

AZIMETRIE : APPROCHES RECURSIVE ET GLOBALE, DETECTION DES EVOLUTIONS DU BUT.

J.M. PIASCO, C. DONCARLI

ENSM, Laboratoire d'Automatique de Nantes (UA CNRS 823)  
1, rue de la Noë 44072 NANTES Cedex

Résumé :

On considère le problème, 2 D, de l'estimation de la cinématique d'un mobile non coopératif (but), à partir d'un observateur mobile (lanceur). Pour ce faire l'observateur ne dispose que de mesures angulaires (d'azimut), bruitées et échantillonnées. On s'intéresse plus particulièrement à la détection : seuil fixe, double filtrage, test du Q-Sum. Dans l'approche globale on distingue deux phases : la détection de la rupture de la trajectoire but et une phase de validation de la détection.

I. INTRODUCTION :

Le problème traité ici est celui de l'azimétrie, c'est à dire la localisation d'un mobile non coopératif à partir de mesures bruitées d'azimut effectuées par un observateur, et ce sans information de distance (goniométrie passive). Il s'agit spécifiquement d'un problème de poursuite 2 D que l'on modélisera, dans toute la suite, par la projection de toutes les grandeurs (positions, vitesses, accélérations) sur le plan horizontal absolu Nord-Est. C'est dans ce plan que l'on considérera, éventuellement, divers repères absolus ou relatifs, cartésien, polaires etc...

Le mobile observé (but) a une trajectoire continue par nature même et les équations de la dynamique (cinématique du but) seront continues. Les mesures effectuées sont disponibles à des instants discrets, ce qui conduit à une équation de mesure discrète.

Quelle que soit la méthode d'estimation utilisée (filtrage récursif de type Kalman étendu [1], [2], pseudo observation [3], [4], ou méthodes temps réel non récursives [5]), le choix du modèle est capital, car la forme des équations se répercute immédiatement sur les performances de la méthode.

Après avoir détaillé les difficultés spécifiques du problème dans le § 2 on présentera l'approche récursive dans le § 3. Classiquement on considère que la trajectoire est rectiligne uniforme. Cette hypothèse est en pratique rarement vérifiée, sauf pour des durées d'observations très brèves. On utilisera plusieurs méthodes d'estimation-détection pour tenir compte des évolutions du but. Dans le § 4 on présentera l'approche globale ou l'on distinguera une phase de détection de la rupture de trajectoire suivi d'une phase de validation de la détection. Toutes les solutions proposées pour résoudre ce problème d'azimétrie sont étudiées comparativement et illustrées, au § 5, par des essais en simulation et sur signaux réels.

II DIFFICULTES SPECIFIQUES DU PROBLEME :

On présente figure 1 la configuration du problème.

Summary :

We consider the 2 D problem of the estimation of the motion of a target from disturbed bearing-only measurements. The detection of changes in the motion of the target is particularly studied (fixed threshold, double filter, Q-Sum test). For the global approach two steps are described : detection of the change in the target trajectory, and confirmation of the detection.

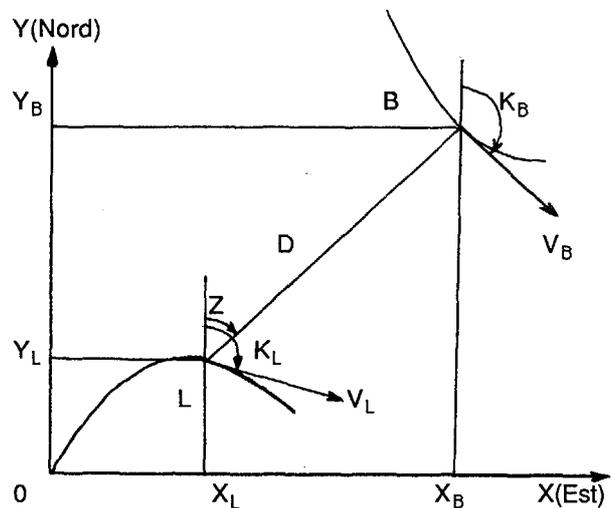


Figure 1

On note :

- L : le Lanceur dont la trajectoire est connue
- B : le but dont on veut estimer la cinématique
- z : l'azimut
- $z_m$  : la mesure bruitée de l'azimut
- $V_L$  et  $K_L$  : la vitesse et le cap du lanceur
- $V_B$  et  $K_B$  : la vitesse et le cap du but.
- D : la distance du lanceur au but
- $X_L, Y_L$  : les coordonnées du lanceur
- $X_B, Y_B$  : les coordonnées du but
- $X_R, Y_R$  : les coordonnées relatives du but / au lanceur.

La mise en oeuvre sans précaution préalable d'une méthode de filtrage linéarisée sur un problème d'azimétrie passive conduit bien souvent à de piètres résultats. On présente ici les raisons primordiales de cet échec.

Dans certaines circonstances (trajectoire lanceur linéaire), le problème n'est pas observable. Dans de nombreux cas, le niveau d'observabilité est faible. Il faudra donc choisir une modélisation qui découple le



mieux possible les composantes observables et non observables de l'état [6].

Le problème d'estimation est intrinsèquement non linéaire. L'utilisation de modules de filtrage linéarisé doit donc comporter un certain nombre de protections, assurant que les termes d'ordre supérieur à un restent raisonnablement petits.

Il n'est pas évident que le modèle stochastique retenu pour la trajectoire du but représente correctement son évolution. On aura tout intérêt à utiliser des "modèles majorants", c'est-à-dire des modèles tels que le spectre de l'accélération réelle soit majoré par le spectre de son modèle [7].

Les bruits de mesure sont parfois bien loin de respecter les hypothèses favorables d'indépendance et de normalité. Un prétraitement du signal interne au capteur peut risquer d'introduire des corrélations risquant, si on n'en tient pas compte, de mettre en difficulté l'algorithme de filtrage.

Pour toutes ces raisons, il est dangereux de supposer, sans précautions, que tout le passé du signal est parfaitement résumé dans l'estimation présente, accompagnée de sa matrice de variance-covariance (filtrage linéarisé). On constate l'insuffisance de telles méthodes employées "en aveugle" lorsque les conditions expérimentales sont peu favorables. La distance estimée peut se mettre à tendre vers zéro, le filtre peut être très lent à recalculer, il peut même décrocher définitivement.

Le but n'est observable que grâce à la conjonction de plusieurs portions de trajectoire du lanceur (chaque portion, séparément, ne permettant pas d'observer le but).

C'est pourquoi, à côté des approches classiques récursives de filtrage linéarisé, on peut envisager de remplacer l'estimation courante (accompagnée de sa matrice de variance-covariance) par une statistique plus complète, équivalente aux observations passées (loi conditionnelle), et plutôt que de chercher une récurrence sur une cette statistique plus complète, ce qui conduirait à un volume de calcul prohibitif, on se propose de conserver l'information initiale du problème, c'est-à-dire la suite des azimuts, depuis l'instant initial, jusqu'à l'instant présent.

Les estimations de la cinématique du but se feront de temps en temps, à la demande de l'utilisateur, mais pas obligatoirement à chaque nouvelle mesure.

Il s'agit là d'une approche dite "temps réel non récursive" qui constitue une alternative au filtrage linéarisé [5].

On se propose de mener en parallèle ces deux approches (filtrage récursif linéarisé "expert" et algorithme temps réel non récursif), qui seront présentées aux paragraphes suivants.

### III. L'APPROCHE RECURSIVE :

Plusieurs modèles ont été envisagés [2], mais celui proposé par AIDALA [6] (modèle polaire modifié) s'est avéré être le plus efficace. Le vecteur d'état utilisé est le suivant :

$$\mathbf{x}^T = [\dot{Z}, \dot{D}/D, Z, 1/D] = [x_1, x_2, x_3, x_4]$$

L'équation de la dynamique s'écrit :

$$\dot{x}_1 = -2x_1x_2 + x_4 [\ddot{X}_R \cos x_3 - \ddot{Y}_R \sin x_3]$$

$$\dot{x}_2 = x_1^2 - x_2^2 + x_4 [\ddot{X}_R \sin x_3 + \ddot{Y}_R \cos x_3]$$

$$\dot{x}_3 = x_1$$

$$\dot{x}_4 = -x_2x_4$$

Ce paramétrage associé à une judicieuse initialisation de la matrice de covariance, conduit à un découplage entre la composante non observable (1/D) avant la première manoeuvre du lanceur, et les trois autres composantes. Le comportement des filtres d'estimation s'en trouve très sensiblement améliorée par rapport à tout autre modélisation.

En pratique la trajectoire du but est rarement rectiligne et uniforme et on constate alors qu'une modification du cap  $K_B$  ou de la vitesse  $V_B$  entraîne la divergence des filtres. Il est par conséquent nécessaire de les modifier pour tenir compte des évolutions du but.

La première méthode prend en compte les variations de cap et de vitesse du but en considérant les deux termes d'accélération  $\ddot{X}_B$  et  $\ddot{Y}_B$  comme aléatoires. Ces termes sont généralement supposés être des bruits blancs centrés de densité spectrale de puissance  $Q$ . La matrice  $Q$  peut être calculée en considérant que les variations de cap,  $\dot{K}_B$ , et de vitesse,  $\dot{V}_B$ , sont des perturbations aléatoires à moyenne nulle non corrélées et de spectres respectifs  $\sigma_{\dot{K}_B}$  et  $\sigma_{\dot{V}_B}$  [2]. Cependant on préférera modéliser de façon plus fine les deux termes d'accélération  $\ddot{X}_B$  et  $\ddot{Y}_B$ . En effet des variations de cap ou de vitesse du but se traduisent généralement par une accélération normale sans doute prépondérante par rapport à l'accélération tangentielle. On considère donc l'accélération du but orthogonale à la vitesse de modèle aléatoire d'écart type  $\sigma_Y$ . Le calcul de la densité spectrale de puissance s'effectue alors à partir de  $\sigma_Y$  de l'estimation courante de la vitesse,  $\hat{V}$ , et de son erreur d'estimation,

$$P_{VV} :$$

$$Q = \sigma_Y^2 [ \mathbf{1} - (P_{VV} + \hat{V} \hat{V}^T) ] / \text{tr} (P_{VV} + \hat{V} \hat{V}^T)$$

La deuxième méthode utilise une modélisation du processus sous "forme filtre" (ARMA). Pour un filtre de Kalman optimal la séquence innovation est une séquence blanche centrée. On met alors en oeuvre l'une des 3 méthodes suivantes de détection utilisant toutes la pseudo-innovation :

- 1. Par comparaison de la variance de la pseudo-innovation à un seuil fixe. Dès que ce seuil est dépassé on réinitialise soigneusement la matrice de variance-covariance de l'erreur d'estimation.

- 2. Filtrage de la variance de la pseudo-innovation par deux filtres : un "passe bas" et un "passe très bas". On fait alors le rapport : variance filtrée par passe bas / variance filtrée par passe très bas et on compare ce rapport à un seuil. L'utilisation du filtre passe bas permet la rapidité à la détection, quant à l'utilisation du filtre passe très bas elle limite le taux de fausses alarmes.



- 3. Détection par test des sommes cumulatives (Q-Sum) : cette méthode est basée sur l'algorithme d'HINKLEY [8]. Soit  $\bar{V}$  la moyenne de la variance  $V$  de la séquence innovation avant rupture, et  $\gamma$  l'amplitude minimum de saut fixée a priori ; on définit alors :

$$S_n = \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V} - \gamma/2)$$

$$m_n = \min_{0 \leq k \leq n} S_k$$

Dès que  $S_n - m_n$  est supérieur à un seuil fixé  $h$ , il y a détection de rupture. Ce test permet pour un temps moyen entre fausse alarme fixé a priori, de minimiser le retard à la détection.

#### IV. L'APPROCHE TEMPS REEL, NON RECURSIVE

Pour les raisons indiquées au § II, les approches récursives peuvent conduire à un décrochage du filtre. C'est pourquoi on envisage des méthodes non récursives [5] dont le principe est le suivant : A l'instant courant (quand l'observateur désire une estimation des éléments du but), on construit un critère qui dépend du vecteur d'état du but à l'instant présent. Divers choix de vecteurs d'état sont possibles et une étude comparative a montré la supériorité du modèle polaire modifié. Ce vecteur d'état permet de reconstruire une suite d'azimuts théoriques, depuis l'instant présent jusqu'à l'instant initial (ou éventuellement jusqu'au début d'une fenêtre d'observation). On calcule dans un critère de moindre carrés (éventuellement pondérés) des différences entre l'azimut reconstruit et l'azimut mesuré. La minimisation de ce critère (dont on peut calculer le gradient analytique) permet alors une estimation du vecteur d'état caractérisant la cinématique du but à l'instant présent. Sous hypothèse gaussienne stationnaire cette méthode correspond au maximum de vraisemblance, et sous hypothèse quelconque, au maximum a posteriori.

La détection des évolutions du but se fera par examen local du résidu, en regard avec la valeur du critère. Dans le cas d'une augmentation significative de la variance de l'écart sur les derniers points de l'horizon de minimisation, on détecte une évolution possible du but. On met alors en oeuvre la minimisation d'un autre critère, incluant dans ses paramètres l'instant d'évolution et les nouveaux paramètres cinématiques du but après giration. L'examen local du résidu de ce nouveau critère permet alors de juger de l'amélioration obtenue vis à vis des résultats issus du critère sans évolution, et donc, de valider la détection.

L'approche temps réel non récursive présentée constitue donc une alternative aux méthodes récursives dont le principal avantage est la robustesse vis à vis des hypothèses sur les bruits et aussi éventuellement vis à vis de l'absence de mesures à certains instants (bien pointés). Par contre, il faut être conscient du volume de calcul important que ces méthodes induisent, et c'est pourquoi il est impensable de vouloir estimer les éléments cinématiques du but à chaque nouvelle mesure. C'est donc de temps en temps (à la demande de l'utilisateur ou avec une périodicité fixée) que l'on effectuera la minimisation du critère, en utilisant naturellement toutes les mesures.

Cette approche non récursive comporte une étape de détection basée sur l'examen local du résidu, et le volume de calcul correspond à l'application de la

théorie du rapport de vraisemblance généralisé n'est pas incompatible avec l'aspect temps réel, puisque la détection n'est effectuée qu'aux instants de minimisation du critère.

Enfin la décision n'est pas immédiatement à prendre après détection, car l'aspect non récursif permet d'envisager une validation lors de la minimisation suivante sous la forme, par exemple, d'une confirmation des nouveaux éléments cinématiques du but après sa giration.

#### V. ESSAIS EN SIMULATION ET EN REEL. COMPARAISON DES PERFORMANCES.

- Approche récursive :

De nombreux essais ont été effectués et ont montré que le test de détection par les sommes cumulatives donne les meilleurs résultats, bien que le test de comparaison de la variance de l'innovation à un seuil fixe donne lui aussi de bons résultats. Quant à la détection par filtres "passe bas" et "passe très bas", le choix des paramètres est fortement conditionné par la configuration des trajectoires du but et du lanceur ; et donc difficile d'utilisation. Parmi les deux méthodes faisant appel à l'adjonction d'un bruit sur l'équation de la dynamique celle où l'on considère l'accélération normale à la vitesse est à retenir quoique largement moins performante que toutes celles faisant appel aux tests de détection.

C'est pourquoi nous présentons figure 2 à 4 les résultats obtenus sur une même simulation par les trois méthodes de détection.

Nous présentons figure 6 les résultats obtenus à partir d'un azimut réel auquel on a fait au préalable subir un prétraitement de type lissage (figure 5...). On notera que la trajectoire estimée est très proche de la trajectoire réelle.

- Approche globale.

On présente figure 7 une simulation de trajectoire avec giration du but. La détection a été validée et la trajectoire estimée correspond à la minimisation du critère comportant l'instant de giration et les éléments cinématiques du but avant et après giration comme paramètres.

#### VI. CONCLUSION :

On a proposé pour résoudre le problème de l'Azimétrie avec rupture deux approches, l'une récursive, l'autre globale. L'ensemble des essais effectués utilisant l'approche récursive a permis de sélectionner deux méthodes de détection (seuil fixe sur la variance de l'innovation et test du Q-Sum). Les critères de choix sont basés sur le fait que ces deux méthodes ne nécessitent l'ajustement que d'un seul paramètre. L'approche globale que l'on retient comporte une étape de détection basée sur l'examen local du résidu suivi d'une étape de validation.

#### REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre de la convention DCAN-ENSM n° C 8148-801-011.

Nous remercions monsieur J.P. ROUSSELOT pour l'aide scientifique qu'il nous a apporté.



REFERENCES

[1] A. GUILBERT, C.A BOZZO, E. SIFFREDI  
 "Caractérisation des mouvements de deux mobiles dans un plan à partir de mesures bruitées échantillonnées sous forme de "bien pointés" d'azimuts".  
 8ème Colloque sur le traitement du signal et ses applications, GRETSI NICE, JUIN 1981.

[2] E. SIFFREDI  
 "Transformations sur les systèmes dynamiques. Modélisation et estimation de la cinématique d'un mobile dans le plan à partir de mesures angulaires bruitées et échantillonnées".  
 Thèse de 3ème cycle, Marseille, Janvier 1982.

[3] J.L. SPEYER, T.L. SONG  
 "A comparison between the pseudo measurement and extended Kalman observers".  
 20th IEEE Conf. on Decision and Control, San Diego, December 1981.

[4] Ph. de LARMINAT, J.M. PIASCO  
 "Pseudo-observations et filtrage non linéaire en Azimétrie".  
 9ème Colloque sur le traitement de signal et ses applications, GRETSI, NICE, Mai 1983.

[5] C. DONCARLI, Ph. de LARMINAT.  
 "Une approche temps réel non recursive de l'azimétrie passive".  
 10ème colloque sur le traitement du signal. GRETSI, NICE, Mai 1985.

[6] V.J. AIDALA, S.E. HAMMEL  
 "Utilization of modified polar coordinates for bearings only tracking".  
 IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC 28 n°3, march 1983.

[7] Ph. de LARMINAT, J.M. PIASCO  
 "Modèles majorants : application au filtrage de trajectoires de mobiles manoeuvrants".  
 8ème Colloque sur le traitement du signal et ses applications GRETSI NICE, JUIN 1981.

[8] D.V. HINKLEY  
 "Inference about the change-point in a sequence of random variables".  
 Biometrika (1970), vol 57, p1-7.

