisation et la cartographie simultanées en environnement extérieur

**Marie-Odile Monod¹, Roland Chapuis², Philippe Gosset³,
Raphaël Rouveure¹, Damien Vivet², Franck Gérossier²,
Patrice Faure¹, Paul Checchin², Laure Moiroux¹, Pierre Guérin³,
Thierry Humbert¹, Joël Morillon³**

1. IRSTEA-Cemagref, Unité de Recherche TSCF
24 avenue des Landais, BP 50085
F-63172 Aubière cedex
marie-odile.monod@irstea.fr
2. LASMEA - Institut Pascal, CNRS-UMR 6602
24 avenue des Landais
F-63177 Aubière
3. THALES Optronique S.A.
2 avenue Gay-Lussac, CS 90502
F-78995 Elancourt cedex

RÉSUMÉ. L'objectif du projet IMPALA est d'évaluer l'apport du radar comme solution alternative aux moyens de perception en robotique mobile d'extérieur. Cet article illustre à travers une application de localisation et de cartographie simultanées (SLAM), les potentialités d'un radar panoramique à modulation de fréquence (FMCW) qui a été développé au cours du projet. Donnant accès à l'information de distance et de vitesse des entités mobiles présentes dans l'environnement, le radar permet d'envisager des applications de détection et de suivi d'objets mobiles (DATMO) dont un premier résultat est présenté ici.

ABSTRACT. The main objective of the project IMPALA is to demonstrate that radar technology is an alternative solution to classical perception systems used in outdoor mobile robotics. This paper presents the rotating FMCW radar developed during the project and results from the combined use of radar and "Simultaneous Localization And Mapping" (SLAM) techniques in outdoor environment. Range and velocity from mobile objects can be extracted, which lead to future applications of DATMO (Detection And Tracking of Moving Objects) the first results are presented here.

MOTS-CLÉS: radar, FMCW, cartographie, localisation, SLAM, DATMO.

KEYWORDS: radar, FMCW, mapping, localization, SLAM, DATMO.

DOI:10.3166/TS.29.463-492 © 2012 Lavoisier

Extended abstract

An increased autonomy of mobile robots requires better ability to evolve in unknown environments. This problem is often referred to as Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) that combines perception of environment and movement. SLAM techniques are especially attractive because they are able to provide advanced autonomy to vehicles involved in scenarios such as natural disasters or industrial accidents. But these applications are related to the availability of efficient and robust perception sensors particularly with regard to range and resistance to outdoor operating conditions. Even though lasers and cameras are widely used sensors, their strong sensitivity to atmospheric conditions, among other reasons, points the limits of these perception systems for outdoor applications.

IMPALA project, which relates to a “Microwave panoramic radar for Simultaneous Localization And Mapping in outdoor environment” proposes an innovative approach which combines use of radar and SLAM techniques. Radar can operate both day and night, is insensitive to dust, to rain and lighting but surprisingly, it is rarely used in robotics.

Over the past decade the SLAM problem has been intensively studied in robotics because it can provide an accurate estimate of the robot pose without expensive inertial sensors or GPS and allows building a consistent map of the environment without any prior knowledge. Performance of SLAM in extended outdoor environment depends directly on the effectiveness of the sensor used, and especially of its maximal range and its robustness to environmental conditions. Most approaches generate a 2D or 3D map model from range data provided by sensors such as lasers and cameras. To achieve localization and map building, the range data are processed using geometric feature extraction and scan correlation techniques. In such applications, the researches where radar is used as an alternative to classical sensors, are little numerous.

In the first part of this article, the FMCW radar with a rotating antenna which was developed for SLAM and SLAMMOT applications is presented. The Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar, when used for short ranges, is characterized by simpler equipment than pulse radar. A triangular frequency modulation law allows the simultaneous measurement of range and velocity of the objects. The echo signal from a target is mixed with a portion of the transmitter signal, producing a beat frequency. If the target is stationary the beat frequency is a measure of the target's range. If the target is moving, the beat frequency is increased on one portion of the modulation cycle by the Doppler shift, while on the other

portion it is decreased. The spectrum of the received signal from moving targets is different on the first portion of the modulation cycle and on the second portion. A matching spectra algorithm based on fuzzy logic was developed to extract the couple “range-velocity” for each target.

The R-TROOPER robotic demonstrator from THALES, was equipped with the radar to test SLAM algorithms in diverse environments. A description of this all-terrain vehicle with all basic facilities for outdoor robotics is presented in the third section of this paper. Among the different SLAM approaches using the radar that were developed during the project, the first one, named R-SLAM, is described in section 4.1. The purpose of R-SLAM algorithm is to build a consistent map of the environment and to estimate the displacement of the vehicle within the map. In opposition to standard approaches which need to detect landmarks in the environment, the main idea here is to use the high density of radar data including clutter, thanks to a scan matching technique. The advantage of this approach is its ability to localize in poorly structured environment without any reliable landmarks. A “panoramic radar image” is built by juxtaposing spectra recorded during a 360° antenna scan. The R-SLAM process includes two steps: a 3D correlation between the current radar image and the global map in order to estimate the displacement and a merging process for integrating the current radar image into the global map. The results obtained by R-SLAM algorithm are compared with RTK-GPS positioning in a natural area consisting of grassland, shrubs and trees.

The second approach presented in section 4.2 relates to radar-only localization and mapping. No odometer, gyrometer or other proprioceptive sensor is used. The idea here is to consider the distortion introduced in data by the rotation of the antenna. Such an effect is mostly ignored or treated as a noise and then corrected, based on proprioceptive sensors or localization systems. We show that by analyzing the distortion it becomes possible to estimate the linear and angular velocity of the robot and then use it to build, without any other sensor, the trajectory of the vehicle and the radar map of environment.

Most of the existing SLAM methods assume that environment is static. The key point in dynamic environment is to isolate data from moving objects and data from static objects. The capacity of radar to directly estimate velocity by Doppler frequency measurement is highlighted in section 4.3. Once Doppler effect due to the robot motion is quantized, only the echoes with some different Doppler frequency are considered as moving objects. A DATMO (Detection And Tracking of Moving Objects) algorithm based on Doppler information was developed and tested in environment with moving objects.

1. Introduction

L'accroissement de l'autonomie des robots mobiles passe notamment par leur aptitude à appréhender leur environnement. Les techniques SLAM (*Simultaneous*

Localization and Mapping) qui associent perception et mouvement sont particulièrement intéressantes car elles sont capables d'apporter une autonomie avancée à des véhicules appelés à intervenir dans des scénarios de catastrophes naturelles ou d'accident industriel par exemple. Dans ces situations difficiles, le contexte opérationnel ou les conditions climatiques pointent les limites des systèmes de perception classiques.

Le projet IMPALA, « Radar panoramique hyperfréquence pour la localisation et la cartographie dynamiques simultanées en environnement extérieur propose » le radar comme alternative aux systèmes de perception existants. Insensible à la poussière, à la pluie, à l'éclairement, fonctionnant de nuit comme de jour, il devient un capteur particulièrement attractif dans les applications en milieu extérieur. L'utilisation combinée du radar et des techniques SLAM proposée dans ce projet, constitue une approche innovante dans le domaine de la cartographie et de la localisation simultanée, et permet d'envisager des applications SLAM-MOT (*Mobile Object Tracking*) en environnement dynamique.

Le domaine de la localisation et de la cartographie simultanées (SLAM) a été l'objet de nombreux travaux au cours de ces dix dernières années (Bailey et Durrant-Whyte, 2006 ; Durrant-Whyte et Bailey, 2006 ; Clark et Dissanayake, 1999 ; Wang, 2004). En environnement extérieur étendu, les performances dépendent directement de l'efficacité et de la robustesse du capteur employé, et plus particulièrement de sa portée et de sa robustesse vis-à-vis des conditions environnementales (pluie, brouillard, luminosité, etc.). La plupart des approches de cartographie génèrent un modèle de carte 2D ou 3D à partir des données de distance issues des capteurs. Les lasers et les caméras sont les capteurs les plus utilisés pour de telles applications (Hähnel *et al.*, 2003 ; Wang, 2004 ; Pfaff *et al.*, 2007 ; Howard *et al.*, 2004 ; Bibby et Reid, 2007). Ils sont complétés aujourd'hui avec succès par l'imageur laser 3D Velodyne HDL-64 3D LIDAR (Leonard *et al.*, 2008). 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. Ils sont bien adaptés aux environnements intérieurs mais leur forte sensibilité aux conditions atmosphériques entre autres, pousse le développement d'applications à base de capteurs comme les radars ou les sonars (Ribas *et al.*, 2007). Les radars hyperfréquences apportent en extérieur une solution alternative grâce à leur grande robustesse et à leur détection longue portée. Le radar fut d'abord utilisé dans le domaine de la navigation autonome (Clark et Dissanayake, 1999) dans un environnement contenant des balises isolées hautement réfléchissantes, puis les travaux furent poursuivis par (Dissanayake *et al.*, 2000 ; 2001). Ils permirent d'aboutir à une solution bien formalisée du problème du SLAM. Un système de navigation de véhicules autonomes dans les zones portuaires a été proposé par (Durrant-Whyte *et al.*, 2007) avec des balises réfléchissantes disposées à des endroits fixes connus. Chandran (Chandran et Newman, 2006) propose d'améliorer la cartographie en corrigeant les positions d'acquisitions successives par maximisation d'un critère de qualité de la carte. Plus récemment on citera une approche de SLAM dense radar en environnement

naturel (Rouveure *et al.*, 2006) ainsi qu'une méthode pour construire une carte de type grille d'occupation (Mullane *et al.*, 2007).

La plupart des méthodes SLAM existantes font l'hypothèse d'un environnement statique. Si une entité mobile 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 des entités statiques. Cette discrimination peut être accomplie par le radar en mesurant la fréquence Doppler introduite par les cibles permettant ainsi d'alimenter le processus de cartographie et de localisation d'un côté et celui de suivi des objets mobiles de l'autre.

La suite de cet article est organisée de la manière suivante : dans la section 2, nous présentons le capteur radar développé dans le cadre du projet. La section 3 décrit la plate-forme expérimentale sur laquelle ont été conduites les expérimentations dans des environnements et des conditions climatiques variées. La section 4 qui détaille les différentes approches SLAM et DATMO étudiées, est illustrée par les résultats expérimentaux obtenus. Les conclusions et les perspectives du projet sont présentées section 5.

2. Le radar IMPALA

2.1. Principe du radar continu à modulation de fréquence

A la différence du laser qui est le plus souvent mono-cible, le faisceau de balayage d'un radar lui permet de distinguer plusieurs obstacles situés dans le même angle de visée. La technique généralement utilisée pour des applications de courte et moyenne portée est la technique FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*) qui transpose le temps de vol radar-cible en une fréquence de battement proportionnelle à la distance correspondante.

Un radar FMCW à antenne tournante en bande X (Monod, 1995) puis un radar panoramique en bande K ont été développés par IRSTEA (Rouveure *et al.*, 2009). Utilisés pour la localisation puis pour la cartographie en environnement statique, ils ne permettent pas la mesure simultanée de la distance et de l'effet Doppler en raison de la loi de modulation utilisée (dent de scie). Les bases d'une nouvelle loi de modulation numérique à saut de fréquence (*Intertwined Linear Frequency Modulated Radar*) ont été posées dans (Monod *et al.*, 2009) qui permettent de résoudre formellement l'ambiguïté distance-vitesse dans un environnement multicible. Dans le cadre du projet IMPALA, c'est un radar utilisant une loi de modulation en « toit » qui a été développé.

La fréquence centrale d'émission étant f_0 , les deux principaux paramètres qui définissent un radar à modulation de fréquence linéaire sont l'excursion totale en fréquence ΔF et la fréquence de modulation F_m (voir figure 1).

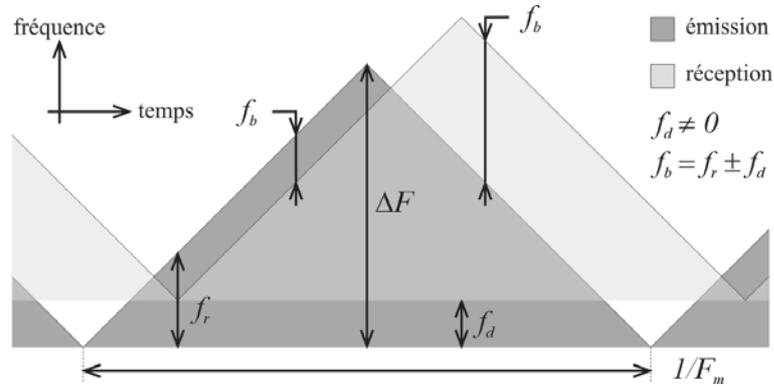


Figure 1. Principe de la modulation linéaire en toit. Illustration du signal reçu en présence d'un obstacle mobile se rapprochant du radar

La fréquence de battement est obtenue en mélangeant une partie du signal émis avec le signal rétrodiffusé, dans un composant non linéaire. En sortie du mélangeur, le signal obtenu dans un angle de visée du faisceau d'antenne est le résultat d'une contribution complexe des échos provenant des divers obstacles présents. Pour une modulation en « toit », ce signal peut s'écrire au premier ordre comme la somme de n signaux de battement provenant de n obstacles situés à différentes distances R_i et possédant chacun une vitesse radiale V_i :

$$I_b(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos \left[2\pi \left(4\Delta F F_m \frac{R_i}{c} \pm 2 \frac{V_i}{c} f_0 \right) t + 4\pi f_0 \frac{R_i}{c} \right] \quad (1)$$

où c est la vitesse de propagation dans l'air.

Une analyse fréquentielle de ce signal permet d'extraire pour chaque cible une fréquence de battement :

$$f_b = \underbrace{4 \Delta F F_m R/c}_{f_r} \pm \underbrace{2V/c}_{f_d} f_0 \quad (2)$$

Cette fréquence est la somme algébrique d'une composante f_r due à la distance R de la cible et d'une composante Doppler f_d due à sa vitesse radiale V .

La somme des fréquences de battement $f_b(up)$ et $f_b(dow)$ obtenues respectivement sur la partie montante et descendante de la loi de modulation permet de calculer la distance R de la cible, tandis que leur différence fournit sa vitesse radiale V :

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{c}{8\Delta F F_m} [f_b(up) + f_b(dow)] \\
 V &= \frac{c}{4f_0} [f_b(up) - f_b(dow)]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Le signe de la vitesse radiale dépend du sens de déplacement de la cible par rapport au radar (négatif quand la cible se rapproche, positif quand elle s'éloigne). On suppose ici que $f_r > f_d$ c'est-à-dire qu'il n'y a pas de cibles rapides à courte distance.

2.2. Résolution en distance et en vitesse

L'excursion en fréquence ΔF ainsi que la fréquence de modulation F_m sont des paramètres qui déterminent la résolution en distance et en vitesse du radar, c'est-à-dire la capacité du radar à séparer en distance deux cibles de même vitesse ou respectivement à séparer en vitesse deux cibles à la même distance. Le critère de Rayleigh fournit la résolution en distance δR et la résolution en distance δV , qui dans le cas d'une modulation en toit sont données par :

$$\begin{aligned}
 \delta R &= c/2\Delta F \\
 \delta V &= c F_m / 2f_0
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Plus ΔF est grand, meilleure est la résolution en distance. La résolution en vitesse δV ne dépend pas seulement de la fréquence de modulation F_m mais aussi de la porteuse f_0 qui a intérêt à être la plus grande possible. La valeur de ces paramètres doit néanmoins respecter les contraintes de la réglementation en bande ISM (*Industrial, Scientific and Medical*).

Les principales caractéristiques du radar IMPALA développé dans le projet sont données dans la figure 2.

2.3. Construction d'une image PPI

Un spectre sur les données radar est calculé pour chaque degré de rotation d'antenne, 360 spectres sont donc utilisés pour construire une image radar panoramique. Cette image est de type PPI (*Plan Position Indicator*) : le radar est au centre de l'image et les cibles sont repérées en coordonnées polaires. Un exemple d'image radar obtenue en un tour d'antenne dans un environnement périurbain est présenté figure 3b. On observe de fortes variations d'amplitude locale dans l'image, qui trahissent l'effet de chatoiement (*speckle*). Le speckle est un phénomène d'interférence, introduit par la sommation des N sources cohérentes présentes dans chaque cellule de résolution. Comme le radar se déplace, nous disposons de plusieurs observations d'une même scène : ces observations sont introduites dans un

processus de filtrage multivue afin de réduire l'effet du speckle. Le résultat de ce filtrage est présenté figure 3c.

Fréquence centrale	24 GHz
Puissance PIRE*	18 dBm
(*Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente)	
Vitesse rotation antenne	1tr/s
Portée	3-100m
Résolution angulaire	4°
Résolution en distance	0.75 m
Résolution en vitesse	2.25 m/s
Dimension, poids	27×24×30 cm, 10 kg



Figure 2. Tableau des caractéristiques et vue générale du radar IMPALA

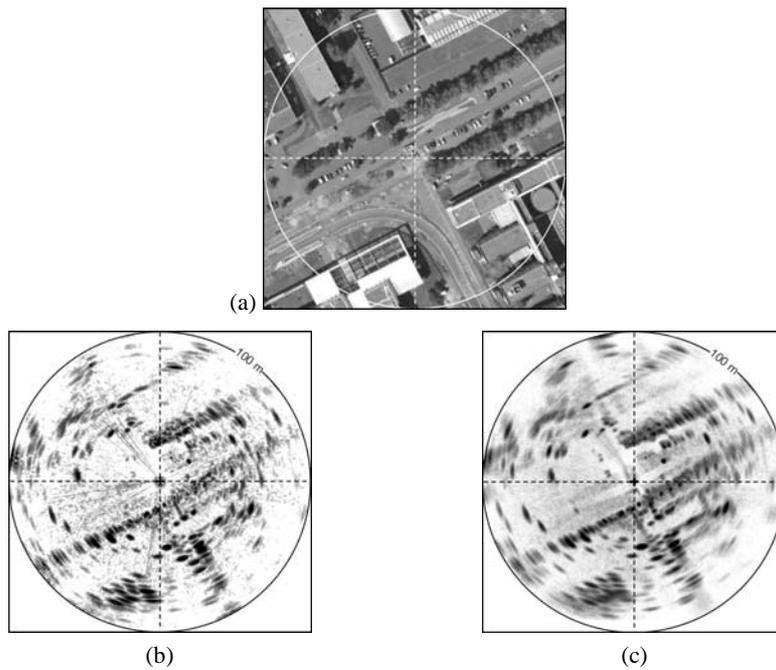


Figure 3. Exemple d'image panoramique radar. (a) Image aérienne. Le radar est positionné au centre de l'image. (b) Panoramique radar non filtré. (c) Panoramique radar avec filtrage anti-speckle

Comme ce filtrage est plus simple à réaliser en coordonnées cartésiennes, l'image est transposée du plan polaire dans un plan cartésien. L'image finale fournie par le

radar IMPALA peut alors être considérée comme une grille d'occupation (matrice de cellules). La grille d'occupation divise la zone observée en petites cellules régulières de 20×20 cm, chacune caractérisée par ses coordonnées (x, y) dans un référentiel arbitraire. Le degré d'occupation de la cellule correspond à l'amplitude du signal radar rétrodiffusé par la cible présente dans cette zone d'espace, valeur proportionnelle à la RCS (*Radar Cross Section*) de la cible.

2.4. Appariement des spectres

La méthode qui a été mise en œuvre pour calculer les vitesses radiales suppose de réaliser un appariement entre les spectres $f_b(up)$ et $f_b(dow)$. Le radar étant placé sur un véhicule en mouvement, les cibles fixes sont affectées du Doppler du véhicule. Les cibles mobiles combinent leur propre Doppler avec celui du véhicule. Ces combinaisons rendent l'appariement de spectres complexe dès lors que plusieurs cibles sont présentes dans une même direction (voir figure 4). Une association incorrecte ou incomplète des pics conduit à ne pas détecter certaines cibles présentes, voire à créer des cibles fantômes (Reiher et Yang, 2009). La modulation en toit reste cependant adaptée aux applications où le nombre de cibles mobiles dans une même ligne de visée est faible. Dans le cas contraire, une modulation numérique, telle que décrite dans (Monod *et al.*, 2009) est requise.

Le choix a été fait de réaliser l'appariement des spectres en utilisant un opérateur de logique floue, basé sur quatre critères :

- *position relative entre pics* : ce critère privilégie l'association de pics proches ;
- *amplitude relative entre pics* : ce critère privilégie l'association de pics de même amplitude ;
- *largeur relative* : on cherche à associer les pics présentant la même occupation fréquentielle ;
- *symétrie des pics* : ce critère privilégie les pics d'enveloppe gaussienne.

Ces critères sont mis en œuvre par six règles d'inférence de type « *SI condition 1 ET/OU condition 2... ALORS action* » de l'opérateur flou. Ces règles ont été définies à partir d'une connaissance experte et ajustées sur une base de données radar. Une fois les spectres appariés, il est aisé de calculer les couples distance-vitesse des obstacles présents dans la scène à l'aide de l'équation (3).

La figure 5 illustre une application de l'algorithme au calcul de la vitesse radiale du véhicule sur lequel se trouve le radar. L'image panoramique de l'environnement (statique) est représentée sur la figure 5a. Sur le panoramique de la figure 5b sont superposées les vitesses radiales (vecteurs) calculées sur les cibles sélectionnées par l'opérateur flou. Les cibles étant en majorité fixes, il s'agit ici principalement du Doppler du véhicule, qui se déplace à 5.1m/s vers le bas de l'image.

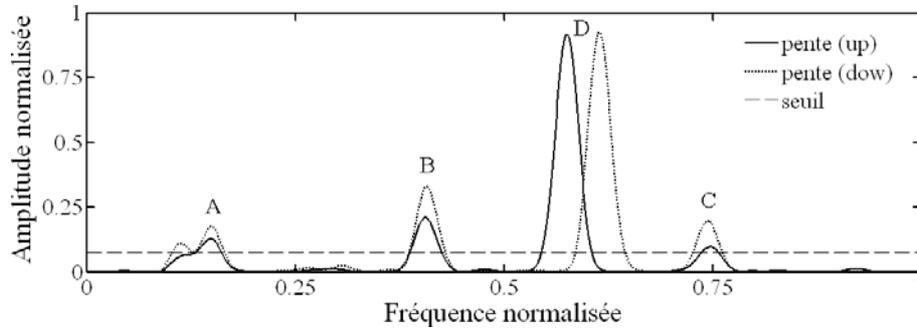


Figure 4. Exemple de spectres en puissance obtenus sur les deux pentes de la loi de modulation en toit dans le cas de cibles multiples. La vitesse radiale des cibles A, B, C est nulle, la cible D est une cible mobile qui introduit un décalage égal à $2f_d$

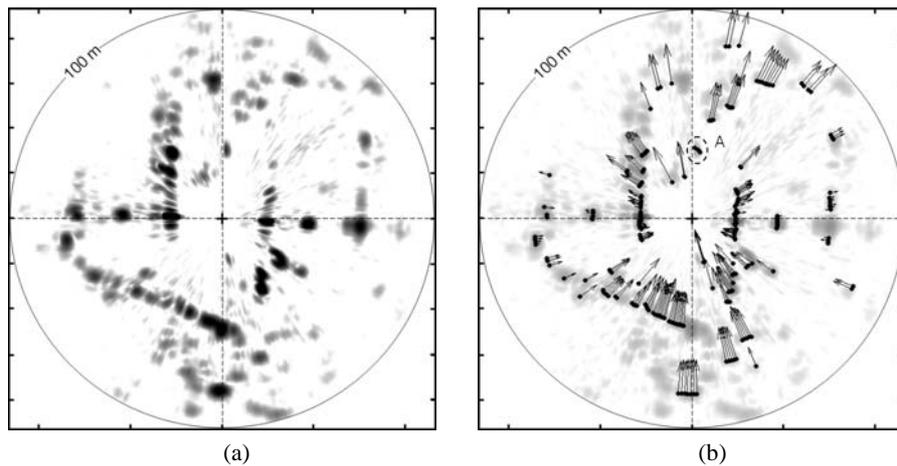


Figure 5. Estimation des vitesses radiales. (a) Image panoramique de l'environnement où se déplace le radar. (b) Les vitesses radiales des obstacles sélectionnés par l'opérateur flou sont représentées par des vecteurs. Ici le radar se déplace vers le bas de l'image à la vitesse de 5.1m/s. Le point A indique une cible mobile (voiture) qui suit le radar à la même vitesse

3. La plateforme expérimentale R-Trooper

Le démonstrateur qui a été utilisé dans le projet est le système R-TROOPER de THALES. Il s'agit d'un système robotisé lourd (600 kg) doté de capacités de mobilité intrinsèques élevées en environnement tout terrain. Ce démonstrateur est

spécifiquement conçu pour servir de support d'évaluation et d'expérimentation à la robotique autonome de cette gamme. Pour cela, le système est bâti autour d'une « structure d'accueil ouverte » destinée à l'intégration rapide et sécurisée de nouvelles fonctions et de nouveaux équipements. Il est également doté des moyens nécessaires à des évaluations quantifiées : localisation de référence par GPS RTK ; enregistrement continu de l'ensemble des paramètres de fonctionnement et des variables internes (de la donnée brute capteur aux grandeurs traitées) *via* l'emploi de l'environnement RT-Maps ; rejeu différé et hors ligne des missions exécutées, etc. La puissance de calcul actuellement disponible pour l'ensemble des traitements est équivalente à 12 processeurs Pentium 3 GHz.

Enfin, le démonstrateur est doté des équipements de base et des fonctions usuelles de la robotique d'extérieur :

- équipements : nappes laser avant et arrière, caméras latérales sur tourelles, caméras avant et arrière fixes avec zoom, odométrie, centrale inertielle (gyromètres, accéléromètres) etc. ;
- fonctions (exploitables depuis le poste de contrôle déporté) : téléopération de base, fonctions sécuritaires (anti-versement, adaptation automatique de la vitesse en virage, etc.), diverses fonctions autonomes validées (évitement d'obstacles, apprentissage et rejeu de trajectoire, suivi en convoi, etc.), arrêt d'urgence à distance et sur dysfonctionnement interne, etc.



Figure 6. Vues du démonstrateur R-Trooper de THALES au cours des expérimentations, équipé des différentes modalités capteur

La figure 7 montre une sous-partie de l'architecture dédiée au traitement de l'information des capteurs et aux fonctions robotiques exploitables.

Après des tests d'intégration préliminaires permettant de valider le couplage entre le radar, les capteurs existants et les calculateurs nécessaires au traitement, les algorithmes de SLAM ont été implémentés sous environnement RT-Maps dans l'architecture d'accueil du système robotisé. La figure 6 présente l'implantation des différentes modalités capteur sur le démonstrateur R-TROOPER.

Les expérimentations menées dans le projet regroupent une grande diversité d’environnements : des plus structurés (de type urbain, péri-urbain) aux moins structurés correspondant aux environnements ouverts de type tout chemin, tout terrain. Elles ont été conduites dans des conditions climatiques variées comme l’illustre le tableau 1 recensant les principaux essais réalisés avec le R-TROOPER.

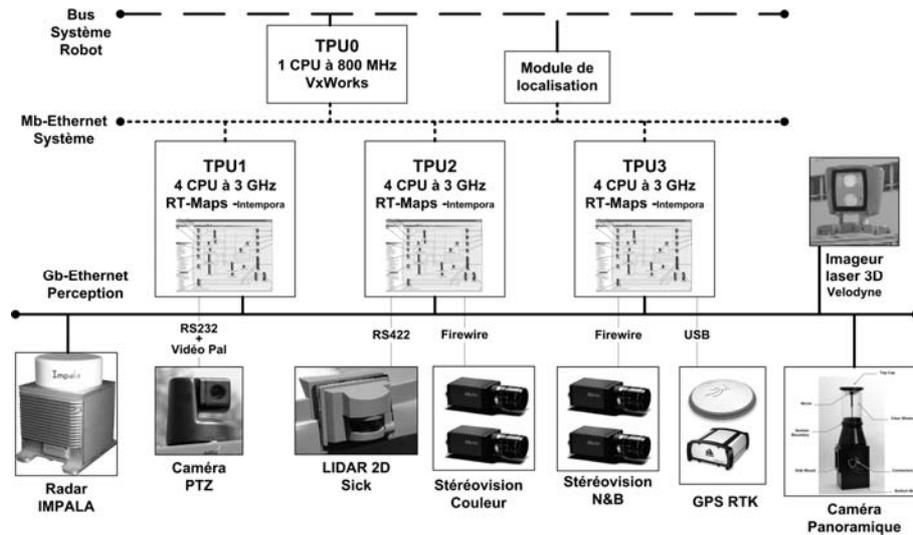


Figure 7. Sous-partie de l’architecture du R-Trooper : capteurs et comportements

Tableau 1. Listes des principales campagnes d’acquisitions du R-Trooper

Campagne	Type d’environnement	Conditions climatiques
Ferté Saint Aubin Juillet 2007	Zone ouverte, champs, forêts, et zone périurbaine	Soleil, temps sec
Mantes la Jolie Février 2009	Zone industrielle en friche Bâtiments importants	Neige, temps hivernal
Guyancourt Octobre 2010	Parking avec haie entre les rangées	Nuageux, humide
Beynes Avril 2011	Zone ouverte, champs, buissons, Quelques bâtiments métalliques	Nuageux, Humide Légères averses

4. SLAM et DATMO radar

Durant le projet, plusieurs approches SLAM utilisant le radar IMPALA ont été proposées. La première approche présentée en section 4.1 est de type « dense », la position du robot étant obtenue par appariement entre le panoramique courant et la carte globale construite (Rouveure *et al.*, 2009). La seconde approche développée dans la section 4.2 est un SLAM dit « épars » qui utilise pour se positionner une carte d'amers de l'environnement sans aucun capteur proprioceptif (Vivet *et al.*, 2009). La dernière est un SLAM orienté trajectoire nommé "Radar Scan-SLAM using FMT" qui utilise la transformée de Fourier-Mellin comme méthode de mise en correspondance de deux images panoramiques successives (Cecchin *et al.*, 2009). Nous présenterons ici les deux premières approches.

4.1. SLAM radar « dense »

Les méthodes classiques pour aborder la problématique du SLAM sont généralement construites autour d'un filtre de Kalman ou d'un filtre à particules (Durrant-Whyte et Bailey, 2006). L'objectif de ces méthodes est de calculer en ligne (i) une estimation de la position x_k du véhicule et (ii) une estimation de la carte $M_k = [m_0, \dots, m_k]$ de l'environnement, en considérant les mesures z_k observées à l'instant k . Ces méthodes impliquent de reconnaître les mêmes éléments dans l'environnement d'une observée sur l'autre : il est donc nécessaire de détecter des cibles fiables et invariantes dans le temps. Quel que soit le capteur de perception utilisé, l'un des principaux problèmes de ces approches réside dans la validation des cibles et dans l'association des données (Ho et Newman, 2007). Cela signifie qu'une difficulté majeure est (i) de confirmer qu'une cible détectée est une cible valide et (ii) d'associer cette cible détectée à une cible connue et répertoriée dans la carte. Ce problème d'association des données est fondamental dans les algorithmes SLAM. Il a été traité avec différentes méthodes, par exemple en recherchant les cibles persistantes dans l'environnement, ou bien en utilisant plusieurs capteurs dans une approche multisensorielle (Zhang *et al.*, 2004).

Mais la détection non ambiguë et l'identification de cibles à partir de données radar demeurent un problème complexe notamment en milieu extérieur. Les spectres radar contiennent en effet une quantité importante d'information, comportant des sources de « bruit » qui rendent ardue la détection et le suivi de cibles (Chen *et al.*, 2007 ; Jose et Adams, 2004). La détection de cibles dans les spectres radar est classiquement abordée avec des techniques CFAR (*Constant False Alarm Rate*), qui permettent d'estimer le niveau de bruit et d'ajuster automatiquement le seuil de détection (Rohling, 1983). Mais dans des environnements naturels faiblement structurés, le fouillis de sol (*clutter*) généralement considéré comme un bruit doit être pris en compte car il peut être la seule information disponible. Dans ces situations, une détection basée sur un critère de seuil est mise en échec. Pour cette

raison, nous avons développé un algorithme spécifique, appelé R-SLAM, qui met à profit la densité de l'information contenue dans l'image radar.

4.1.1. Principe de l'algorithme R-SLAM

Au cours de la rotation de l'antenne, le déplacement du véhicule introduit une déformation des panoramiques. Pour estimer la trajectoire du véhicule durant un tour d'antenne, on utilise un odomètre externe ainsi que le gyromètre interne du radar, associés à un modèle d'évolution du véhicule. Cette estimation permet uniquement de corriger le panoramique *courant* qui sera utilisé dans l'algorithme R-SLAM. Ce processus de correction étant réinitialisé à chaque panoramique, la dérive des capteurs proprioceptifs durant un tour d'antenne peut donc être négligée. Le principe de l'algorithme R-SLAM repose sur la similitude entre deux panoramiques corrigés successifs (voir figure 8), similitude favorisée par la vitesse relativement faible d'avancement du robot et par la portée relativement grande du radar IMPALA.

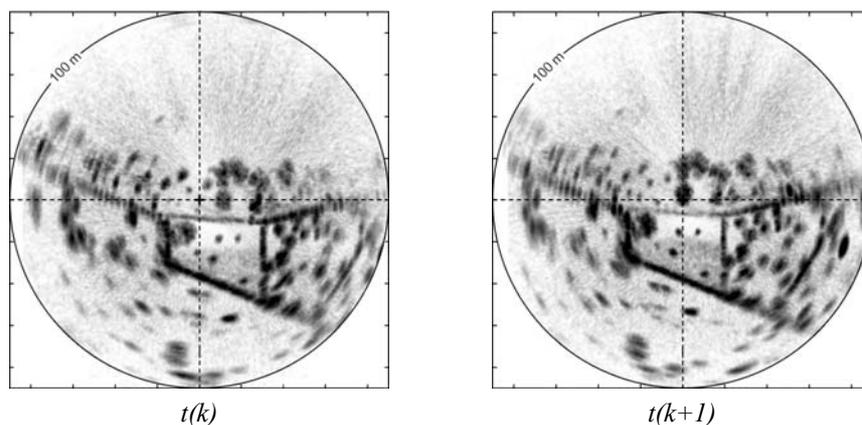


Figure 8. Exemple de la similitude entre deux panoramiques radar successifs

Nous avons donc développé une technique de type “scan matching” afin de calculer par appariement la transformation rigide (translation, rotation) qui permet d'obtenir la meilleure superposition des panoramiques radars. Cet appariement permet le calcul du déplacement du robot, déplacement utilisé ensuite pour mettre à jour la carte radar globale avec le panoramique radar courant. Le processus R-SLAM comporte deux étapes distinctes (voir figure 9) :

- une première étape de “map matching” afin de déterminer le déplacement (dx, dy) et la rotation $(d\theta)$ du véhicule. L'idée développée pour cette phase est d'utiliser la forte densité d'information contenue dans les images radar pour estimer le déplacement effectué entre deux images. Afin d'accroître la robustesse du processus vis-à-vis de la disparition ou du déplacement d'éléments dans l'environnement (masquages dus à la

présence d'obstacles de grandes dimensions, mouvements d'objets mobiles, etc.), l'appariement n'est pas réalisé entre images panoramiques radar successives, mais entre l'image panoramique radar courante et la carte radar globale. On considère en effet que la carte globale est la meilleure estimée de l'ensemble des panoramiques successifs. Différentes techniques permettent de calculer l'appariement des données radar. Nous avons choisi une corrélation 3D (deux translations, une rotation) entre la carte radar globale G et l'image panoramique courante P , technique qui offre une bonne résistance au bruit. La première opération réalisée est une rotation de la matrice P (matrice de dimension (M_p, N_p)), suivie d'une corrélation 2D avec la carte globale G (matrice de dimension (M_G, N_G)) :

$$C(i, j, k) = \sum_{m=0}^{(M_G-1)(N_G-1)} \sum_{n=0}^{(M_G-1)(N_G-1)} G(m, n) P_k^*(m+i, n+j) \quad (5)$$

avec $0 \leq i \leq M_G + M_p - 1$ et $0 \leq j \leq N_G + N_p - 1$. P_k est la matrice P après rotation. Afin de minimiser les temps de calcul, le nombre et la valeur des opérations de rotation sont définis à partir de la lecture du gyromètre. Le maximum de la matrice de corrélation C obtenue fournit le déplacement du radar, avec un écart type égal à la magnitude du pic à 3 dB ;

– une seconde étape de “map updating”. Une fois le déplacement du radar déterminé, il demeure un problème : comment intégrer l'information du panoramique courant dans la carte globale ? Ce processus doit permettre de (i) prendre en compte les informations apportées par l'image radar courante, et (ii) préserver l'information enregistrée dans la carte globale lors des itérations précédentes. Le principe retenu dans ce processus de fusion est de considérer que la probabilité pour un objet d'apparaître dans la carte globale est proportionnelle au nombre de fois où il a été observé à la même place. Si on appelle A_i l'amplitude du signal radar mesuré aux coordonnées (x, y) dans l'image panoramique i , la valeur M de la cellule correspondante dans la carte globale est calculée avec :

$$M(x, y) = 1/N \left(\sum_{i=1}^N \alpha(d_i) A_i(x, y) \right) \quad (6)$$

où N est le nombre total d'images depuis le démarrage jusqu'au présent, et α un coefficient de pondération qui dépend de la distance d_i entre le radar et la cellule (x, y) de l'image i , ainsi que de caractéristiques intrinsèques du radar comme l'ouverture de l'antenne. La carte radar globale est mise à jour à chaque tour d'antenne et croît au fur et à mesure que de nouvelles images sont intégrées.

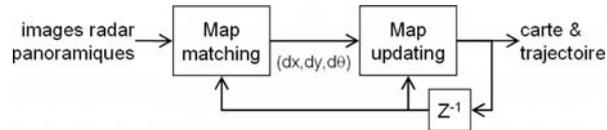


Figure 9. Synoptique général de l'algorithme R-SLAM

4.1.2. Résultats obtenus avec l'algorithme R-SLAM

Les résultats présentés ici sont issus de la campagne expérimentale réalisée à Beynes (lat. 48°51'35''N, long. 1°53'23''E, alt. 120 m) en avril 2011. Le parcours traverse une zone naturelle, composée de champs avec des buissons hauts et des arbres. Une vue aérienne (image Google Earth, date : juin 2010) de la zone expérimentale est présentée figure 10a. Sur les côtés du parcours on peut observer des bâtiments métalliques et une route. Le radar est placé sur le R-Trooper, à une hauteur de 1,3 m. Le robot se déplace à la vitesse de 1,15 m/s sur le parcours d'une longueur de 713 m. Les données radar sont enregistrées en temps réel et synchronisées avec les autres modalités capteurs présentes sur le robot (odomètre, gyromètre, GPS, etc.).

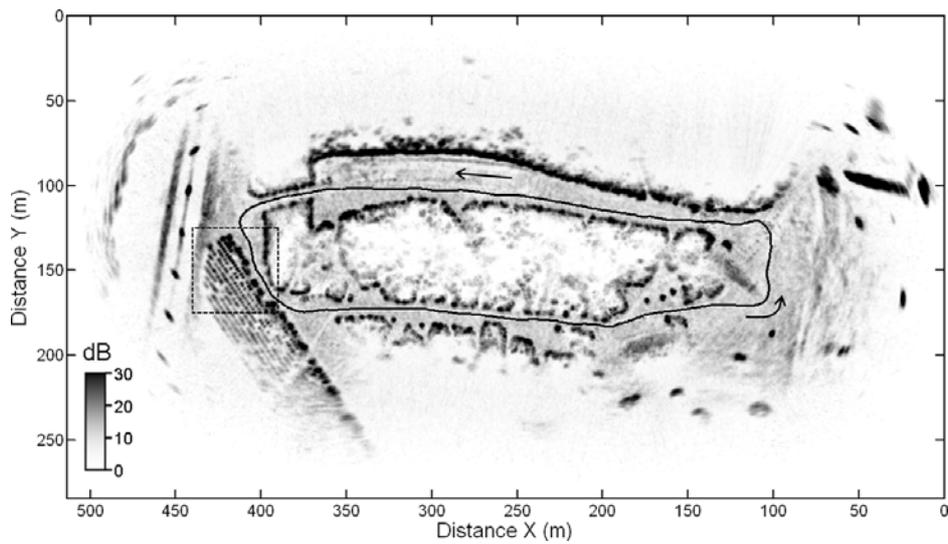
En particulier, la trajectoire du robot est également relevée avec un GPS-RTK utilisé comme référence de positionnement absolu. Cette trajectoire GPS apparaît en blanc sur la figure 10a.

Programmé en langage Matlab, l'algorithme R-SLAM fonctionne en temps différé sur un Quadri-Core 2.5 GHz Pentium PC. Il faut trois secondes pour construire un panoramique radar, l'intégrer dans la carte radar globale et calculer la nouvelle position du robot. 662 panoramiques radar ont été utilisés pour calculer la carte et la trajectoire présentées sur la figure 10b. La majorité des éléments présents dans l'environnement comme les arbres, arbustes ou surfaces en herbe sont des cibles à faible coefficient de rétrodiffusion. Quelques cibles fortement coopératives sont néanmoins présentes (hangar métallique en haut à droite). Sur la figure 11 est présenté un zoom réalisé sur la zone repérée par un carré noir dans la figure 10b.

Une estimation de la qualité de la construction de la carte radar est réalisée en comparant la trajectoire calculée avec la trajectoire mesurée avec le GPS-RTK. Bien que les données radar et GPS soient synchronisées, cette comparaison ne peut pas être effectuée directement car le GPS et la carte radar n'ont pas la même orientation (l'orientation 0° de la carte radar fait référence à l'orientation initiale du robot lors de l'acquisition de la première image panoramique). Une transformation rigide (translation, rotation) est donc calculée afin de minimiser l'erreur quadratique entre les trajectoires GPS et radar. L'erreur de positionnement obtenue est présentée sur la figure 12.



(a)



(b)

Figure 10. Expérimentation réalisée à Beynes (78). Le radar est placé sur le R-Trooper qui se déplace à la vitesse de 1,15 m/s le long d'un parcours de 713 m. (a) Vue aérienne de la zone de test (Google Earth). Le tracé blanc indique la trajectoire GPS. (b) Carte radar et trajectoire (en noir) calculées

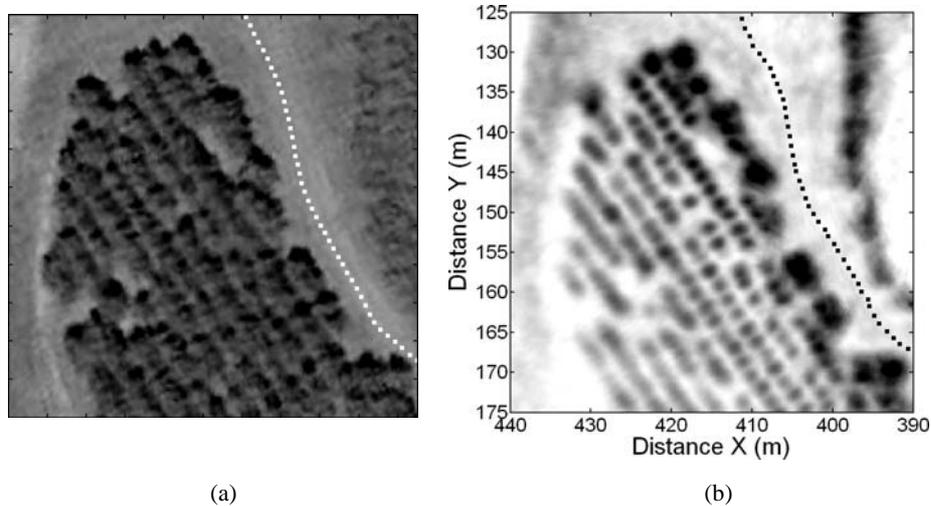


Figure 11. Détail du parcours réalisé. (a) Image aérienne (Google Earth) de la zone où l'on observe une plantation de jeunes arbres. (b) Carte radar correspondante

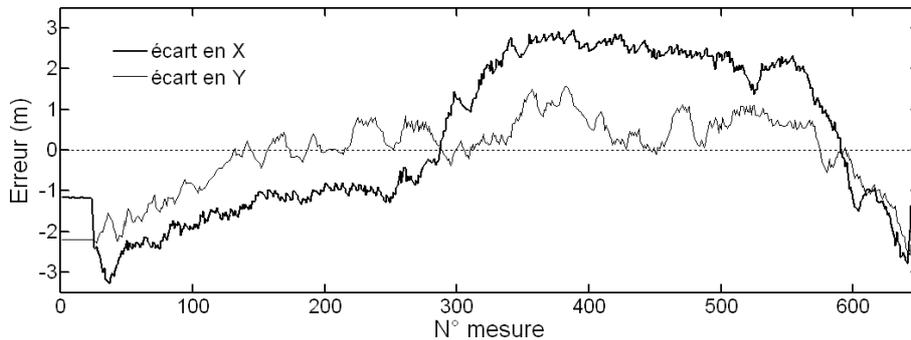


Figure 12. Ecart de position obtenus entre le GPS-RTK et l'algorithme R-SLAM au cours de la trajectoire de Beynes

4.2. SLAM radar « épars » : technique d'odométrie radar

Dans cette approche, sont présentés les résultats de localisation et de cartographie utilisant le radar seul, sans l'aide d'aucun capteur proprioceptif. Cette technique a pour objectif la mesure du déplacement du véhicule uniquement à partir du capteur radar, en s'affranchissant de tout autre type de capteur. L'originalité d'un des aspects de ce travail a consisté à considérer et à étudier la distorsion induite par un capteur tournant monté sur un robot mobile dans un but odométrique.

L'estimation du déplacement propre d'un véhicule est un problème largement étudié en robotique mobile. La plupart des travaux estimant le déplacement d'un véhicule sont fondés sur l'exploitation de données proprioceptives fournies par des capteurs tels que des odomètres, des gyromètres, des centrales inertielles, etc. Mais ces capteurs présentent des limitations : dérive des centrales inertielles, odomètres peu fiables sur terrains accidentés ou en cas de glissement. C'est pourquoi des approches basées sur l'odométrie visuelle ont été largement développées (Williams et Reid, 2010 ; Pretto *et al.*, 2009). Ainsi (Howard, 2008), Kitt (Kitt *et al.*, 2009) ou Nistér (Nistér *et al.*, 2006) ont proposé des solutions d'odométrie visuelle fondées sur l'utilisation de caméras seules. Dans (Jenkin *et al.*, 2010), une technique d'odométrie fondée sur un SLAM visuel couplé à une centrale inertielle est décrite. Toutefois, dans de telles approches, l'information de déplacement est souvent considérée comme un complément aux données proprioceptives plutôt qu'une substitution.

Dans le cas des capteurs tournants, l'avancement du véhicule est obtenu, comme présenté dans la section 4.1, par une mise en correspondance des acquisitions successives. Néanmoins, lorsque le véhicule se déplace durant les acquisitions capteurs, les scans obtenus sont corrompus par le mouvement propre du robot. Cette distorsion, introduite dans les images par le déplacement du véhicule est généralement considérée comme une perturbation et corrigée à l'aide de capteurs proprioceptifs dans les méthodes de "scan-matching" (Olson, 2009 ; Ribas *et al.*, 2007 ; Bosse et Zlot, 2008). A notre connaissance, les seuls travaux exploitant la distorsion comme source d'information sont décrits dans une approche utilisant une caméra spécifique de type Rolling Shutter. Ait-Aider *et al.* (2006) calculent des poses 3D ainsi que des vitesses d'objets rapides en utilisant une seule image caméra et les déformations qu'elle présente. Les connaissances *a priori* de l'objet observé sont néanmoins requises. Or généralement, en robotique mobile d'extérieur, nous ne disposons pas de connaissance *a priori* sur l'environnement du robot. L'originalité ici a été de prendre en considération et d'utiliser dans un objectif odométrique la distorsion induite par un capteur tournant monté sur un robot mobile.

4.2.1. Analyse de la distorsion

Avec un capteur télémétrique tournant, l'environnement du capteur est représenté à l'instant t . Lorsque la vitesse de rotation du capteur ω_c est lente par rapport au déplacement du véhicule porteur, les changements de position pendant le temps d'acquisition produisent des distorsions dans l'image. Cet effet de distorsion est présenté avec des données simulées sur la figure 13.

Pour prendre en compte la distorsion, deux images panoramiques radar successives de la scène sont nécessaires. En l'absence de descripteur, une extraction des échos de forte puissance est réalisée. L'hypothèse requise est celle d'une vitesse V constante du véhicule durant l'acquisition de deux scans successifs. La position de chaque mesure est directement liée à la pose d'observation et à l'angle de vue. Cette pose peut être exprimée avec un modèle d'évolution classique d'un point évoluant à vitesses linéaire et angulaire (V, ω) constantes. Si deux détections M_1 et M_2

représentent un même point du monde M_ω , il est possible de prédire la position \hat{M}_1 correspondant à cette détection dans le second scan et donc d'estimer les vitesses de déplacement du capteur. Le principe est brièvement résumé dans la figure 14.

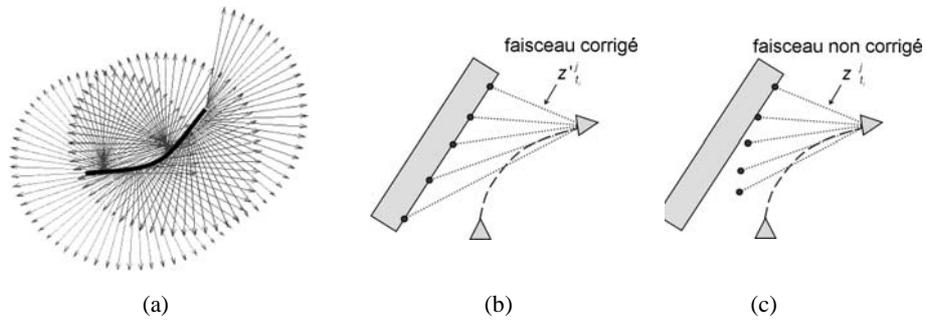


Figure 13. Illustration de la distorsion. (a) Le véhicule suit la trajectoire noire. Les différentes lignes de visée du capteur apparaissent sous forme de flèche (2 tours). Lorsque le véhicule se déplace, les lignes de visées ne décrivent pas un cercle. (b) Mesures de distance obtenues avec les faisceaux corrigés en tenant compte du déplacement. (c) Mesures obtenues sans prendre en compte le mouvement

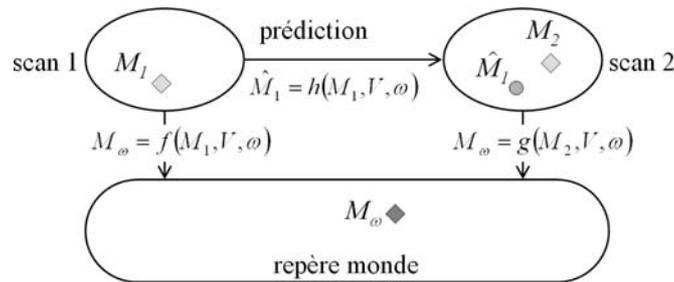


Figure 14. Principe de l'analyse de la distorsion

4.2.2. Estimation des vitesses

Afin d'estimer les paramètres de vitesse $[V, \omega]^T$, l'association de données entre les amers issus des deux scans successifs doit être effectuée. Une méthode de minimisation permet de prédire la pose \hat{M}_1 des détections ponctuelles M_1 de la première acquisition sur le second scan. En associant prédictions \hat{M}_1 et observations M_2 , les paramètres de vitesses peuvent ainsi être estimés par un filtrage de Kalman de façon à obtenir la vitesse de déplacement du radar (et donc par intégration sa trajectoire) permettant la mise en correspondance des détections (voir figure 15).

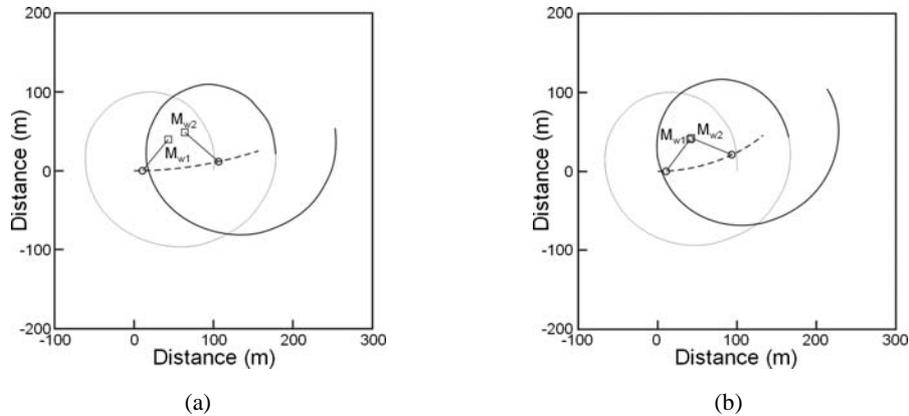


Figure 15. Simulation de mise en correspondance de détection par ajustement des paramètres de vitesse. La trajectoire du capteur apparaît en pointillés, les trochoïdes décrites par un faisceau de longueur 100 m en traits pleins.
 (a) Deux détections M_{w1} et M_{w2} représentant le même point du monde M_w , apparaissent sur deux scans (tracé fin et gras). (b) Ajustement des paramètres de la trochoïde pour la mise en correspondance des deux détections

4.2.3. Résultats du SLAM radar « épars »

Afin de valider la méthode de localisation par analyse de la distorsion, une expérimentation réaliste en milieu semi-urbain a été menée. L'algorithme a été appliqué sur une trajectoire d'environ 2,5 km parcourue à une vitesse moyenne de 30 km/h avec détection et sélection automatique des amers. Les fortes variations de vitesse aux ronds-points violent néanmoins l'hypothèse de vitesse constante. La trajectoire est estimée à partir de l'intégration des vitesses estimées par la technique d'analyse de la distorsion. Cette trajectoire à l'estime pure est ensuite utilisée pour reconstruire la cartographie radar (figure 16). La carte obtenue présente donc une déformation due à l'accumulation des erreurs.

A partir de chaque vitesse estimée, la trajectoire parcourue par le véhicule est reconstruite et pour chaque pose le spectre radar correspondant est positionné sans aucune méthode de scan-matching. L'erreur moyenne sur la vitesse linéaire est de 0,29 m/s avec un écart type de 1,3 m/s. La vitesse angulaire présente une erreur moyenne de 0,06°/s et un écart type de 0.026°/s. L'évaluation de la trajectoire donne une erreur en rotation de 0,036 rad et des erreurs de translation de 0,59 m en x et 0,35 m en y.

Cette méthode de SLAM fondée sur l'utilisation d'entités pertinentes extraites d'images radar (Vivet *et al.*, 2012) démontre la faisabilité d'une approche odométrique utilisant le radar seul. Elle est rapide (environ 100 ms par itération) et permet l'estimation des déplacements du véhicule avec peu d'amers.

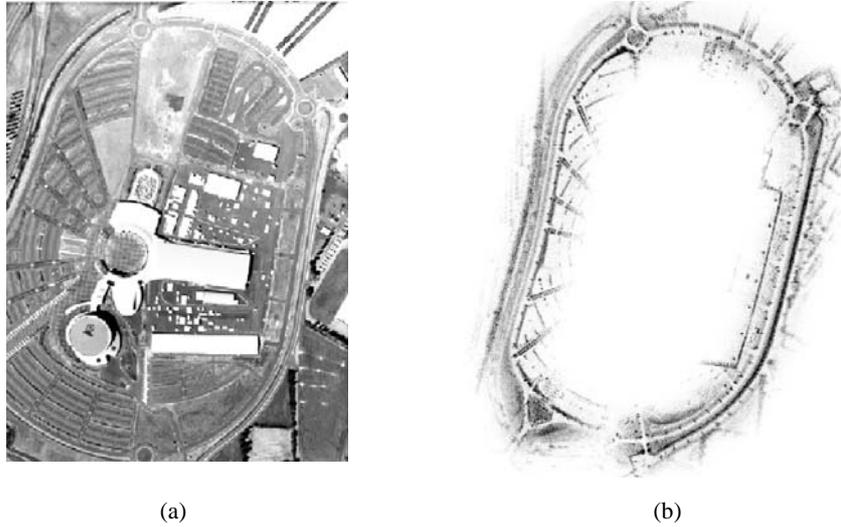


Figure 16. Odométrie radar en milieu semi-urbain. (a) Vue aérienne de la zone d'expérimentation. (b) Trajectoire estimée et reconstruction de la cartographie par analyse de la distorsion uniquement

4.3. Suivi d'objets mobiles (DATMO)

L'approche précédente permet l'obtention de la pose et de la vitesse du véhicule. Un des avantages du radar consiste à fournir des informations de vitesse sur l'environnement. Cette section propose une extension de l'algorithme d'odométrie radar à une méthode de DATMO (*Detection And Tracking of Moving Objects*) où les entités extraites, détectées comme mobiles, sont pistées. La méthode présentée ici utilise le radar IMPALA qui fournit des couples de données distance-vitesse.

4.3.1. Estimation de la vitesse d'avancement du véhicule

Avant de pouvoir estimer la vitesse des objets mobiles, le Doppler induit par le déplacement du véhicule porteur équipé du radar doit lui-même être estimé. En effet, comme il a été mentionné précédemment, la fréquence Doppler mesurée par le radar est une combinaison du doppler des cibles mobiles et du doppler dû à sa propre vitesse d'avancement. Cette vitesse peut être estimée en faisant l'hypothèse d'un environnement quasi statique, c'est-à-dire en considérant qu'un nombre important d'objets fixes est présent dans la scène. L'effet Doppler mesuré sur ces objets fixes sera donc uniquement dû à la vitesse du porteur. La vitesse radiale dépendant de l'angle θ entre la cible et la direction d'avancement du véhicule, le profil de vitesse radiale $V_r(\theta)$ est obtenu sous la forme d'une sinusoïde dont l'amplitude V_0 calculée par une méthode des moindres carrés fournit la vitesse linéaire d'avancement du porteur :

$$V(\theta) = V_0 \cos \theta \quad (7)$$

Ici le cap du véhicule correspond au top nord de l'antenne radar, soit $\theta = 0^\circ$.

La figure 17 illustre un exemple de mesure de la vitesse d'avancement du porteur, dans un environnement répondant aux critères quasi statiques.

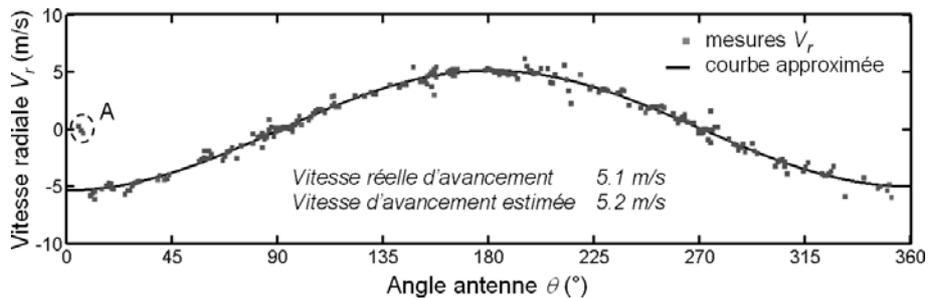


Figure 17. Évolution de la vitesse radiale du porteur en fonction de l'angle de visée. Le point A correspond à un véhicule qui suit le porteur à la même vitesse

4.3.2. Extraction des entités non cohérentes

Une fois estimée, la « perturbation » Doppler induite par le mouvement propre du capteur est ôtée des données radar. Le seul Doppler persistant sur les images radar est donc dû à la vitesse des objets de la scène. Afin d'extraire ces entités non cohérentes, chacune des images corrigées obtenues à partir des pentes montantes et descendantes de la modulation doivent être comparées. Les différences entre ces images indiquent les objets potentiellement mobiles qui seront donc espacés de deux fois la fréquence Doppler. Comme le radar est soumis à de nombreux bruits détectés comme des différences entre les images montantes et descendantes, de fausses détections apparaissent et doivent être filtrées (cf. section 2.4).

4.3.3. Pistage des entités mobiles

Une fois les objets mobiles détectés, un processus de suivi peut être lancé. L'association des détections supposées mobiles est fondée sur un critère classique de distance de Mahalanobis prenant en compte à la fois la position et la mesure Doppler associées à leur incertitude respective. Pour chaque objet mobile potentiel, un pistage est effectué en utilisant une approche classique fondée sur un filtre de Kalman avec un modèle d'évolution à vitesse constante, associé à un processus concurrent de probabilité d'existence de chaque piste. D'autres méthodes de pistage utilisant l'algorithme IMN (*Interacting Multiple Model*) ou des techniques MHT (*Multiple Hypothesis Tracking*) pourraient être utilisées par la suite pour affiner la détection et l'association de données (Blackman, 1999).

4.3.4. Résultats en DATMO

Différentes expérimentations ont été effectuées avec un véhicule mobile géo-référencé par GPS dans un environnement complexe. Pendant cette expérimentation, le véhicule équipé du radar est statique. Chaque cible potentielle est pistée et mise à jour sur la base des observations Doppler. L'évolution de la probabilité d'existence de chaque détection et la trajectoire suivie par ces objets sont présentées sur les figures 18 et 19.

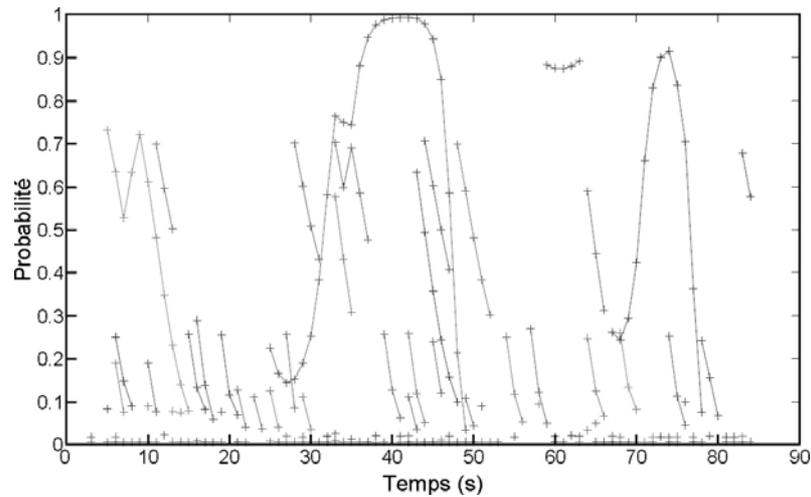


Figure 18. Évolution de la probabilité d'existence des pistes de suivi

Un véhicule mobile se déplace à une vitesse de 20 km/h lors de son premier passage puis à 50 km/h. Le lancement de chaque piste est représenté sur la figure 18 par une piste probabiliste. La probabilité de chaque détection considérée comme un objet mobile, évolue selon les détections ou non détections successives.

Nous observons que la probabilité de fausse détection décroît très rapidement et que ces pistes sont supprimées. Les vrais objets mobiles sont pistés pendant un temps plus long et leurs probabilités d'existence augmentent à chaque nouvelle détection. On observe sur la figure 18 deux objets mobiles, l'un entre 25 s et 50 s, l'autre entre 70 s et 80 s. Les trajectoires affichées figure 19 représentent toutes les pistes lancées. Deux d'entre elles sont dues à des objets réellement mobiles (lignes quasi verticales), les autres étant des bruits. Les précisions de ces pistes ont été calculées en comparaison à la vérité terrain fournie par les capteurs proprioceptifs et par le GPS-RTK. La plus longue des pistes présente une erreur moyenne en positionnement de 4 m et en vitesse de 0,3 m/s.

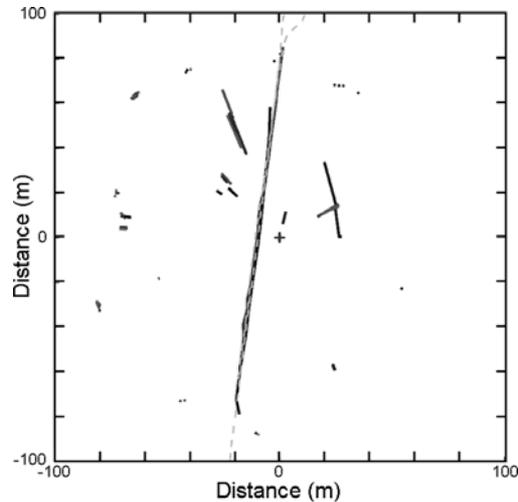


Figure 19. Trajectoire des objets mobiles. Chaque piste est représentée avec une couleur différente. La ligne en tirets correspond à la trajectoire GPS de référence. La croix en $(0,0)$ représente la position du radar

Le pistage d'objets mobiles multiples a été effectué pour différentes formations : avec des véhicules en convoi mais également avec des véhicules se croisant à des vitesses différentes dans la même direction que le véhicule porteur du radar.

5. Conclusion

Au cours du projet IMPALA un radar panoramique hyperfréquence en bande K a été réalisé. Ce radar tournant, embarqué sur un véhicule, est capable d'extraire simultanément la distance et la vitesse radiale des obstacles présents dans la scène. Il ouvre la voie à de nouvelles approches dans le domaine de la localisation et de la cartographie simultanées (SLAM) fondées sur l'utilisation d'un imageur radar terrestre embarqué. Une première approche originale montre une méthode de "scan-matching" utilisant la densité des données radar et s'inspirant de techniques utilisées dans le domaine de la vision. La seconde approche n'a recours à aucun capteur proprioceptif et s'appuie sur des données éparses en exploitant comme seule information la distorsion des données induites par un capteur télémétrique à rotation lente. Les premiers résultats d'une application à la détection et au pistage d'entités mobiles (DATMO) basée sur cette méthode sont présentés. La mesure non ambiguë et simultanée des paramètres distance-vitesse dans une scène fortement dynamique pourra par la suite être améliorée par la mise en œuvre d'un radar numérique à saut de fréquence.

Le Radar peut ainsi venir renforcer le panel des capteurs de perception employés en robotique mobile d'extérieur. Sa grande portée permet d'envisager une augmentation significative de la vitesse des robots et son insensibilité aux conditions climatiques représente un atout supplémentaire qui le rend incontournable dans des applications en conditions extrêmes.

Remerciements

Le projet IMPALA a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre de l'appel à projets PsiRob 2006 (ANR-06-ROBO-0012) ainsi que par le Programme opérationnel compétitivité régionale et emploi (2007-2013) de la Région Auvergne, au titre du Fonds européen de développement régional (FEDER, convention N° 30329-2008). Il a également été soutenu et labellisé par le pôle national de compétitivité ViaMéca.

Les auteurs remercient chaleureusement les membres des équipes techniques d'IRSTEA, du LASMEA et de THALES qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Bibliographie

- Ait-Aider O., Andreff N., Lavest J.M., Martinet P. (2006). Simultaneous Object Pose and Velocity Computation Using a Single View from a Rolling Shutter Camera. *European Conference On Computer Vision*, Graz, Austria, p. 56-68.
- Bailey T., Durrant-Whyte H. (2006). Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part II - State of the Art. *Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, n° 3, p. 108-117.
- Bibby C., Reid I. (2007). Simultaneous Localisation and Mapping in Dynamic Environments (SLAMIDE) with Reversible Data Association. *Robotics: Science and Systems*, Atlanta, USA.
- Blackman S., Popoli R. (1999). Design and Analysis of Modern Tracking Systems. *Artech House*, MA.
- Bosse M., Zlot R. (2008). Map Matching and Data Association for Large-Scale Two-dimensional Laser Scan-based SLAM. *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, n° 6, p. 667-691.
- Chandran M., Newman P., (2006). Motion Estimation from Map Quality with Millimeter Wave Radar. *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Beijing, China, p. 808-813.
- Checchin P., Gérossier F., Blanc C., Chapuis R., Trassoudaine L. (2009). Radar Scan Matching SLAM using the Fourier-Mellin Transform. *International Conference on Field and Service Robots (FSR)*, Cambridge, USA.
- Chen Z., Samarabandu J., Rodrigo R. (2007). Recent advances in simultaneous localization and map-building using computer vision. *Advanced Robotics*, vol. 21, n° 3, p. 233-265.

- Clark S., Dissanayake G. (1999). Simultaneous localization and map building using millimeter wave radar to extract natural features. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, USA, p. 1316-1321.
- Dissanayake G., Newman P., Durrant-Whyte H., Clark S., Csorba M. (2001). A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, n° 3, p. 229-241.
- Dissanayake G., Newman P., Durrant-Whyte H., Clark S., Csorba M. (2000). An Experimental and Theoretical Investigation into Simultaneous Localization and Map Building, *Lecture Notes in Control and Information Sciences: Experimental Robotics VI*, p. 265-274.
- Durrant-Whyte H., Pagac D., Rogers B., Stevens M., Nelmes G. (2007). Field and service applications - An autonomous straddle carrier for movement of shipping containers - From Research to Operational Autonomous Systems. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, n° 3, p. 14-23.
- Durrant-Whyte H., Bailey T. (2006). Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part I - The Essential Algorithms. *Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, n° 2, p. 99-110.
- Hähnel D., Burgard W., Fox D., Thrun S. (2003). An efficient FastSLAM algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements. *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, USA, p. 206-211.
- Ho K.L., Newman P. (2007). Detecting Loop Closure with Scene Sequences. *International Journal of Computer Vision*, vol. 74, n° 3, p. 261-286.
- Howard A. (2008). Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles. *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Nice, France, p. 3946-3952.
- Howard A., Wolf D.F., Sukhatme G.S. (2004). Towards 3D Mapping in Large Urban Environments. *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sendai, Japan, p. 419-424.
- Jenkin M., Verzijlberg B., Hogue A. (2010). Progress towards underwater 3D scene recovery. *Conference on Computer Science and Software Engineering (CSSE)*, Wuhan, China, p. 123-128.
- Jose E., Adams M. (2004). Millimetre Wave RADAR Spectra Simulation and Interpretation for Outdoor SLAM. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, USA, p. 1321-1326.
- Kitt B., Geiger A., Lategahn H. (2009). Visual Odometry based on Stereo Image Sequences with RANSAC-based Outlier Rejection Scheme. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, San Diego, USA, p. 486-492.
- Leonard J., How J., Teller S., Berger M., Campbell S., Fiore G., Fletcher L., Frazzoli E., Huang A., Karaman S., Koch O., Kuwata Y., Moore D., Olson E., Peters S., Teo J., Truax R., Walter M., Barrett D., Epstein A., Maheloni K., Moyer K., Jones T., Buckley R., Antone M., Galejs R., Krishnamurthy S., Williams J. (2008). A Perception Driven Autonomous Urban Vehicle. *Journal of Field Robotics*, vol. 25, n° 10, p. 727-774.

- Monod M.-O., Faure P., Rouveure R. (2009). Intertwined linear frequency modulated radar and simulator for outdoor robotics applications. *IEEE International Radar Conference (RADAR)*, Bordeaux, France.
- Monod M.-O. (1995). *Frequency modulated radar: a new sensor for natural environment and mobile robotics*. Ph.D. Thesis, Paris VI University, France.
- Mullane J., Jose E., Adams M.D., Wijesoma W.S. (2007). Including Probabilistic Target Detection Attributes Into Map Representations. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, n° 1, p. 72-85.
- Nistér D., Naroditsky O., Bergen J. (2006). Visual odometry for ground vehicle applications. *Journal of Field Robotics*, vol. 23, n° 1, p. 3-20.
- Olson E. (2009). Real-time correlative scan matching. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, USA, p. 4387-4393.
- Pfaff P., Triebel R., Stachniss C., Lamon P., Burgard W., Siegwart R. (2007). Towards Mapping of Cities. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Rome, Italy, p. 4807-4813.
- Pretto A., Menegatti E., Bennewitz M., Burgard W., Pagello E. (2009). A Visual Odometry Framework Robust to Motion Blur. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, USA, p. 1685-1692.
- Reiher M., Yang B. (2009). Derivation of the Frequency Mismatch Probability in Linear FMCW Radar based on Target Distribution. *IEEE Radar Conference*, Pasadena, USA.
- Ribas D., Ridaó P., Tardós J.D., Neira J. (2007). Underwater SLAM in a Marina Environment. *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Diego, USA, p. 1455-1460.
- Rohling H. (1983). Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 19, n° 4, p. 608-621.
- Rouveure R., Monod M.-O., Faure P. (2009). High Resolution Mapping of the Environment with a Ground-Based Radar Imager. *IEEE International Radar Conference (RADAR)*, Bordeaux, France.
- Rouveure R., Monod M.-O., Faure P. (2008). Mapping of the environment with a high resolution ground-based radar imager. *14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Ajaccio, France, p. 822-828.
- Rouveure R., Faure P., Monod M.-O. (2006). A new radar sensor for mobile robot localization and mapping in extensive outdoor environment. First results. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Commission 1 Symposium*, Paris, France.
- Vivet D., Checchin P., Chapuis R. (2012). Odométrie radar par analyse de la distorsion - Application à un véhicule roulant à vitesse élevée. *Colloque Reconnaissance des Formes et l'Intelligence Artificielle (RFIA)*, Lyon, France.
- Vivet D., Checchin P., Chapuis R. (2009). On the Fly Localization and Mapping Using a 360 Field-of-View Microwave Radar Sensor. *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Saint Louis, USA.

- Wang C.C. (2004). *Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking*, Doctoral dissertation, tech. report CMU-RI-TR-04-23, Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- Williams B., Reid I. (2010). On combining visual slam and visual odometry. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, USA, p. 3494-3500.
- Zhang S., Xie L., Adams M. (2004). An Efficient Data Association Approach to Simultaneous Localization and Map Building. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, USA, p. 854-859.

Marie-Odile Monod a obtenu un doctorat en sciences physiques de l'Université Paris VI en 1995 après un diplôme d'ingénieur ESIEE. Ses travaux ont notamment contribué à l'introduction du radar comme capteur de perception dans les domaines de la robotique mobile, de l'environnement et de la caractérisation du sol. Elle est chargée de recherche à IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) où ses travaux portent sur la conception de capteurs pour l'environnement et l'étude des interactions onde-milieu. Elle a assuré la coordination du projet ANR IMPALA et coordonne aujourd'hui deux projets ANR dans le domaine des capteurs et de l'environnement.

Roland Chapuis est professeur à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand où il enseigne le traitement du signal. Il est chercheur au sein de l'Institut Pascal (anciennement LASMEA) à Clermont-Ferrand. Il a passé une thèse en 1991 puis une habilitation à diriger des recherches en 2000 sur les problématiques d'interprétations de scènes pour la robotique mobile. Ses recherches aujourd'hui sont orientées sur les techniques de SLAM multisensoriel, la fusion des données et l'interprétation des scènes d'extérieur. Il est responsable du thème PerSyst (systèmes de Perception) de l'Institut Pascal, et de la partie ROBMOB du projet d'équipement grand emprunt « Robotex » pour Clermont-Ferrand. Il intervient par ailleurs, sur les problématiques du Laboratoire d'excellence « IMOBS3 » clermontois.

Philippe Gosset a obtenu son diplôme d'ingénieur ESIEA en 1998 suivi d'un DEA de Robotique à l'Université Paris VI. Il a rejoint le département robotique de THALES en 2001. Il est intervenu sur les différents aspects de conception, développement et intégration de plateformes robotiques de tailles et de fonctions différentes : μ Trooper, R-Trooper, MMSR-SYDERA. Il a participé à différentes études pour la DGA (PEA TAROT) et à plusieurs projets de l'ANR.

Raphaël Rouveure a obtenu une thèse de l'Université Blaise Pascal en 2001 après des travaux portant sur la caractérisation du sol par techniques micro-ondes. Il est actuellement chargé de recherche à IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture). Son domaine de recherche concerne la localisation et la reconstruction de l'environnement par cartographie radar, dans des applications de robotique mobile d'extérieur et pour l'observation environnementale. Il intervient également sur les thématiques du Laboratoire d'excellence « IMOBS3 » à Clermont-Ferrand.

Damien Vivet a obtenu le grade de Docteur en « Vision pour la robotique » en 2011 au LASMEA (Institut Pascal) après des travaux de recherche sur la localisation et cartographie par radar menés dans le cadre du projet ANR IMPALA. En 2012, il a rejoint comme post-

doctorant l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace) et contribué au développement d'une aide visuelle pour la localisation de drones aériens. En septembre 2012, il a intégré l'INSA Rouen en tant qu'attaché temporaire d'enseignement et de recherche au sein de laboratoire LITIS. Ses recherches portent sur la perception multicapteur de l'environnement pour l'aide à la navigation.

Patrice Faure est ingénieur de recherche et développement à IRSTEA (Institut National de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) à Clermont-Ferrand. Ses domaines d'activité concernent le traitement du signal ainsi que la conception de systèmes radar appliqués à la robotique mobile et à l'observation de l'environnement.

Paul Checchin est Maître de Conférences, habilité à diriger des recherches, à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, en poste à l'IUT d'Allier au sein du département Génie électrique et informatique industrielle. Son activité de recherche, menée au sein de l'Institut Pascal, UMR 6602 du CNRS, est consacrée à la perception pour la localisation et la cartographie en robotique mobile.