

Implémentation d'un estimateur de la pose d'un robot mobile type voiture (Car-like) pour la navigation autonome à l'extérieur

R. CHEMALI ^a *, S. MENICHE ^a , T. CHETTIBI ^a

^a Laboratoire systèmes numériques, Ecole Militaire Polytechnique, Bordj El Bahri, Alger 16000

ARTICLE INFO

Article history :

Received September 2014

Accepted January 2015

Keywords :

Systèmes embarqués ;

Hybridation Odomètre/GPS ;

Filtre Kalman Etendu (EKF) ;

Système de développement EMX ;

HIL Simulation.

ABSTRACT

Ce document présente une étude sur l'estimation de la pose des robots mobiles type voiture (Car-like), afin de l'exploiter dans la navigation autonome à l'extérieur, en utilisant le GPS standard comme capteur extéroceptif et l'odomètre comme un capteur proprioceptif. Une architecture d'estimation de la position et de l'orientation est proposée, elle consiste à fusionner les informations issues des capteurs (GPS, odomètre) en utilisant le filtre de Kalman étendu en présence du signal GPS, et d'utiliser une unité de navigation à l'estime (Dead Reckoning) en absence ou atténuation du signal GPS. Dans le but d'améliorer la précision de l'estimation, un commutateur est conçu afin de basculer entre la fusion de filtre de Kalman étendu et le bloc de navigation à l'estime (Dead Reckoning). Notre architecture a été validée et implémentée sur un système embarqué, en utilisant l'approche HIL (Hardware In the Loop), cette dernière consiste à élaborer un processus qui fait croire au système embarqué sous test qu'il fonctionne dans des conditions réelles avec les entrées et les sorties du système, alors qu'en réalité il travaille avec un environnement virtuel.

©2015 LESI. All right reserved.

1. Introduction

La Navigation est une tâche principale dans plusieurs domaines tels que l'agriculture, les applications militaires, maritimes, etc [1-3]. Comme il est connu, les capteurs utilisés pour la récolte des données indiquent la précision de la navigation. Dans notre application, le capteur GPS et les encodeurs sont utilisés comme des capteurs de navigation. Le GPS est le capteur de positionnement absolu le plus utilisé. Depuis juin 2000, la dégradation SA (Selective Availability) a été arrêtée [4]. La précision du GPS standard de niveau de dix mètres (10 m) améliore les applications commerciales civiles, en particulier pour des tâches générales de la navigation. Un récepteur GPS travaille en temps réel en mode cinématique (GPS RTK) peut offrir des informations précise de niveau centimétrique. En plus de GPS,

*Email : riadzerty@gmail.com

le véhicule est équipé d'un encodeur incrémental et un encodeur absolu pour fournir des mesures sur la vitesse et l'angle de braquage. Pour estimer la position et l'orientation (la pose) du véhicule, une architecture de fusion basée sur le filtre de Kalman étendu et une unité de traitement de navigation à l'estime (Dead Reckoning) fondée sur Runge-Kutta d'ordre 4 est proposée. Nous validons notre architecture avec une implémentation sur un système embarqué qui fonctionne en temps réel par l'utilisation de l'approche HIL. Ces résultats sont comparés avec l'estimation qui a été faite par un test off-line sur le PC (en temps différé).

2. Modélisation

Un modèle cinématique simple est utilisé dans cet étude. La position de véhicule est représentée dans le repère global comme le montre la Fig. 1. L'angle de braquage φ est défini dans le repère du véhicule (local). Le capteur GPS est situé en l'avant du véhicule.

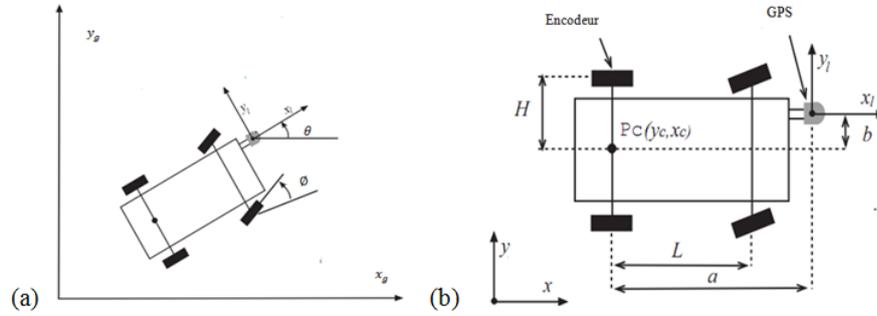


Fig. 1. Robot mobile type voiture : (a) Système des coordonnées du véhicule, (b) Les paramètres du robot et l'emplacement des capteurs.

On considère que le véhicule est contrôlé par une vitesse v_c du centre de l'essieu arrière et un angle de braquage ϕ . Le modèle cinématique est donnée comme suit

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c \cos \theta \\ v_c \sin \theta \\ \frac{v_c}{L} \tan \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le récepteur GPS est situé dans le front du véhicule, afin qu'on facilite l'étape de mise à jour, le modèle cinématique du véhicule est conçu pour représenter la trajectoire du centre de capteur GPS. Comme montre dans Fig. 1, la translation du centre de l'essieu arrière peut être donnée

$$\begin{aligned} x_l &= x_c + a \cos \theta + b \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \\ y_l &= y_c + a \sin \theta + b \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (2)$$

Après on peut écrire

$$\dot{x} = f(x) = \begin{bmatrix} \dot{x}_l \\ \dot{y}_l \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c \cos \theta - \frac{v_c}{L}(a \sin \theta + b \cos \theta) \tan \varphi \\ v_c \sin \theta + \frac{v_c}{L}(a \cos \theta - b \sin \theta) \tan \varphi \\ \frac{v_c}{L} \tan \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

La vitesse est produite avec un encodeur situé dans la roue gauche arrière. Cette vitesse est translatée au centre de l'essieu avec l'équation suivante :

$$v_c = v_e / (1 - \frac{H}{L} \tan \varphi) \tag{4}$$

3. Architecture de l'estimation

En fait, le GPS peut offrir la position (x, y) mais pas une information sur l'orientation du véhicule. D'ailleurs, les signaux de GPS ne sont pas disponible toute temps, ainsi la navigation exige plus que le GPS. L'encodeur est l'un des capteurs les plus utilisés dans l'industrie mais comme tous les capteurs relatifs, il souffre de l'accumulation d'erreur (dérive). La combinaison entre les capteurs absolus, par exemple le GPS ou un compas et un capteur relative comme l'encodeur, le gyroscope et l'accéléromètre est une solution naturelle [4-6]. Dans, ce document, nous proposons une architecture de l'estimation de la position et de l'orientation du véhicule (Car-like) basé sur EKF et de Runge-Kutta d'ordre 4 comme est illustré dans Fig. 2. Le Filtre de Kalman étendu est destiné à estimation de la pose du véhicule, c-à-d. (x, y, θ) en présence du signal GPS et un bloc RK est destiné pour la navigation à l'estime basée sur la méthode de Range-Kutta d'ordre 4 dans le cas de la absence ou atténuation du signal GPS.

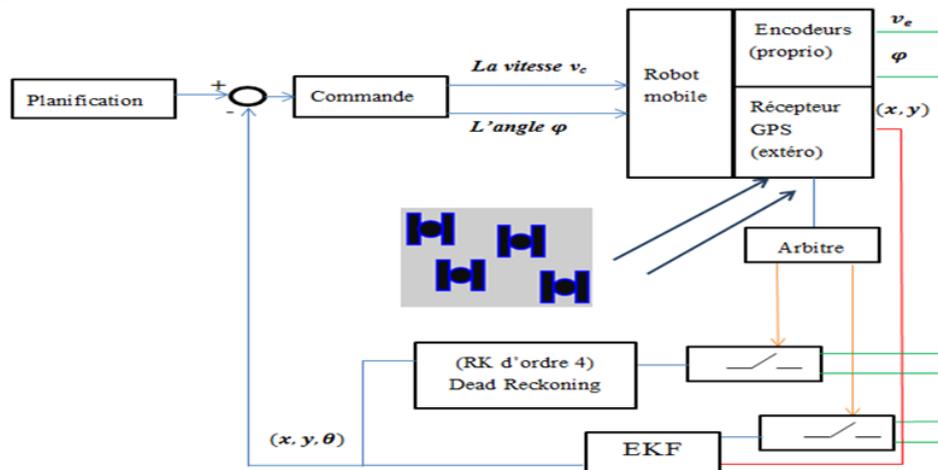


Fig. 2. Architecture de l'estimation de la position et l'orientation.

4. Algorithme d'estimation

Le vecteur d'état est $X = [x_l, y_l, \theta]$. Le modèle du processus d'EKF :

$$X(k + 1) = f(X(k), U(k)) + w(k) \tag{5}$$

$f(X(k), U(k))$ est de la forme de l'Equation (1). $w(k)$ est le vecteur d'erreur modélisation du processus avec une moyenne nulle et une covariance Q . Les Equations (6,7) sont les équations de la mesure, où Z est la mesure direct du GPS avec une moyenne nulle et une covariance R .

$$Z(k + 1) = h(X(k), k) + v(k) \quad (6)$$

$$\begin{cases} h_1(X(k), k) = x_l(k) \\ h_2(X(k), k) = y_l(k) \end{cases} \quad (7)$$

Les matrices de Jacobéennes F du vecteur f et H du vecteur h par rapport au vecteur d'état sont représentées respectivement

$$F(X(k), k) = \left. \frac{\partial f(X(k), k)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}(k+1/k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_c \sin \theta - (v_c/L)(a \cos \theta - b \sin \theta) \tan \varphi \\ 0 & 1 & v_c \cos \theta - (v_c/L)(a \sin \theta + b \cos \theta) \tan \varphi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$H(X(k), k) = \left. \frac{\partial h(X(k), k)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}(k+1/k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

L'algorithme EKF est donné comme suit

Étape 1 : Prédiction de l'état et la mesure

$$\hat{X}(k + 1/k) = f(\hat{X}(k), U(k))$$

$$P(k + 1/k) = F(\hat{X}(k), k)P(k/k)F^T(\hat{X}(k), k) + Q(k)$$

$$\hat{Z}(k + 1/k) = h(\hat{X}(k + 1), k)$$

$$S(k + 1/k) = H(\hat{X}(k + 1), k)P(k + 1/k)H^T(\hat{X}(k + 1), k) + R(k)$$

Étape 2 : calcul du Gain

$$K(k + 1/k) = P(k + 1/k)H^T(\hat{X}(k + 1), k)S(\hat{X}(k + 1/k))^{-1}$$

Étape 3 : mise à jour

$$\hat{X}(k + 1/k + 1) = \hat{X}(k + 1/k) + K(k + 1/k) \left[Z(k + 1) - \hat{Z}(k + 1, k) \right]$$

$$P(k + 1/k + 1) = P(k + 1/k) - K(k + 1/k)S(k + 1)K^T(k + 1/k)$$

Cet algorithme fusionne les données issues des encodeurs et de GPS, pour estimer l'orientation et la position du véhicule. Pratiquement, le GPS n'est pas disponible tout le temps pendant la conduite du véhicule par exemple, le véhicule passe par un pont ou un grand bâtiment, . . . , etc. Même pour un site ouvert la détérioration des signaux de GPS peut être produite à cause des conditions climatiques. Pour compenser la précision perdue autant que possible, une navigation à l'estime est appliquée afin de générer la position et l'orientation du véhicule pendant les périodes de la détérioration. En fait, la navigation à l'estime ici est un algorithme Range-Kutta d'ordre 4 qui nous permet de résoudre l'Equation (5).

5. L'approche de simulation HIL

La simulation HIL (Hardware In the Loop) est une technique utilisée pour le développement et le test des systèmes embarqués temps-réel. Elle consiste à construire un dispositif

qui fait croire au système embarqué sous test qu'il fonctionne en temps-réel, avec les entrées et les sorties du système embarqué réel [7], alors qu'en réalité il travaille avec un environnement virtuel. La simulation HIL a été faite avec des données réelles qui sont récoltées et enregistrées et aussi synchronisés à partir d'une expérimentation connue sous le nom Victoria Park [8]. Les données sont disponibles dans [9]. Le véhicule est équipé d'un capteur GPS qui fonctionne avec une fréquence de 5 Hz et des encodeurs avec 40 Hz. L'architecture matérielle du simulateur HIL que nous proposons est représentée sur la Fig. 3. Elle est composée principalement d'un PC, ce dernier est relié avec la carte du système de développement EMX de GHI Electronic's [10] sous test via des interfaces de communication (des liaisons séries). Le PC (qui contient un émulateur de capteurs) qui permet d'envoyer les données de l'odomètre et du GPS au système sous test en temps-réel (Système embarqué) et la réception des données envoyées par le système pour pouvoir visualiser et analyser ces données.

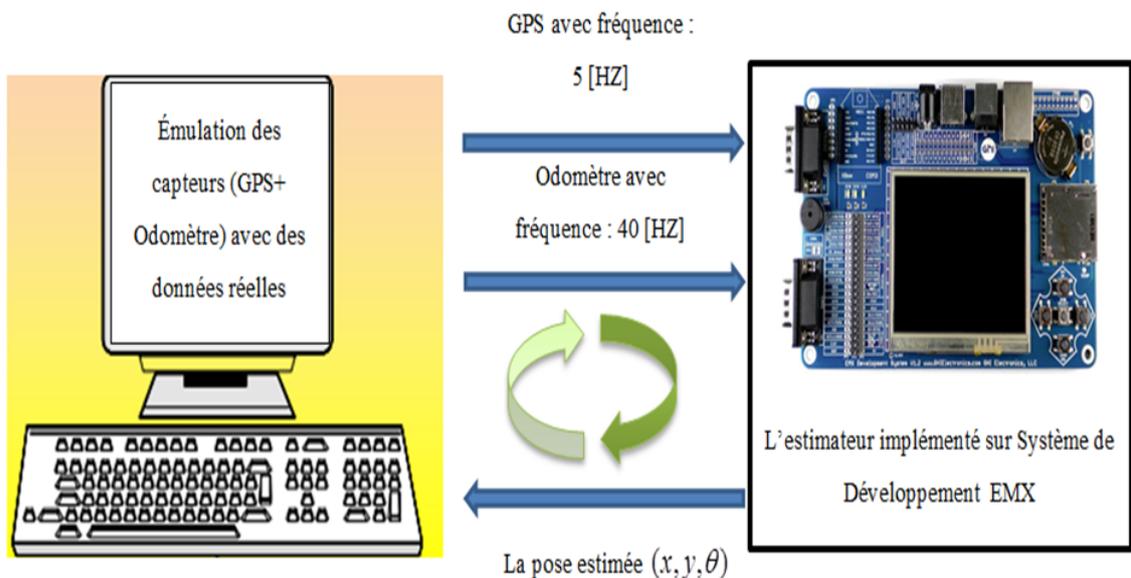


Fig. 3. Architecture de simulation HIL proposée.

6. Résultats de l'estimation

Le chemin a été acquis dans des conditions idéale avec GPS RTK (l'erreur est de l'ordre de quelques centimètres) dans un endroit ouvert, pour se rapprocher à la réalité (les conditions climatiques ne sont pas bonnes, ou dans une zone urbaine) on a introduit des détériorations et des coupures artificielles sur le signal GPS RTK pour générer un autre signal proche au GPS standard pour l'utiliser dans la fusion. Le GPS RTK ici est considéré comme une référence (Ground truth). La Fig. 4 montre l'itinéraire qui a été estimé sur PC par un outil de simulation en temps différé (off-line) et par l'estimation en temps réel sur la carte EMX avec l'approche de simulation HIL, et sa comparaison avec la solution GPS RTK (référence) et l'odométrie (à partir du modèle cinématique du robot). Dans notre test les coupures GPS ont été faites entre $t = 10$ à $12s$ et aussi entre $t = 30$ à $33s$.

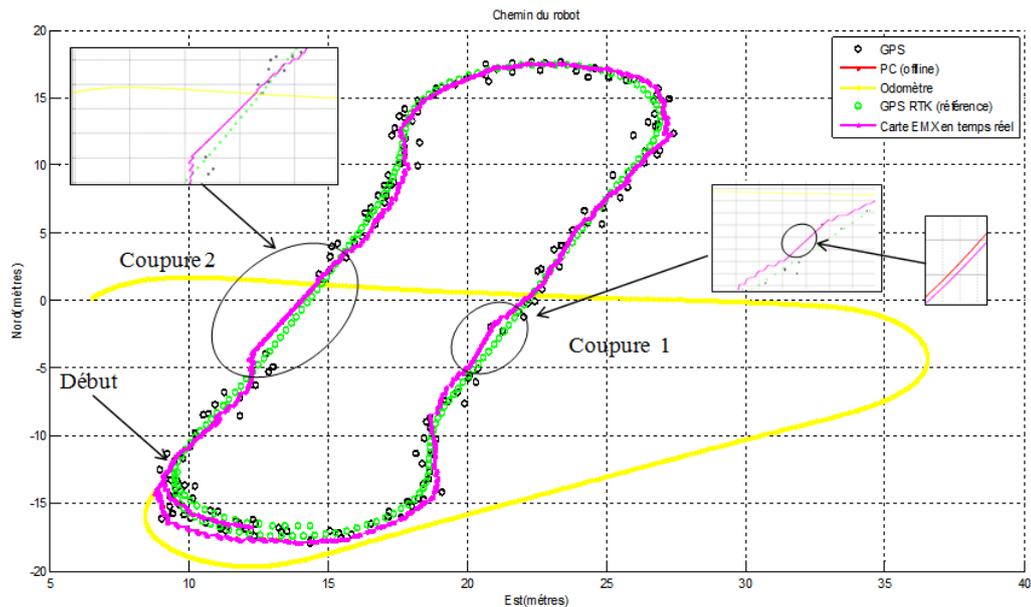


Fig. 4. Le chemin du robot estimé par la carte EMX en magenta (en temps réel), et celui obtenu par le PC en rouge (en temps différé). Le chemin donné par l'odomètre est affiché en jaune, le GPS standard en noire, et le GPS RTK (référence) en vert.

On constate que l'estimation de position en temps réel sur le système embarqué (en magenta) est superposée sur l'estimation calculée sur PC (en rouge) en temps différé, toujours pour confirmer que le calcul embarqué effectué sur la carte donne de bons résultats et ne s'éloigne pas trop de la solution obtenue sur PC, la Fig. 5 illustre l'écart entre les deux solutions montrant que l'écart de posture est très faible. Les Figs. 4-7 montrent bien que malgré les coupures et les détériorations de signal GPS, notre estimateur est arrivé à les surmonter et à estimer l'état (posture) de notre robot avec une petite erreur, par contre l'état estimé par l'odomètre diverge à cause de l'accumulation de l'erreur (patinage, glissement... etc.).

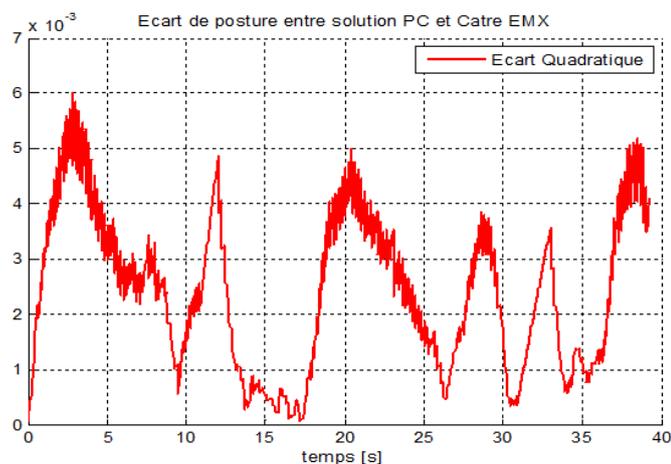


Fig. 5. L'écart entre la solution PC (en temps différé) et du système embarqué (en temps réel).

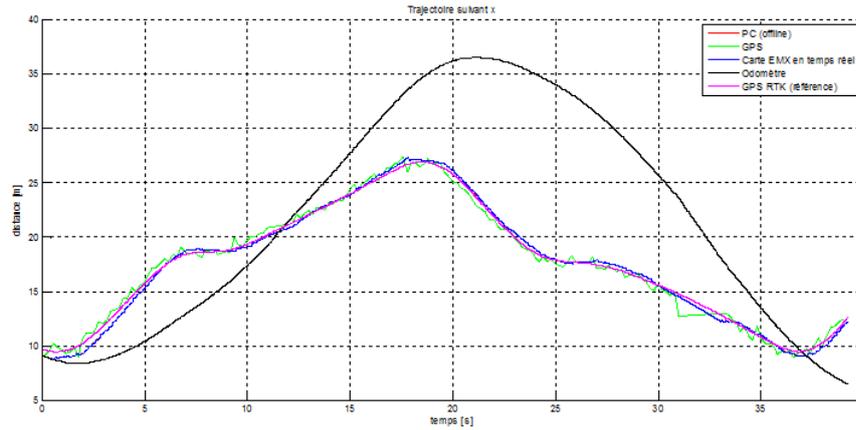


Fig. 6. La trajectoire suivant x . L'estimation en bleu par la carte EMX (en temps réel) et sur PC en rouge (en temps différé). L'odométrie est affichée en noire. Le GPS standard en vert. Le GPS RTK (référence) en magenta.

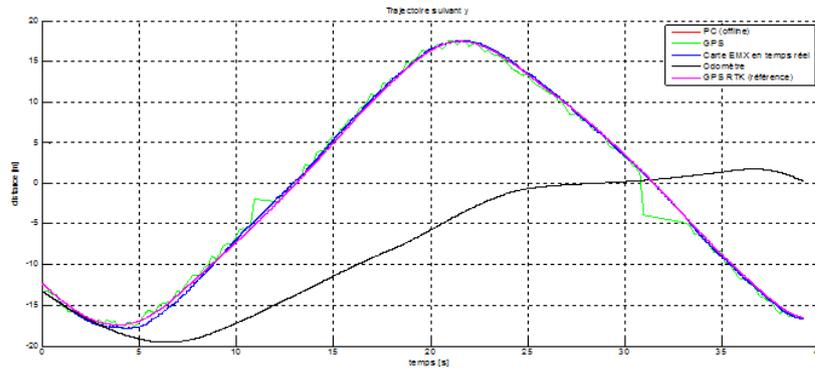


Fig. 7. La trajectoire suivant y . L'estimation en bleu par la carte EMX (en temps réel) et sur PC en rouge (en temps différé), l'odométrie est affichée en noire, le GPS standard en vert. Le GPS RTK (référence) en magenta.

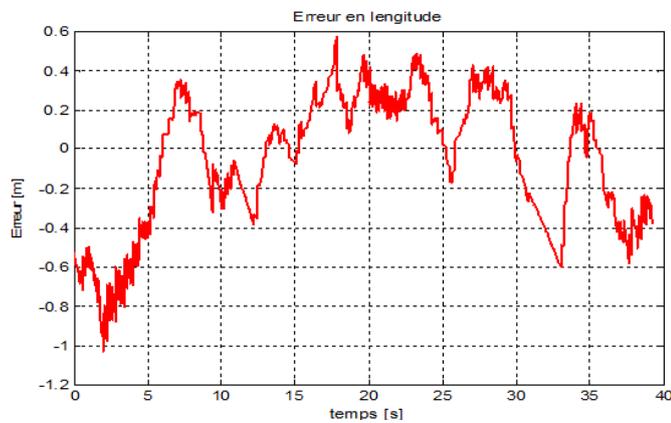


Fig. 8. Erreur en longitude [m].

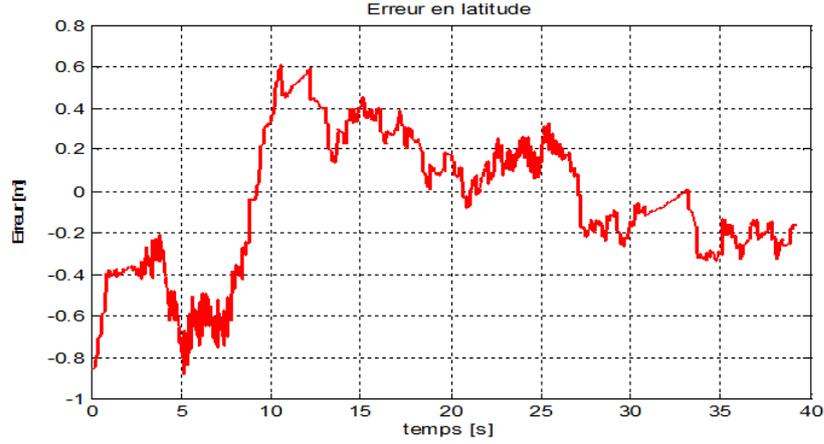


Fig. 9. Erreur en latitude [m].

Les Figs. 8 et 9 montrent les erreurs d'estimation en longitude et latitude respectivement par rapport au GPS RTK (Ground truth), on constate que l'erreur maximale ne dépasse pas la limite de $0.6m$ et afin de quantifier la précision de notre estimateur nous calculons l'erreur moyenne quadratique (Root Means Squart Error) par rapport à la référence comme suit

$$RMSE(\hat{x}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\hat{x} - x_{GT})^2} = 0.3466m \quad (10)$$

$$RMSE(\hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\hat{y} - y_{GT})^2} = 0.3377m \quad (11)$$

Et l'erreur totale de l'estimation

$$EST_{RMSE} = \sqrt{RMSE(\hat{x})^2 + RMSE(\hat{y})^2} = 0.4840m \quad (12)$$

D'après les résultats et le calcul de l'erreur quadratique qui est de l'ordre de quelques dizaine de centimètres, on peut dire que notre estimateur donne de bons résultats.

7. Conclusion

Le GPS RTK offre une information sur la position d'un véhicule avec grande précision (de niveau centimétrique) pour la navigation des robots mobiles à l'extérieur. Mais pratiquement il faut utiliser d'autres capteurs en prenant en compte la détérioration du signal GPS. Dans ce document, nous avons proposé un estimateur d'état (la position et l'orientation) pour un véhicule de type voiture (Car-like), qui se compose de deux blocs, un bloc du fusion des données issues des capteurs disponibles (GPS, odomètre) qui utilise le filtres Kalman étendu et l'autre bloc de navigation à l'estime basé sur Runge-Kutta d'ordre 4.

Les résultats montrent que l'estimateur nous donne des résultats avec une bonne précision, particulièrement pendant l'absence ou la détérioration à court terme de signal du capteur extéroceptif (GPS), ensuite nous avons validé cet algorithme sur un système embarqué (La carte EMX) sous test en temps réel avec l'approche HIL qui comporte à créer un environnement du test qui fait croire au système embarqué qu'il marche avec les entrées et les sorties d'un système réel, alors qu'en réalité il fonctionne avec un environnement virtuel.

REFERENCES

- [1] D. Wang, E. K. Tay, M. Zribi, *Modeling of an AGV for handling heavy container*, 3rd International Conference on Advanced Mechatronics, Japan, pp. 67-72, 1998.
- [2] M. L. O'Connor, *Carrier-Phase Differential GPS for Automatic Control of Land Vehicles*, PhD thesis, Stanford Univ, 1997.
- [3] M. LIDA, M. Kudou, K. Ono, M. Umeda, *Automatic Following Control for Agricultural Vehicle*, AMC, Nagoya, pp. 158-162, 2000.
- [4] B. He, D. Wang, M. Pham, T. Yu, *Position and Orientation Estimation with High Accuracy For A Car-like Vehicle*, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Singapore, 2002.
- [5] A. J. Weinstein, K. L. Moore, *Pose Estimation of Ackerman Steering Vehicles for Outdoors Autonomous Navigation*, Colorado School of Mines Division of Engineering, USA, 2010.
- [6] E. Abbait, D. Powell, *Land-Vehicle Navigation Using GPS*, Proceeding of IEEE, vol.87 no.1, pp. 145-162, 1999 .
- [7] M. GOMEZ, *Hardware-in-the-Loop Simulation*, Disponible en ligne à <http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4024865/Hardware-in-the-Loop-Simulation#>, 2001
- [8] J. Guivant, E. Nebot, S. Baikern, *Autonomous Navigation and Map building Using Laser Range Sensors in Outdoor*, Journal of Robotics system Vol 17, No 10, pp 565-583.
- [9] www.MRPT.org/robotics_datasets.
- [10] Ghi electronics com, *EMX User Manual*, Manuel, Disponible online à www.ghielectronics.com, 2011 .