

Localisation 2D d'un mobile sur une carte numérique précise

Ahmed SELLOUM[†], Eric LE CARPENTIER[‡], David BÉTAILLE[†], François PEYRET[†],

[†]Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Centre de Nantes
Division Métrologie et instrumentation
Section Imagerie et géolocalisation
Route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex, France

[‡]Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (UMR CNRS 6597)
Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, CNRS
1, rue de la Noë, BP 92101, F44321 Nantes Cedex 3, France
(ahmed.selloum|david.betaille|francois.peyret)@lcpc.fr
Eric.Le-Carpentier@ircsyn.ec-nantes.fr

Résumé – On s'intéresse à la localisation (à une précision submétrique) d'un véhicule sur une carte précise, à l'aide d'informations GPS, gyroscopiques et odométriques. Pour le type de carte utilisé, le processus de projection *a posteriori* sur la carte (map-matching) est difficile. On propose une modélisation intégrant les données de la carte, et un algorithme de filtrage bayésien particulière permettant d'obtenir directement un positionnement sur cette carte, en s'affranchissant du lourd calcul de projection. Le fonctionnement est vérifié en simulation.

Abstract – This paper deals with localization of a vehicle on a precise map, by means of GPS, gyroscopic and odometric data. For such a map, posterior projection (map-matching) is difficult. We propose a Markov model that includes map data, such that the estimation of the position on the map by means of a particle filter is obtained directly.

1 Introduction

En général, la localisation d'un mobile dans son environnement est réalisée au moyen d'amers, naturels ou artificiels [1]. Nous nous plaçons dans le contexte de localisation d'une automobile sur la route à l'aide de cartes numériques. Cette problématique donne généralement lieu à un premier processus de localisation, suivi d'un second de map-matching. Pour le premier processus, la littérature comprend de très nombreuses références concernant l'hybridation de centrales inertielle et récepteurs GPS, lâche ou serrée [3] [8]. Pour le deuxième processus, différentes techniques ont été répertoriées par [7] parmi lesquelles les plus avancées mettent à profit non seulement la position mais aussi le cap du véhicule [4]. Le tracking de plusieurs hypothèses en parallèle dans la base de données cartographiques par filtrage particulière est montré dans [5]. Ces travaux utilisent des cartes numériques standard représentant les routes par des polygones.

Les investigations rapportées dans cet article se concentreront sur un système de localisation susceptible de répondre à la fois à l'exigence de précision demandée par les systèmes d'aides à la conduite¹ et aux contraintes du monde de l'automobile. On propose une méthode bayésienne combinant sous contraintes cartographiques les données d'un GPS naturel, d'un odomètre et d'un gyromètre MEMS. Les informations de la

carte sont considérées comme des contraintes du problème, ce qui le rend théoriquement mieux configuré au sens de l'observabilité et peut aussi augmenter la précision de la localisation. La carte développée au sein du LCPC présente une originalité dans la modélisation, car les routes ont été cartographiées à la façon des projets de construction : toutes les voies sont représentées (et non pas uniquement les chaussées séparées), et ce par des clothoïdes (courbes à gradient de courbure constant) et non des polygones approximatifs ; l'exactitude des coordonnées y est submétrique.

D'un point de vue conceptuel, notre technique est proche des travaux de la localisation des mobiles à l'aide de GPS et inertiel et aussi des mesures extéroceptives pour tracking d'objets référencés. Ainsi, l'utilisation du lidar fait l'objet d'intenses activités de recherche particulièrement à l'Université de l'Ohio [11]. La vision en robotique en général, couplée au GPS, est également au centre de nombreux travaux, dans des projets tels CityVIP en France, ou connexes [6] [9] [10].

La première partie de cet article porte sur la modélisation cartographique de la route. Ensuite, on développe le modèle dynamique du système et le filtre bayésien proposé. Enfin, on compare les résultats en simulation obtenus par cette méthode aux résultats obtenus par filtrage de Kalman étendu (EKF).

1. Advanced Driver Assistant System (ADAS)

2 Modélisation 2D de la route

Pour obtenir une représentation de la route plus précise que la représentation des cartes actuelles, nous allons supposer que la carte est représentée géométriquement à la manière d'un projet routier. Chaque voie de circulation est représenté par un ou plusieurs éléments géométriques, de type : ligne droite, virage ou zone de transition. On peut décrire l'axe central de l'élément numéroté m par une clothoïde dont l'équation obéit à la formulation intégrale suivante, où ℓ est l'abscisse curviligne du point (x^m, y^m) ; pour tout $\ell \in [0, L^m]$:

$$\begin{cases} x^m(\ell) &= x_0^m + \int_0^\ell \cos(\tau^m(s)) ds \\ y^m(\ell) &= y_0^m + \int_0^\ell \sin(\tau^m(s)) ds \end{cases} \quad (1)$$

où :

$$\tau^m(s) = \tau_0^m + \kappa_0^m s + \frac{c^m s^2}{2} \quad (2)$$

avec :

- x_0^m et y_0^m les coordonnées du point initial (Est, Nord), pour la clothoïde m ,
- τ_0^m l'orientation au point initial par rapport à l'Est,
- κ_0^m la courbure au point initial,
- c^m la variation de courbure égale à $\partial\kappa^m/\partial s$ (constante), κ^m désignant la courbure,
- L^m la longueur totale.

Pour les systèmes d'aide à la conduite, il est nécessaire de connaître la position du véhicule par rapport aux voies de circulation, la dimension transversale des voies doit aussi être renseignée. Donc, pour chaque élément d'une voie de circulation, les largeurs aux deux extrémités sont connues, et on suppose que la largeur $D(\ell)$ varie linéairement le long de cet élément.

Ainsi, tout point P appartenant à l'élément m a des coordonnées ℓ et d relatives à cet élément (abscisse curviligne et distance algébrique à l'axe de l'élément), coordonnées dites « de Frenet ». Notons que d est positive si le véhicule se trouve sur la partie droite de l'élément lorsqu'on le parcourt dans le sens de circulation.

Après avoir déterminé tous les éléments géométriques qui constituent la route, on distingue, pour chaque élément, quatre types de voisins : en face, précédent, droite et gauche. Pour positionner chaque élément voisin v par rapport à l'élément m , on introduit des attributs qui correspondent aux coordonnées de Frenet de deux extrémités de l'axe de v dans la référence associée à m . Ainsi, on crée un graphe décrivant la nature des liens entre les éléments géométriques et leur positionnement relatif.

Ces informations topologiques intégrées dans la base de données de la carte nous seront utiles comme informations a priori dans la procédure de positionnement du véhicule.

3 Modélisation du système

De façon classique, on estime d'abord l'évolution dans un repère Est-Nord local. Puis un processus de projection (« map-matching ») positionne le véhicule sur la carte. Cependant, la

projection sur une clothoïde n'est pas analytique, ce qui conduit à une approximation numérique coûteuse. Dans [12], les auteurs proposent une modélisation qui permet de ne faire un map-matching que lorsque le véhicule change d'élément géométrique.

On a choisi dans cet article de manipuler directement l'abscisse curviligne ℓ le long de la route et l'écart latéral d sans passer par les coordonnées cartésiennes, de façon à s'affranchir totalement de cette projection. On propose un modèle de Markov dans lequel, pour tout instant n :

- $Z[n]$ désigne le vecteur d'état contenant l'indice $m[n]$ de l'élément courant et une partie continue $[\ell[n], d[n], \psi[n]]$, $\ell[n]$ et $d[n]$ comptés relativement à $m[n]$;
- on dispose des données odométrique $\Delta s[n]$ et gyrométrique $\Delta\psi[n]$;
- on dispose parfois du vecteur $Y[n] = [x^{gps}[n] \quad y^{gps}[n]]$ des mesures GPS .

On se propose d'implanter un filtre particulière de type Bootstrap pour reconstruire en ligne l'état $Z[n]$. Dans ce filtre, il faut exprimer la densité de la loi d'observation $Y[n]|Z[n]$ et simuler suivant la loi de transition $Z[n+1]|Z[n]$. L'équation d'observation s'écrit, pour tout n où le GPS est disponible :

$$Y[n] = h(Z[n]) + w^{gps}[n] \quad (3)$$

w^{gps} est le bruit additif applicable aux points GPS, supposé gaussien, h est la fonction s'écrivant, pour tout $z = [m \ell d \psi]$:

$$h(z) = \begin{bmatrix} x_0^m \\ y_0^m \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} -\sin \tau^m(\ell) \\ \cos \tau^m(\ell) \end{bmatrix} + \int_0^\ell \begin{bmatrix} \cos \tau^m(s) \\ \sin \tau^m(s) \end{bmatrix} ds \quad (4)$$

La densité de la loi d'émission s'écrit donc :

$$P_{Y[n]|Z[n]=z}(y) = P_{w^{gps}[n]}(y - h(z)) \quad (5)$$

Il reste à expliciter la loi de transition. Les coordonnées de Frenet $(\ell[n+1], d[n+1])$ sont définies par rapport à la courbe $m[n+1]$, il faut donc déterminer $m[n+1]$ pour prédire $(\ell[n+1], d[n+1])$. Afin de résoudre ce problème, l'idée de base est d'exprimer la position du véhicule à l'instant $n+1$ en deux étapes.

Dans un premier temps, on exprime la position dans un repère de Frenet intermédiaire associé à l'élément $m[n]$ que l'on a « étendu », comme si le véhicule ne quittait pas cet élément. On note ces coordonnées $(\tilde{\ell}[n+1], \tilde{d}[n+1])$. L'équation d'évolution du cap et des coordonnées de Frenet « intermédiaires » s'exprime en supposant que le véhicule roule sans glissement (le rayon de courbure du trajectoire est constant) et que la portion de l'axe de l'élément $m[n]$, sous l'hypothèse de petit déplacement, sera un arc de cercle de courbure $k_0^{m[n]}(\ell[n]) = k_0^{m[n]} + c^{m[n]} \ell[n]$. Après les calculs préliminaires :

$$\begin{aligned} \Delta S &= (\Delta s[n] + w^s[n]) \operatorname{sinc} \frac{\Delta\psi[n]}{2} \\ \beta &= \psi[n] + \frac{\Delta\psi[n]}{2} - \tau^{m[n]}(\ell[n]) \\ \Delta\tau &= \arctan \frac{\Delta S \cos \beta}{\frac{1}{\kappa^{m[n]}(\ell[n])} + d[n] - \Delta S \sin \beta} \end{aligned}$$

on obtient l'équation d'évolution suivante :

$$\begin{aligned}\psi[n+1] &= \psi[n] + \Delta\psi[n] + w^\psi[n] \\ \tilde{\ell}[n+1] &= \ell[n] + \frac{\Delta\tau}{\kappa^m[n]} + w^\ell[n] \\ \tilde{d}[n+1] &= d[n] + \frac{\Delta S \sin\left(\beta - \frac{\Delta\tau}{2}\right)}{\cos\frac{\Delta\tau}{2}} + w^d[n]\end{aligned}$$

où (w^s, w^ψ, w^ℓ, w^d) sont des bruits blancs qui modélisent les erreurs dues aux capteurs et aux approximations. D'une manière intuitive, on peut appliquer des bruits longitudinaux et transversaux plus conforme à la physique du roulement du véhicule que dans le cas où on modéliserait avec les coordonnées cartésiennes.

Ensuite, en fonction des caractéristiques de l'élément $m[n]$ (longueur, largeur, liens topologiques), la procédure de sélection de l'élément $m[n+1]$, et le re-calcule des coordonnées de Frenet par rapport à cet élément sont purement géométriques (et déterministes), et simples à mettre en œuvre. On distingue 6 cas différents :

le véhicule ne quitte pas l'élément $m[n]$ si $0 \leq \tilde{\ell}[n+1] \leq L^{m[n]}$ et $|\tilde{d}[n+1]| \leq \frac{D^{m[n]}(\tilde{\ell}[n+1])}{2}$. Dans ce cas, on a donc :

$$\begin{cases} m[n+1] &= m[n] \\ \ell[n+1] &= \tilde{\ell}[n+1] \\ d[n+1] &= \tilde{d}[n+1] \end{cases} \quad (6)$$

le véhicule passe à un voisin à droite de $m[n]$ si $0 \leq \tilde{\ell}[n+1] \leq L^{m[n]}$ et $\tilde{d}[n+1] > \frac{D^{m[n]}(\tilde{\ell}[n+1])}{2}$. Dans ce cas, sachant qu'un tel voisin est caractérisé par les coordonnées de Frenet dans le repère de $m[n]$ des points initial I_d et final E_d , soit $\{(\ell_{I_d}, d_{I_d}), (\ell_{E_d}, d_{E_d})\}$, on sélectionne le voisin m_a tel que $\ell_{I_d} \leq \tilde{\ell}[n+1] \leq \ell_{E_d}$. Ensuite, en supposant que les éléments $m[n]$ et m_a ont le même rayon de courbure (on néglige la distance latérale entre eux par rapport au rayon de courbure), on obtient :

$$\begin{cases} m[n+1] &= m_a \\ \ell[n+1] &= \tilde{\ell}[n+1] - \ell_{I_d} \\ d[n+1] &= \tilde{d}[n+1] - D^{m[n]}(\tilde{\ell}[n+1]) \end{cases} \quad (7)$$

où $D^{m[n]}(\tilde{\ell}[n+1])$ est la largeur de l'élément $m[n]$ à l'abscisse curviligne $\tilde{\ell}[n+1]$.

D'une manière analogique on traite les autres cas :

le véhicule passe à gauche si $0 \leq \tilde{\ell}[n+1] \leq L^{m[n]}$ et $\tilde{d}[n+1] < -\frac{D^{m[n]}(\tilde{\ell}[n+1])}{2}$.

le véhicule passe en face si $\tilde{\ell}[n+1] \geq L^{m[n]}$.

le véhicule passe derrière si $\tilde{\ell}[n+1] < 0$.

le véhicule se trouve en dehors de la route si par exemple, il y a un dépassement à droite alors que l'élément $m[n]$ n'a pas de voisin à droite. On considère ce cas comme cas aberrant ce qui nous permet d'introduire les contraintes géographiques sur notre modèle d'évolution.

4 Filtrage

Le filtre particulaire se prête bien à une telle formalisation en deux temps du modèle d'évolution avec un état mixte continu-discret. De plus, les non-linéarités des modèles seront mieux prises en considération que dans un filtre de Kalman étendu. On a implanté un algorithme de filtrage particulaire de type « Bootstrap ». Après avoir approché pour chaque instant n la loi a posteriori de $Z[n]$ conditionnellement au passé de l'observation $\{Y[k], k \leq n\}$ par une nuage de particules, l'élément routier $\hat{m}[n]$ estimé correspond à l'élément majoritaire parmi les particules (maximum à posteriori marginal), les coordonnées de Frenet ($\hat{\ell}[n], \hat{d}[n]$) sont prises en moyenne sur les particules attachées à cet élément (moyenne à posteriori conditionnelle).

5 Simulations

Dans cette partie, on teste le comportement de l'algorithme sur des données simulées de la trajectoire du véhicule sur un site de test du projet européen CVIS à Berlin pour lequel on dispose d'une carte précise. Sur la figure 1, on représente la trajectoire de référence du véhicule qui évolue à une vitesse constante de 50 km/h sur une longueur de 154 m (la courbe en noir) ainsi que les axes des éléments de la route par des courbes en couleur numérotées. Les mesures de l'odomètre et du gyromètre sont simulées à une fréquence de 10 Hz et les mesures du récepteur GPS à une fréquence de 1 Hz. Pour toutes ces données, des bruits sont introduits conformément aux caractéristiques données par les constructeurs. Pour le GPS, le bruit est caractérisé par la loi normale d'écart-type 2 m pour les deux coordonnées. Le bruit sur l'accroissement des données gyrométriques est normal et d'écart-type 3.5 deg/ \sqrt{h} . Enfin, le bruit sur l'accroissement des données odométriques est normal d'écart-type 1.2 m/ \sqrt{h} .

A partir de ces mesures, on estime la trajectoire avec le filtre proposé, et un filtre de Kalman Étendu (EKF) fonctionnant en coordonnées cartésiennes et suivi d'une procédure de « map-matching ». Sur la figure 2, on compare l'erreur en distance entre la trajectoire simulée et les trajectoires obtenues par les 2 méthodes, en moyenne sur 50 simulations des données GPS, gyroscopique et odométrique. On observe que le filtre proposé donne une erreur en distance inférieure à celui de l'EKF. Le taux de bonnes détections de l'élément sur lequel le véhicule se trouve est de l'ordre de 80% pour le filtre proposé et de l'ordre de 70% pour EKF.

6 Conclusion et perspectives

La modélisation proposée est fondée sur une représentation par coordonnées de Frenet associées à l'élément sur lequel roule le véhicule. Cette modélisation permet conjointement la localisation et la projection sur la carte dès la phase de filtrage bayésien par approximation particulaire. Les simulations (carte réelle, trajectoire simulée) semblent montrer le bien-fondé de

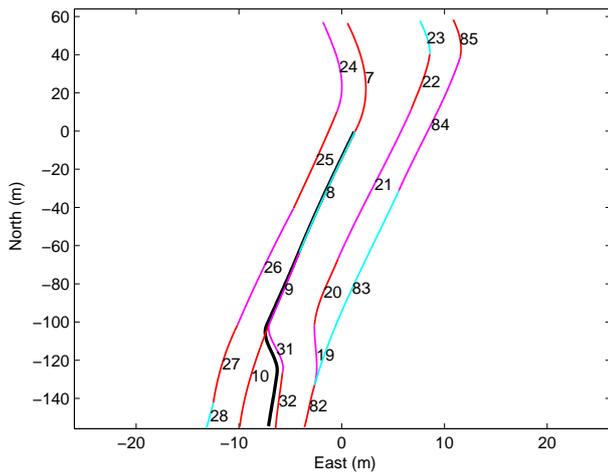


FIGURE 1 – trajectoire du véhicule sur une partie de la carte de site CVIS de Berlin

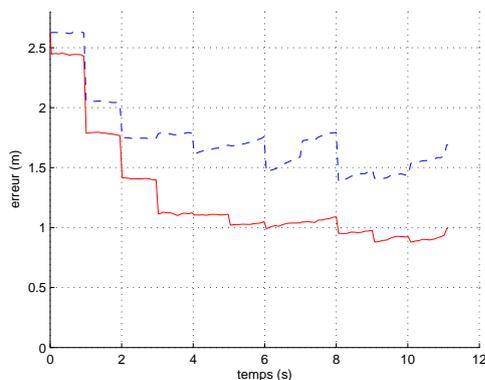


FIGURE 2 – comparaison des erreurs en distance entre trajectoire simulée et trajectoires estimées par EKF (trait pointillé) et filtre particulaire (trait plein)

cette approche. Des expérimentations sur trajectoires réelles sont en cours.

La principale perspective est la prise en compte des mesures de pseudo-distances entre le véhicule et les satellites observés (mesures brutes fournies par le GPS) à la place des coordonnées cartésiennes fournies par la solution de navigation GPS.

Références

[1] P. BONNIFAIT : Contribution à la localisation dynamique d'automobiles : application à l'aide à la conduite. Rapport technique, UTC, 2005. HDR.

[2] D. BÉTAILLE et R. TOLEDO MOREO : Creating Enhanced Maps for Lane Level Vehicle Navigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, soumis en 2009.

[3] Jay A. FARRELL et M. BARTH : *The Global Positioning System and Inertial Navigation : Theory and Practice*. McGraw-Hill, 1998.

[4] C. Fouque et AL : Enhancement of Global Vehicle Localization using Navigable Road Maps and Dead-Reckoning. *In IEEE/ION PLANS Conference*, pages 1286–1291, mai 2008.

[5] F. Gustafsson et AL. : Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(2):425–437, 2002.

[6] J. LANEURIT : *Perception multisensorielle pour la localisation d'un robot mobile en environnement extérieur, application aux véhicules routiers*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2006.

[7] A. Mohammed Quddus et AL : Current map-matching algorithms for transport applications : State-of-the art and future research directions. *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, 15(5):312–328, 2007.

[8] R. ROGERS : *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. AIAA Education Series, 2007.

[9] E. Royer et AL. : Towards an alternative PS sensor in dense urban environment from visual memory. *In British Machine Vision Conference*, 2004.

[10] N. SIMOND et P. RIVES : Trajectory of an Uncalibrated Stereo Rig in Urban Environments. *In IEEE/RSJ Conference*, volume 4, pages 3386–3386, 2004.

[11] A. SOLOVIEV : Tight Coupling of GPS, Laser Scanner, and Inertial Measurements for Navigation in Urban Environments. *In IEEE/ION PLANS Conference*, pages 511–525, mai 2008.

[12] R. TOLEDO MOREO et D. BÉTAILLE : Fusing GNSS, Dead-reckoning and Enhanced Maps for Road Vehicle Lane-Level Navigation. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, à paraître en 2009.