

Localisation dynamique d'un robot mobile : approche par fusion de données d'un problème de filtrage statistique

Dynamic Localization of a Mobile Robot : A Data Fusion Approach for a Statistical Filtering Problem

par O. Devise, C. Doncarli

Membres du GDR TDSI
Ecole Centrale Nantes/Université de Nantes
Laboratoire d'Automatique de Nantes
Unité de recherche associée CNRS 823
1, rue de la Noë, 44072 Nantes Cedex 03

Résumé

On présente une approche de type fusion de données pour un problème d'estimation de la cinématique d'un robot mobile. La nature de la chaîne de mesures (les diverses voies ne sont pas disponibles simultanément et chaque voie, prise isolément, ne permet pas d'observer le système) rend impossible la mise en œuvre d'une procédure centralisée sans hypothèses supplémentaires. On se propose donc d'effectuer des pré-traitements voie par voie pour les synchroniser avant de fusionner les résultats.

Mots clés : Localisation dynamique, Fusion de données, Filtrage décentralisé.

Abstract

The goal of this study is to propose a data fusion approach for the estimation of the kinematics of a mobile robot. The measurement process (multiplexing) makes a centralized processing unefficient without additional hypothesis, and a pre-processing is performed before the fusion.

Key words : Dynamic localization, Data fusion, Decentralized filtering.

1. Introduction

Le problème abordé dans ce papier concerne la localisation dynamique d'un robot mobile muni d'un capteur passif embarqué. De nombreux travaux sur ce sujet ont déjà été proposés mais leurs apports, basés sur une conception centralisée de l'algorithme d'estimation, ne nous paraissent pas concerner directement ce travail et ils ne seront donc pas référencés. En effet, l'objet de cette étude est de montrer l'intérêt d'une approche par fusion de données pour un problème de filtrage statistique où la mise en œuvre d'une méthode centralisée se heurte à une difficulté structurelle difficilement surmontable. Les principales caractéristiques du problème, détaillées au § 2, sont en effet les suivantes : équations d'état et de mesure non linéaires, mesures multivariées non cadencées à voies non disponibles simultanément (sorte de multiplexage), système non observable voie par voie. L'emploi d'une approche centralisée nécessiterait donc de faire certaines hypothèses pour s'affranchir de la non-observabilité liée au multiplexage (par exemple supposer que la trajectoire du mobile est localement rectiligne), puis

de synthétiser un filtre de Kalman étendu (non linéarités) continu à observations discrètes (non cadencement). Plusieurs solutions centralisées de ce type, reposant sur diverses hypothèses simplificatrices, et conduisant à des algorithmes de complexités très différentes, ont été proposées et expérimentées [1], [2] avec des résultats satisfaisants.

On propose ici une solution alternative consistant à effectuer un pré-traitement des voies de mesures (basé évidemment lui aussi sur certaines hypothèses détaillées plus loin) permettant de s'affranchir du multiplexage et du non cadencement, puis à fusionner les résultats des pré-traitements au sein d'un filtre de Kalman étendu. La structure de l'algorithme ainsi défini permet de le classer parmi les méthodes de type « classe 2 faiblement couplé » selon la classification proposée par Clark et Yuille [3]. Les techniques utilisées, essentiellement basées sur des filtres de Kalman, n'ont rien d'original mais le choix de les enchaîner au sein d'une procédure alternant une étape de type décentralisé et une étape de fusion constitue une alternative qui nous paraît novatrice.

Après avoir défini le problème (localisation dynamique d'un robot mobile dans un espace 2D), mis l'accent sur les difficultés structurelles et indiqué l'organisation générale de l'algorithme de fusion (§ 2), on précise la nature des pré-traitements effectués et les hypothèses qui les sous-tendent (§ 3). On indique ensuite le mode de fusion retenu, en insistant sur les problèmes de conversion temps continu/temps discret lors de la mise en œuvre du filtre de Kalman étendu (§ 4) et on présente enfin quelques résultats expérimentaux permettant de vérifier le bien-fondé de cette approche (§ 5). En conclusion on tentera de re-situer l'algorithme présenté dans le contexte de la fusion de données en référence aux problèmes méthodologiques typiquement « traitement du signal » de cette classe d'approches.

2. Position du problème

On s'intéresse au problème de la localisation dynamique d'un robot mobile dans un plan. Les variables de pilotage, correspondant aux informations délivrées par des capteurs mesurant les actions du conducteur, sont la position de l'accélérateur (accélération axiale) et l'angle du volant de direction vis-à-vis du point neutre (vitesse relative de l'évolution du cap).

Les défauts des actionneurs ainsi que les liaisons du robot avec son plan de roulement sont modélisés par des bruits affectant les variables de pilotage et l'étape d'estimation centralisée sera basée sur l'hypothèse de blancheur et d'indépendance de ces perturbations. Naturellement ces propriétés seront loin d'être vérifiées dans la réalité, mais les approximations dues aux diverses linéarisations et aux autres hypothèses ont des effets certainement aussi néfastes et l'ensemble de ces erreurs sera maîtrisé par une majoration adéquate des variances utilisées pour le filtrage.

Par ailleurs, le plan de roulement comporte un ensemble de balises fixes (de positions parfaitement connues) et le capteur de localisation est constitué par une caméra tournante montée sur le mobile fournissant, quand elle est pointée sur une balise, l'angle entre l'axe optique de la caméra et l'axe principal du mobile, l'instant de la mesure et enfin l'identificateur de la balise relevée (capteur SIREM [4]). La caméra est en rotation uniforme par rapport au robot, mais il est évident que les mesures ne sont pas cadencées car les instants de mesure dépendent directement de la cinématique du mobile et de la position des balises. Par ailleurs une des balises peut très bien être momentanément cachée par un intrus. De plus, le fait qu'on ne puisse relever qu'une seule balise à la fois (sorte de multiplexage) alors que le mobile se déplace avec une loi cinématique inconnue rend le problème non observable (voir figure 1).

La possibilité d'obtenir le relevé simultané des trois balises simplifierait grandement le problème (résolution par triangulation) et limiterait les hypothèses à formuler sur le déplacement du mobile entre les instants de mesure. Toutefois la réalité est beaucoup moins favorable : entre deux relevés successifs, la position et l'orientation du mobile ont changé sous l'action des variables de pilotage et des perturbations inconnues, et on rappelle que la mesure du gisement des balises se fait relativement à l'axe du mobile et se trouve donc directement affectée par les perturbations sur son orientation.

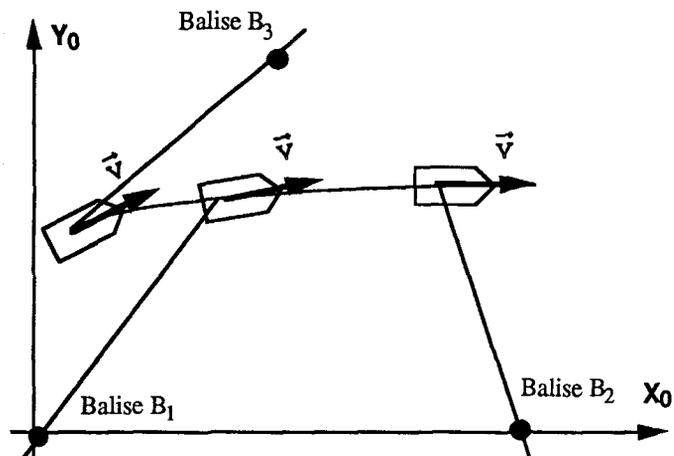


Figure 1. – Position du problème.

La mise en œuvre de toute méthode centralisée (approche déterministe, heuristique ou filtre de Kalman étendu) est donc délicate et nécessite de formuler des hypothèses complémentaires bien choisies.

On propose ici d'explorer plutôt une approche alternative utilisant la fusion de données. Cette méthode est naturellement basée elle aussi, sur certaines hypothèses explicitement contenues dans la forme du modèle retenu pour décrire l'évolution de chaque voie. On commence par préciser les notations et les équations de base du problème.

2.1. ÉQUATIONS DE LA CINÉMATIQUE

Le mobile se déplace sous l'action de deux variables de pilotage naturelles liées à la rotation du mobile et à son accélération, notées :

$$U = \begin{bmatrix} \omega \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } \begin{cases} \omega \text{ vitesse relative de l'évolution du cap,} \\ \gamma \text{ accélération axiale du mobile.} \end{cases}$$

On définit un vecteur d'état X composé des coordonnées cartésiennes absolues du centre du mobile (x, y) , du cap θ , et de la vitesse axiale v (cf. figure 2) :

$$X = [x \ y \ \theta \ v]^T$$

On note N le vecteur des bruits affectant les variables de pilotage (erreurs des actionneurs et défauts des liaisons au sol) et ces bruits seront supposés centrés indépendants et Gaussiens.

$$N = \begin{bmatrix} \nu \\ \mu \end{bmatrix}$$

Les équations de la cinématique s'écrivent donc :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega + \nu \\ \dot{v} = \gamma + \mu \end{cases}$$

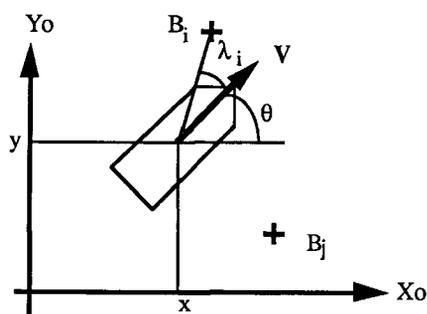


Figure 2. – Notations.

Soit sous forme matricielle :

$$\dot{X} = A[X, U] + B N \quad (\text{éq. 1})$$

$$\text{Avec : } A[X, U] = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ v \omega \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On posera enfin, en notant q_v et q_μ les variances respectives de ν et μ :

$$Q_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_\mu \end{bmatrix}$$

2.2. DISPOSITIF DE LOCALISATION : ÉQUATIONS DE MESURE

Afin de localiser le mobile, on a disposé trois balises de triangulation (dont les positions sont parfaitement déterminées) sur le plan de roulement, de part et d'autre de la trajectoire programmée par les variables de pilotage. Durant chaque tour de la caméra, on relève donc ces balises à des instants non cadencés et on obtient ainsi des mesures angulaires notées $\lambda_i (i = 1, 3)$ (cf. figure 2) liées à l'état X par les équations non linéaires suivantes :

$$\tan(\lambda_i + \beta + \theta) = \frac{y_i - y}{x_i - x} \quad (\text{éq. 2})$$

où x_i et y_i représentent les coordonnées absolues de la balise B_i et β le bruit de mesure.

Un filtre de Kalman étendu (équations d'état et de mesure non linéaires) centralisé sera obligatoirement de type temps continu avec observations à temps discret, pour tenir compte du non cadencement des mesures. Par ailleurs l'utilisation séquentielle des relevés angulaires des balises conduit à un système non observable et, sans hypothèse supplémentaire, il n'est pas envisageable de synthétiser facilement un filtre centralisé.

On propose donc de pré-traiter (voie par voie) les informations fournies par la caméra, de manière à synthétiser les relevements

angulaires de chaque balise à tout instant. En fait, pour une balise donnée, cette procédure peut se décomposer en une étape de prédiction à temps continu débutant à un instant de mesure, suivie d'une étape d'estimation lors de la mesure suivante de la même balise. Il est donc clair que l'outil utilisé pour ce pré-traitement sera un filtre de Kalman à temps continu avec observations à temps discret non cadencées reposant sur un modèle statistique de la mesure considérée, indépendamment de tout contexte. Par ailleurs il n'est pas nécessaire de relever la balise à chaque tour de caméra : en effet l'étape de prédiction se poursuit automatiquement tant qu'il n'y a pas de nouvelle mesure de la balise traitée, de manière totalement transparente, quel que soit l'instant d'arrivée du relèvement.

On fusionnera ensuite les résultats du pré-traitement parallèle des trois balises grâce à un filtre de Kalman étendu à temps continu (du point de vue théorique) utilisant les « mesures » synthétiques issues de l'étape précédente et donc ne présentant plus aucun problème structurel. Il faut insister ici sur le fait que la modélisation voie par voie s'écarte totalement de la réalité, puisqu'elle découple totalement les mesures. Son seul but est, répétons-le, de permettre l'élaboration de mesures synthétiques simultanées (accompagnées de la confiance qu'on leur accorde) destinées à alimenter l'étape de fusion.

Naturellement les essais présentés plus loin proviennent d'une simulation réaliste, c'est-à-dire respectant la structure exacte du phénomène physique et non celle des concepts qui ont permis d'élaborer l'algorithme de localisation.

En notant λ_i^* et σ_i respectivement les estimations des relevés des balises et les écarts-types des erreurs d'estimation fournis par les modules de pré-traitement, le principe de la méthode proposée est présenté figure 3.

3. Pré-traitement

La mise en œuvre d'un filtre de pré-traitement fournissant des estimations à temps continu de chaque relevé de balise passe par le choix crucial d'un modèle statistique (à temps continu) de l'évolution de la grandeur λ (s'agissant d'un traitement voie par voie identique pour chaque balise, l'indice i est omis dans cette partie). Cette contrainte de structure peut parfaitement être considérée comme une hypothèse supplémentaire permettant de contourner la non observabilité de la cinématique du mobile.

3.1. MODÈLE STATISTIQUE DES VOIES DE MESURE

On propose de retenir un modèle de type triple intégrateur [5] dans un but d'équilibre entre l'aptitude à décrire des trajectoires à grandes dynamiques et la simplicité. De plus, le filtre issu de ce type de modèle ne fait intervenir qu'un seul paramètre scalaire qui est le rapport des variances des bruits d'état et de sortie [6] et on verra dans la partie expérimentale que ce rapport peut être très facilement fixé après quelques essais.

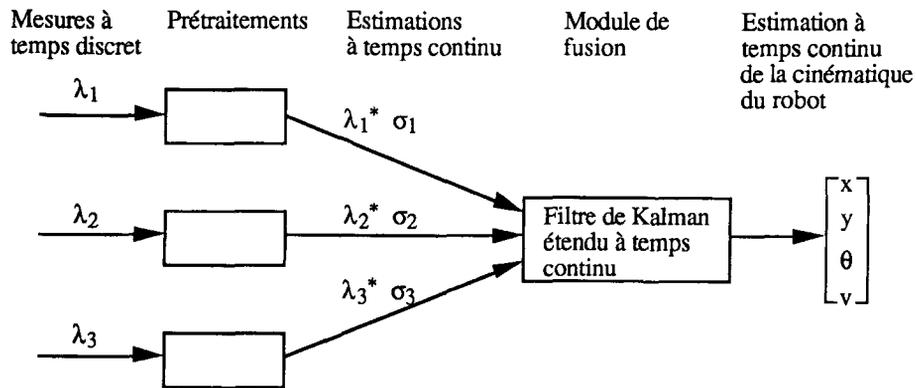


Figure 3. – Algorithme de classe 2 faiblement couplé.

La représentation d'état correspondant à un modèle triple intégrateur à temps continu s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{Z} = A_z Z(t) + V_z(t) \\ \lambda(t) = H_z Z(t) + W_z(t) \end{cases} \quad (\text{éq. 3})$$

$$\text{Avec : } Z = \begin{bmatrix} \lambda \\ \dot{\lambda} \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix}, \quad A_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$V_z(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_z(t) \end{bmatrix}, \quad H_z = [1 \ 0 \ 0], \quad W_z(t) \text{ bruit blanc}$$

$$\text{Var } [V_z(t)] = Q_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q \end{bmatrix} \quad \text{et } \text{Var } [W_z(t)] = r$$

Le bruit $W_z(t)$ présent dans l'équation de mesure (éq. 3) du modèle générateur de $\lambda(t)$ n'est pas équivalent au bruit de mesure β du capteur (éq. 2). C'est plutôt la variance de l'erreur d'estimation de λ issue du pré-traitement qui représentera la puissance du bruit du capteur.

On notera $t = t_k$ les instants de mesure. Le calcul de l'estimation à temps continu de λ se fait classiquement en deux étapes de prédiction et d'estimation (filtre de Kalman linéaire continu/discret) qui sont brièvement rappelées.

3.2. PHASE DE PRÉDICTION

A l'instant $t = t_k$, on dispose de l'estimation $Z(t_k/t_k)$ accompagnée de la matrice de variance covariance d'erreur $P_z(t_k/t_k)$. Entre les instants de mesures t_k et t_{k+1} , on fait une prédiction à temps continu de l'état Z régie par les équations :

$$\begin{cases} \dot{Z}(t/t_k) = A_z Z(t/t_k) \\ \dot{P}_z(t/t_k) = A_z P_z(t/t_k) + P_z(t/t_k) A_z^T + Q_z \end{cases} \quad (\text{éq. 4})$$

Ces équations différentielles sont initialisées respectivement par $Z(t_k/t_k)$ et $P_z(t_k/t_k)$ et elles se résolvent [5] *analytiquement*

(conséquence directe de la simplicité du modèle). On dispose ainsi des grandeurs $Z(t/t_k)$ et $P_z(t/t_k)$ pour tout t compris entre t_k et t_{k+1} .

3.3. PHASE D'ESTIMATION

A l'instant t_{k+1} , on connaît donc la prédiction $Z(t_{k+1}/t_k)$ de l'état accompagnée de $P(t_{k+1}/t_k)$. On peut alors écrire les équations à temps discret donnant l'estimation $Z(t_{k+1}/t_{k+1})$ et $P_z(t_{k+1}/t_{k+1})$ en fonction de la mesure $\lambda(t_{k+1})$;

$$\begin{cases} Z(t_{k+1}/t_{k+1}) = Z(t_{k+1}/t_k) \\ \quad + K_{k+1} [\lambda(t_{k+1}) - H_z Z(t_{k+1}/t_k)] \\ \text{avec } K_{k+1} = P_z(t_{k+1}/t_k) H_z^T \\ \quad [H_z P_z(t_{k+1}/t_k) H_z^T + r]^{-1} \\ P_z(t_{k+1}/t_{k+1}) = P_z(t_{k+1}/t_k) \\ \quad - K_{k+1} H_z P_z(t_{k+1}/t_k) \end{cases} \quad (\text{éq. 5})$$

Ainsi, à chaque instant, on dispose d'une valeur à temps continu λ^* (estimée ou prédite) accompagnée de sa variance σ^2 par inspection de Z et de P .

Du point de vue pratique, le pré-traitement exposé ci-dessus est effectué en parallèle sur les trois voies de mesure et sa mise en œuvre numérique pourra être faite avec une période d'échantillonnage (sorties cadencées) δt , fixée par l'utilisateur en cohérence avec la dynamique du mobile et la programmation du module de fusion. Il est clair que ce choix est arbitraire et indépendant des instants de relèvement de chaque balise.

On insiste enfin sur le caractère linéaire du pré-traitement et sur la simplicité de mise en œuvre des filtres de Kalman due à la structure particulière du modèle intégrateur.

4. Fusion

On va maintenant «fusionner» les sorties de trois modules de pré-traitement au sein d'un filtre de Kalman étendu (non linéarité

des équations). D'un point de vue théorique, l'équation d'état continue (éq. 1) de la dynamique du mobile est donc complétée par l'équation de mesure *multivariable* (à temps continu) suivante :

$$\begin{aligned} \Lambda^* &= \mathcal{H}[X] + W_\Lambda \\ \text{où : } \Lambda^* &= [\lambda_1^* \lambda_2^* \lambda_3^*]^T \end{aligned} \quad (\text{éq. 6})$$

W_Λ représente un vecteur de bruits indépendants de variances respectives σ_i^2 (issues des modules de pré-traitement). Il est clair que cette hypothèse d'indépendance est complètement conjecturale, au même titre que la modélisation triple intégrateur utilisée pour les pré-traitements et ne peut être justifiée qu'*a posteriori* par les performances de la procédure d'estimation de la cinématique.

$$\mathcal{H}[X] = \left[\text{Atan} \left(\frac{y_1 - y}{x_1 - x} \right) - \theta, \text{Atan} \left(\frac{y_2 - y}{x_2 - x} \right) - \theta, \text{Atan} \left(\frac{y_3 - y}{x_3 - x} \right) - \theta \right]^T$$

En résumé, on obtient donc le système continu suivant :

$$\begin{cases} \dot{X} = A[X, U] + B N \\ \Lambda^* = \mathcal{H}[X] + W_\Lambda \end{cases} \quad (\text{éq. 7})$$

La mise en œuvre pratique du module de fusion consiste maintenant à implanter un filtre de Kalman étendu à état continu et mesures cadencées issues des pré-traitements et correspondant à la discrétisation de l'équation précédente avec la période δt .

4.1. PHASE DE PRÉDICTION

Cette étape consiste à intégrer les équations différentielles suivantes entre deux instants de mesure successifs (cadencés et distants de δt).

$$\begin{cases} \dot{X}^*(t) = A[X^*(t), U(t)] \\ \dot{P}(t) = A(t)P(t) + P(t)A(t)^T + Q_x \end{cases} \quad (\text{éq. 8})$$

$$\text{Avec : } A(t) = \left(\frac{\partial A}{\partial X} \right)^T$$

Les initialisations des intégrations et la valeur de X utilisée pour calculer la matrice Jacobienne $A(t)$ sont classiquement issues de l'étape d'estimation précédente.

Par ailleurs, on ne dispose évidemment plus ici d'une solution analytique des équations différentielles et on utilise une procédure d'intégration numérique dont le choix est laissé à l'utilisateur. Dans le cas de cette étude, une simple discrétisation au premier ordre (utilisant la même période δt) a donné toute satisfaction, étant donné que cette période a été choisie suffisamment petite. Les sorties de cette phase de prédiction seront notées :

$$\begin{aligned} X_{k+1/k}^* & \text{ (prédiction de l'état)} \\ P_{k+1/k} & \text{ (matrice de variance-covariance de l'erreur)} \end{aligned}$$

4.2. PHASE D'ESTIMATION

On note l'équation de mesure multivariable discrétisée (période δt) :

$$\Lambda_{k+1}^* = \mathcal{H}[X_{k+1}] + W_{\Lambda k+1}$$

A l'instant de mesure $t = (k+1)\delta t$, $X_{k+1/k}^*$ est la meilleure approximation disponible de X_{k+1} . On développe donc l'équation de mesure au premier ordre au voisinage de $X_{k+1/k}^*$:

$$\Lambda_{k+1}^* \approx \mathcal{H}[X_{k+1/k}^*] + H_{k+1}[X_{k+1} - X_{k+1/k}^*] + W_{\Lambda k+1}$$

$$\text{avec } H_{k+1} = \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial X} \right)_{X=X_{k+1/k}^*}^T$$

D'où, en définissant la pseudo-mesure Ψ_{k+1} :

$$\Psi_{k+1} = \Lambda_{k+1}^* - \mathcal{H}[X_{k+1/k}^*] + H_{k+1}X_{k+1/k}^*$$

On obtient l'équation de mesure suivante :

$$\Psi_{k+1} = H_{k+1}X_{k+1} + W_{\Lambda k+1}$$

Finalement, c'est sur cette dernière équation que sont appliquées les formules classiques de la phase d'estimation du filtre de Kalman :

$$\begin{cases} X_{k+1/k+1}^* = X_{k+1/k}^* + K_{k+1}[\Psi_{k+1} - H_{k+1}X_{k+1/k}^*] \\ \text{avec } K_{k+1} = P_{k+1/k}H_{k+1}^T[H_{k+1}P_{k+1/k}H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1} \\ P_{k+1/k+1} = P_{k+1/k} - K_{k+1}H_{k+1}P_{k+1/k} \end{cases} \quad (\text{éq. 9})$$

où la matrice R_{k+1} , qui reflète la qualité de la reconstruction des angles λ est issue des modules de pré-traitement :

$$R_{k+1} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Cette étape d'estimation est programmée sous forme factorisée U-D [7] de manière à éviter tout problème numérique concernant la symétrie et la positivité de la matrice de variance-covariance de l'erreur.

On dispose ainsi d'un algorithme *temps réel* d'estimation de la dynamique du mobile, obtenu en mettant en œuvre *simultanément* les pré-traitements (éq. 4 et éq. 5) et le filtre principal (éq. 8 et éq. 9).

5. Résultats expérimentaux

5.1. SIMULATION

On se propose d'illustrer le fonctionnement de la méthode décrite par la simulation réaliste suivante :

Le plan est triangulé par trois balises de coordonnées respectives (en mètres) : (0, 0), (25,0), (12.5, 30). La caméra tourne à la vitesse de $\pi/3$ rd/s.

Au début de l'expérience, le mobile est stationné au point de coordonnées (en mètres) : (0,7.5) et on commence par effectuer un tour complet de caméra avant de démarrer.

La période d'échantillonnage utilisée pour simuler et pour estimer la trajectoire est $\delta t = 0.02s$. Ce choix arbitraire d'une période très petite comparée au temps de rotation de la caméra a été effectué pour que la simulation ait pratiquement un caractère « continu » vis-à-vis des mesures, ce qui est conforme à la réalité.

Les commandes programmées par le conducteur sont :

Pour l'accélération axiale (γ) : $5.55 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ pendant 30 secondes (mise en vitesse)
 0 m/s^2 pendant 195 secondes (régime nominal)
 $-5.55 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ (freinage) jusqu'à l'arrêt.

Pour la vitesse relative du cap (ω) : 0

On termine l'expérience par un tour complet de caméra.

Ces commandes, prévues pour provoquer une trajectoire théorique parallèle à l'axe des abscisses, sont en réalité entachées de bruits qui entraînent des évolutions de cap et de vitesse différentes. Les variances des bruits affectant les commandes sont respectivement égales à $2.5 \cdot 10^{-3}$ pour q_ν et $2.5 \cdot 10^{-5}$ pour q_μ .

Le niveau de ces perturbations est tel que la cinématique réelle du mobile est largement modifiée par rapport à la cinématique théorique. On peut constater par exemple sur la figure 4 que la trajectoire réelle (en trait plein) est nettement différente de la demi-droite horizontale d'ordonnée (en mètres) : 7,5.

Enfin, la variance du bruit de mesure β a été choisie, en accord avec les caractéristiques du capteur, égale à 10^{-4} rd^2 .

On rappelle enfin que la structure de la simulation respecte les équations de la cinématique (éq. 1), indépendamment du traitement appliqué ensuite aux données qui en sont issues.

5.2. TRAITEMENT

Les procédures de pré-traitement utilisent un rapport q/r de 10^{-3} et la procédure de fusion utilise des valeurs de variances de $2.5 \cdot 10^{-2}$ pour q_ν et $2.5 \cdot 10^{-4}$ pour q_μ . On précise que les valeurs théoriques ont été largement surévaluées afin de majorer les erreurs dues aux simplifications, linéarisations, et autres hypothèses utilisées lors du traitement, dont on rappelle que la structure repose sur des concepts ne respectant pas la structure réelle.

5.3. RÉSULTATS

On présente figure 4 la trajectoire réelle (trait plein) et la trajectoire estimée (tirets) grâce à la méthode proposée.

Les évolutions temporelles de l'abscisse, de l'ordonnée, du cap et de la vitesse sont ensuite montrées de façon analogue sur les figures 5 à 8.

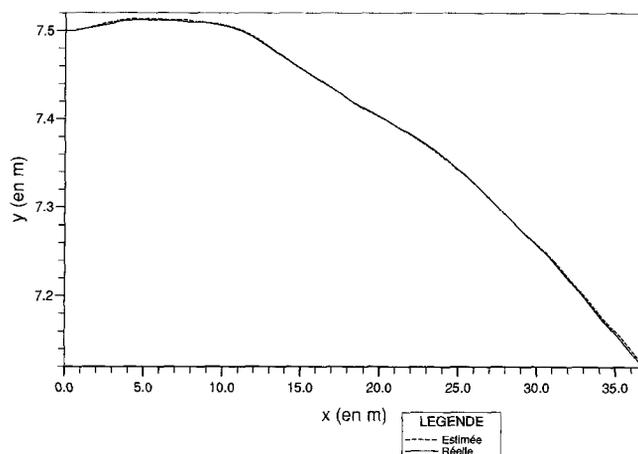


Figure 4. – Trajectoire du mobile.

On peut donc constater le succès de cette approche. L'écart maximum sur l'abscisse est de $7.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, sur l'ordonnée de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, sur le cap de $2 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$ et sur la vitesse de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Les écarts moyens sont de l'ordre du cinquième des valeurs précédentes.

Les seuls paramètres demandés à l'utilisateur sont :

Le rapport q/r pour les pré-traitements.

Les niveaux de bruits sur les commandes et sur la mesure angulaire issue du capteur (dans le but de normaliser les pré-traitements). On recommande de choisir ces valeurs largement supérieures aux valeurs exactes.

Les valeurs courantes des variances des bruits des « mesures » synthétiques utilisées lors de la fusion sont issues des modules de pré-traitements. Ces variances augmentent donc pendant les phases de prédiction, pour se recalibrer, quand une vraie mesure arrive, au niveau de la puissance du bruit du capteur. Cette évolution est intuitivement très satisfaisante car elle ajuste automatiquement le niveau de confiance accordé aux « mesures » synthétiques.

5.4. DISCUSSION

L'approche proposée permet de contourner la difficulté structurelle qui découle de la conception même du capteur. Il s'agit d'une méthode performante ne nécessitant que peu de connaissances *a priori* et d'une mise en œuvre relativement aisée. Elle est toutefois basée sur certaines hypothèses fort éloignées de la réalité, comme par exemple la notion de modèle triple intégrateur et ne doit, pour l'instant, sa justification qu'à son bon comportement sur une simulation réaliste relativement défavorable, puisque la trajectoire simulée s'écarte franchement de la trajectoire théorique. Peut-être serait-il envisageable de mener une étude analytique du niveau de sous-optimalité mais cette question n'a pas encore été abordée. Elle semble toutefois difficile à résoudre car le choix du modèle triple intégrateur est fait indépendamment de tout contexte. C'est simplement la capacité de production de signaux présentant de larges évolutions (comme les mesures de chaque voie) ainsi que

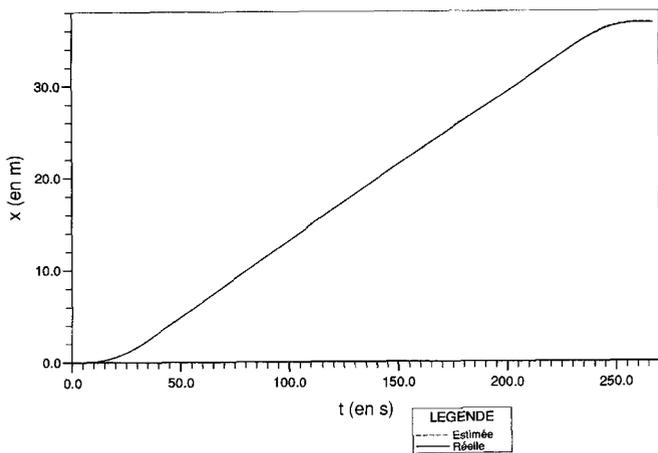


Figure 5. – Evolution de l'abscisse.

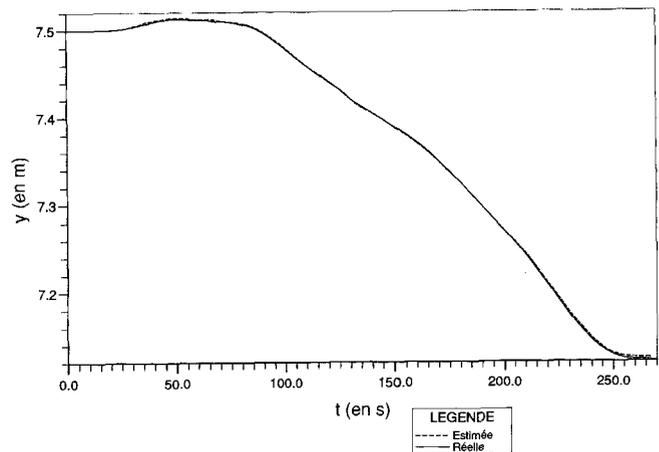


Figure 6. – Evolution de l'ordonnée.

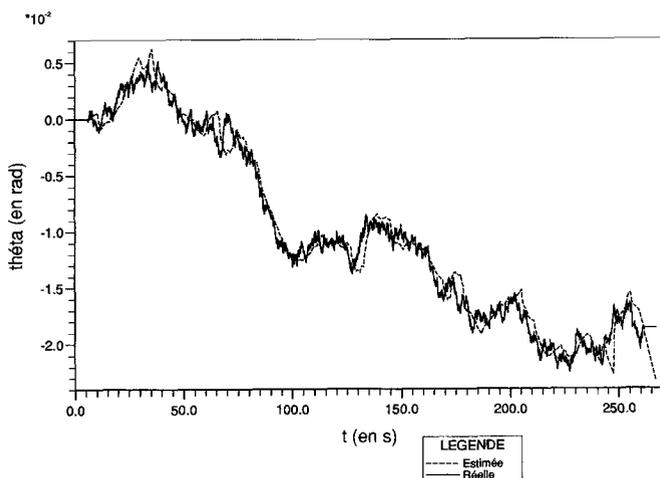


Figure 7. – Evolution du cap.

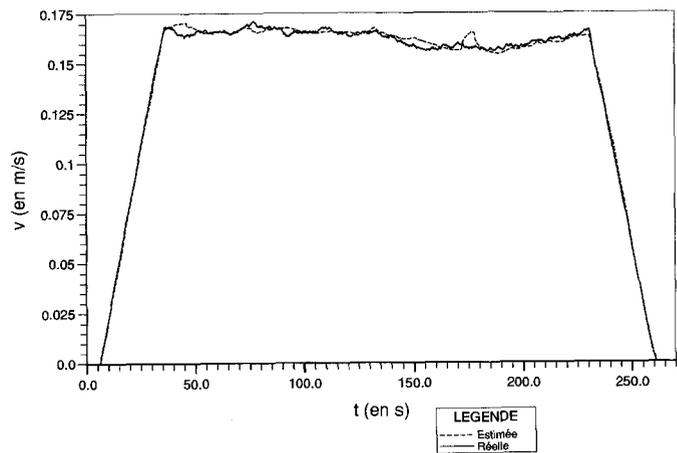


Figure 8. – Evolution de la vitesse.

la simplicité de mise en œuvre des filtres de Kalman linéaires qui en découlent qui nous ont conduits à adopter de tels modèles, et non un quelconque lien avec les équations de la cinématique du mobile.

Une autre caractéristique de la méthode est sa modularité. On peut en effet envisager l'emploi d'autres algorithmes de pré-traitement ainsi que de fusion. Tout simplement, les pré-traitements pourraient être des prédictions linéaires (indépendamment de tout contexte probabiliste) et la fusion pourrait être une triangulation statique, avec estimation *a posteriori* de la vitesse par différence finie. Dans le cas précis de la simulation présentée ici, cette combinaison n'a pas donné satisfaction car trop sensible aux imprécisions sur les « mesures » synthétiques. On a aussi essayé d'utiliser des modèles de type double intégrateur, qui se sont avérés incapables d'engendrer des signaux aux évolutions suffisamment rapides pour maîtriser les dérives locales des filtres de Kalman qui s'en déduisent.

D'un point de vue théorique, trois balises non alignées suffisent à couvrir le plan d'évolution du véhicule, mais il est clair que la précision des estimations de la cinématique va se dégrader sensiblement si le mobile s'éloigne trop du triangle formé par les balises. On peut alors envisager un maillage du plan de roulement par une succession de triangles qui seront automatiquement sélectionnés en fonction de la position estimée du véhicule.

Enfin, cette approche permettrait une extension 3D relativement aisée, par adjonction de « pistes » concernant des relèvements.

6. Conclusions

L'approche proposée ici pour la résolution d'un problème de filtrage mal « conditionné » vis-à-vis d'une technique classique fait appel à des pré-traitements décentralisés pour chaque voie dont

les résultats sont ensuite utilisés au sein d'une procédure globale. C'est en ce sens qu'on peut parler de « fusion » mais il faut rester conscient qu'aucun outil spécifique à la fusion n'a été développé ici. D'ailleurs, pour la communauté, le terme de « fusion » a une signification encore assez vague, allant de l'informatique temps-réel à l'estimation Bayésienne décentralisée.

D'une manière générale la nécessité d'employer des algorithmes de type « fusion » peut être d'ordre structurel (comme ici à cause du multiplexage, mais aussi pour permettre la prise en compte de données de natures foncièrement différentes) ou technologique (réduction du dimensionnement d'un canal de transmission imposant des traitements décentralisés). Dans chaque cas les outils bien connus du traitement du signal peuvent être appliqués avec succès, sans qu'on ne puisse encore dégager de spécificité « fusion ». Pour l'exemple présenté dans ce papier, le problème spécifique consisterait à étudier de manière théorique le biais éventuel et la convergence de la procédure de fusion compte tenu du modèle adopté pour l'évolution des voies de mesure. L'application des outils classiques du traitement du signal ne nous a pas encore permis de résoudre cette question et c'est vers ce type de problème que les efforts doivent porter.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.F. LE CORRE, et G. GARCIA. Real Time Determination of the Location and Speed of Mobile Robots Running on Nonplanar Surfaces. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, mai 1992.
- [2] C. DONCARLI, J.F. LE CORRE, et O. DEVISE. Dynamic Location of a Mobile Robot by Extended Kalman Filter. *IEEE International Symposium on Intelligent Robots and Systems*, IROS'91, Osaka, novembre 2-5, 1991.
- [3] J.J. CLARK et A.L. YUILLE. Data Fusion for Sensory Information Processing Systems. *Kluwer Academic Publishers* Boston/Dordrecht/London, 1990.
- [4] J.F. LE CORRE et F. PEYRET. Sirem : The Absolute Location of Civil Engineering Equipment. *Mechatronic Systems Engineering 1*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1990.
- [5] L. GOERIG et C. DONCARLI. Filtrage-détection autoadaptatif de signaux non stationnaires. *Traitement du Signal*, volume 5, n° 2, 1988, p. 53-63.
- [6] C. DONCARLI, L. GOERIG et P. GUIHENEUC. Adaptive Smoothing of Evoked Potentials. *Signal Processing*, volume 28, n° 1, 1992.
- [7] G.J. BIREMAN. Factorization Methods for Discret Sequential Estimation. *Mathematics in Science and Engineering*, volume 128, Academic Publishers, New York, 1997.

CURRICULUM VITAE

Christian DONCARLI

Christian Doncarli est Docteur-Ingénieur ENSM, Docteur ès Sciences et Professeur d'Université. Ses domaines de recherches regroupent le filtrage statistique ainsi que la théorie de la détection-décision. Le champ d'applications privilégié de ses recherches est l'ingénierie biomédicale.

Olivier DEVISE

Olivier Devise est né le 2 novembre 1967 à Lyon. Il est ingénieur E.N.S.M. et a obtenu son doctorat pour ses travaux réalisés au sein du Laboratoire d'Automatique de Nantes. Ses domaines de recherches sont les systèmes de localisation d'engin mobile, en particulier ceux faisant appel à des techniques de filtrages statistiques.

Il est actuellement Maître de Conférences à l'Institut Français de Mécanique Avancée.

Adresse actuelle : Olivier Devise, I.F.M.A., B.P. 265, F-63175 Aubière Cedex. Tél. (33) 73 28 80 00. Fax : (33) 73 28 81 00. E-mail : devise@ifma.ifma.fr

Manuscrit reçu le 16 juillet 1992.