

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

177



NICE du 16 au 20 MAI 1983

UN ESTIMATEUR DE CINEMATIQUE RESPECTANT
LES CONDITIONS DE FERMETURE
APPLICATION AUX PROBLEMES DE POURSUITE 3D

C. BLONDEL(1) - C. BOZZO(2)
E. SIFFREDI(3)-B. DELLERY(4)-A. GUILBERT(5)- L. PASSERON(6)

(1) DIGILOG (AIX EN PROVENCE) - (2) CSEE (PARIS) - (3) CSEE/CETIA (TOULON)
(4) STUDEC (TOULON) - (5) CAPCA (DCAN TOULON) - (6) SNIAS (CANNES)

RESUME

Les méthodes de modélisation constituent une étape essentielle dans la synthèse des filtres associés aux problèmes de détermination des éléments de cinématique d'une cible manoeuvrante.

Le modèle adopté par la plupart des auteurs (modèle de SINGER) ne rend compte que de façon très imparfaite des caractéristiques de la trajectoire et des lois de mouvement.

Une approche plus systématique a été introduite et développée depuis 1977 par C. BOZZO et C. BLONDEL dans le cadre des travaux effectués au Centre d'Analyse de Systèmes de la DCAN de TOULON (CAPCA). Elle consiste à effectuer les choix fondamentaux relatifs au système de coordonnées (cartésiennes, polaires, cylindriques) et au repère (lié à la plateforme, à l'antenne ou à la trajectoire) à partir de la connaissance de la structure du vecteur d'état imposée par les variables à estimer (position, vitesse, accélération, etc...) les variables de fermeture (équations aux contraintes au premier et au second ordre, etc...) et les variables de pilotage (Q commandabilité du filtre).

On présente les résultats obtenus avec ces estimateurs qui ont été décrits dans une publication effectuée au GRETSI en 1981 sur des problèmes de poursuite 3D en comparant ces résultats avec ceux qui résultent de l'exploitation d'approches plus classiques sur données réelles et sur données simulées.

SUMMARY

Model designing methods are an essential step towards the synthesis of filters associated with the problems of determining the kinematics of a target in motion.

The model selected by most authors (SINGER model) only gives a very incomplete account of both the path characteristics and the laws of motion.

A more systematic approach has been introduced and developed since 1977 by C. BOZZO and C. BLONDEL as part of works carried out by the "Centre d'Analyse de Systèmes" of the DCAN in TOULON (CAPCA). Such an approach consists in taking the fundamental choices relating both to the system of co-ordinates (Cartesian, polar, cylindrical/co-ordinates) and to the reference system (connected with the platform, the antenna or the trajectory) on the basis of the knowledge of the status vector structure required by the variables to be calculated (position, speed, acceleration, etc...), by the closing variables (first and second order stress equations, etc...) and by the control variables (filter Q-controllability).

We present here, the results obtained with these estimators. The theoretical aspect was presented in GRETSI (1981) on three dimensional tracking problems (3D) by comparison with more classical approaches experimented on real data and simulated data.



UN ESTIMATEUR DE CINEMATIQUE RESPECTANT
LES CONDITIONS DE FERMETURE
APPLICATION AUX PROBLEMES DE POURSUITE 3D

1. INTRODUCTION - POSITION DU PROBLEME

La présente publication fait suite à celle du huitième colloque GRETSI 81 [1].

On s'intéresse à la conduite d'un processus supportant un ensemble de senseurs (Radars, télémétries, écartomètres...) permettant d'effectuer une poursuite en trois dimensions. Le travail présenté concerne l'étude de différents problèmes de modélisation en vue de l'estimation des éléments de cinématique d'un mobile à partir de mesures discrètes bruitées.

On fait l'hypothèse que l'on dispose d'éléments d'écartométrie (écart latéral et écart sital) définis par deux angles (entre l'axe "observateur-mobile" et la position instantanée de l'axe caractérisant le dispositif de poursuite angulaire).

Il a été nécessaire dans une première phase d'effectuer un travail d'analyse dans certains domaines (calculs de cinématique, détermination des vitesses gyrométriques, des accélérations cinématiques et des équations aux contraintes...) dans le but de comparer Les équations détaillées des modèles introduits par BOZZO [2], PASSERON [3], PERRIOT-MATHONA [2] et SINGER [6].

Les problèmes que posent la caractérisation du processus (aspects continu-discret, non linéaire, absolu-relatif) et la détermination des principaux critères de choix (choix du vecteur d'état, des variables de pilotage, des conditions de fermeture, des repères de coordonnées, et des équations aux contraintes) ont été traité dans [1], [4], [5], [7] ainsi d'ailleurs que l'élaboration des équations d'évolution du mobile (vitesses gyrométriques, accélérations cinématiques, écarts de poursuite).

On se propose d'analyser les problèmes posés par la modélisation dans le trièdre antenne, et de présenter différents résultats en les comparant avec ceux obtenus avec le modèle de SINGER.

2. - PRESENTATION DU MODELE

2.1 - Processus markovien

Les mesures obtenues par les différents senseurs arrivant de façon synchrone (la valeur de la période d'échantillonnage étant par exemple de 80 ms ou 50 ms), l'équation de mesure du processus markovien est donc par essence discrète.

Par contre, l'équation de la dynamique est directement déduite des équations liées aux lois de cinématique et elle est donc continue.

Ces équations étant non linéaires on obtient un processus markovien non linéaire "continu-discret".

En admettant l'hypothèse de l'additivité des bruits de dynamique et de mesure, il vient :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x,t) + \gamma(t) v(t) & (1) \\ z_k = h(x_k, t) + w_k & (2) \end{cases}$$

(1) Equation de dynamique continue

(2) Equation de mesure discrète

- x(t) vecteur d'état
- z_k vecteur de mesure
- v(t) bruit de dynamique
- w_k bruit de mesure

2.2 - Choix de trièdre

On sait [1] que les équations de la cinématique peuvent être écrites :

- Dans le trièdre lié à l'observateur (modèle de SINGER par exemple).

- Dans le trièdre lié à l'antenne

- Dans le trièdre lié à la trajectoire (modèle de PASSERON).

On montre sans difficulté (cf [1], [5] et [7] que le choix d'un trièdre lié à l'observateur conduit à des difficultés de modélisation tant au niveau des variables de pilotage que pour la représentation de l'équation de mesure.

Le choix du trièdre lié à l'antenne offre certains avantages pour ce qui concerne l'introduction des mesures et la détermination des variables de pilotage.

En effet, les mesures discrètes obtenues par les différents senseurs sont toujours exprimées en coordonnées polaires. C'est ainsi que nous disposons de la distance (D), de l'azimut (A), du site (S), des vitesses de rotation angulaire en latérale (Ω_L), en sitale (Ω_S) et de l'axe de visée (Ω_V).

2.3 - Equations aux contraintes

a) Cas où les écarts de poursuite sont nuls

Les relations liant les composantes de l'accélération $\vec{\Gamma}$ (en latérale, sitale, et sur l'axe de visées) aux vitesses de rotation angulaire ainsi qu'à leurs dérivées, sont les suivantes [1] :

$$\begin{cases} \Gamma_L = -D \dot{\Omega}_L - 2 \dot{D} \Omega_L + D \Omega_S \Omega_V & (3) \\ \Gamma_V = \dot{D} - D(\Omega_L^2 + \Omega_S^2) = D(\dot{\Omega}_D + \Omega_D^2 - \Omega_L^2 + \Omega_S^2) & (4) \\ \Gamma_S = D \dot{\Omega}_S + 2 \dot{D} \Omega_S + D \Omega_L \Omega_V & (5) \end{cases}$$

Ces trois équations constituent les équations aux contraintes liées aux lois de cinématique.

Nous avons également :

$$\Omega_S = \dot{S} \quad (6)$$

$$\Omega_L = -\dot{A} \cos S \quad (7)$$

$$\Omega_V = -\dot{A} \sin S \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Gamma_L = f(D, \dot{D}, \Omega_L, \Omega_S, \Omega_V, \dot{\Omega}_L) \\ \Gamma_V = f_V(D, \Omega_L, \Omega_S, \dot{D}) \\ \Gamma_S = f_S(D, \dot{D}, \Omega_L, \Omega_S, \Omega_V, \dot{\Omega}_S) \end{cases}$$

b) - Cas où les écarts de poursuite ne sont pas nuls

Dans ce cas, l'axe "porteur-mobile" et l'axe de l'antenne ne sont pas confondus. On adopte les conventions suivantes :

ϵ_L écart en latérale ϵ_S écart en sitale

$$\vec{\omega} \begin{cases} \omega_S \\ \omega_V \\ \omega_L \end{cases} \text{ Composantes des vitesses de rotation angulaire de l'axe antenne.}$$

$$\vec{\Omega} \begin{cases} \Omega_S \\ \Omega_V \\ \Omega_L \end{cases} \text{ Composantes des vitesses de rotation angulaire de l'axe "porteur mobile".}$$

Nous avons :

$$\Omega_S = \omega_S - \epsilon_L \omega_V + \epsilon_S \quad (9)$$

$$\Omega_V = \epsilon_L \omega_S + \epsilon_S \omega_L + \omega_V \quad (10)$$

$$\Omega_L = \omega_L - \epsilon_S \omega_V - \epsilon_L \quad (11)$$

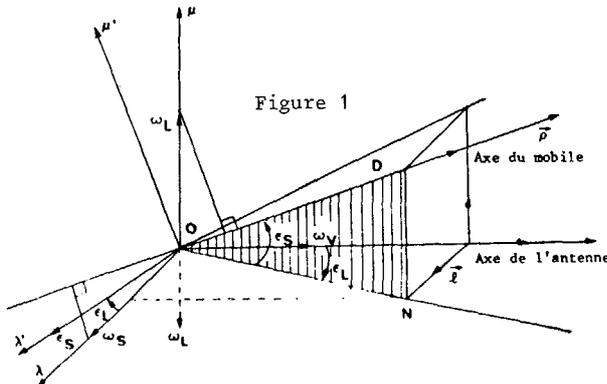
$$\dot{\epsilon}_S = \Omega_S - \omega_S + \epsilon_L \omega_V \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon}_L = -(\Omega_L - \omega_L + \epsilon_S \omega_V) \quad (13)$$

UN ESTIMATEUR DE CINEMATIQUE RESPECTANT
LES CONDITIONS DE FERMETURE
APPLICATION AUX PROBLEMES DE POURSUITE 3D

Soient les composantes de $\vec{\Gamma}$

$$\begin{cases} \Gamma_L = -D\dot{\Omega}_L - 2\dot{D}\Omega_L + \Omega_S^2 (\omega_V + \varepsilon_L \omega_S + \varepsilon_S \omega_L) & (14) \\ \Gamma_V = \dot{D} - D(\Omega_L^2 + \Omega_S^2) & (15) \\ \Gamma_S = D\dot{\Omega}_S + 2\dot{D}\Omega_S + D\Omega_L (\omega_V + \varepsilon_L \omega_S + \varepsilon_S \omega_L) & (16) \end{cases}$$



2.4 - Choix des variables

a) - Introduction

L'élaboration du modèle dans le trièdre lié à l'antenne est donc basée sur les équations aux contraintes définies dans le paragraphe précédent. Il est évident qu'il est souhaitable de déterminer pour l'algorithme d'estimation d'état la représentation d'état la plus simple possible. Les équations d'état étant non linéaires, il sera nécessaire de linéariser la matrice de transition et éventuellement la matrice de mesure. Le premier critère de choix est donc d'obtenir un modèle ne comportant que des non linéarités douces (sommées de multiplications, par exemple), sur les équations de dynamique du processus, même si celles-ci entraînent d'autres non linéarités sur la mesure. Le second critère de choix est de conserver le caractère de linéarité de la matrice des bruits de dynamique.

En effet, la forme des variables d'état, pour un même modèle peut entraîner une non linéarité sur les bruits de dynamique, ce qui complique considérablement la linéarisation et la discrétisation des équations. On note que ce critère de choix est prépondérant sur celui relatif aux variables de pilotage.

b) - Choix des variables

Le choix des variables primaires va être essentiellement influencé par la liste des variables à estimer. Dans le trièdre antenne, les variables primaires sont les coordonnées de position suivantes :

- Distance (D) - Azimut (A) - Site (S)

Dans le modèle proposé, nous aurons quatre variables primaires :

$$\begin{aligned} x_1 &= A \sin S & x_3 &= 1/D \\ x_2 &= A \cos S & x_4 &= S \end{aligned}$$

L'insertion de cosinus et sinus dans les variables d'état simplifie considérablement les équations d'état qui en découlent, ainsi que la forme de l'équation d'évolution de la variable 1/D.

On rajoute une quatrième variable S (Site) dans le cas où l'azimut A peut être nul. Le nombre de variables d'état n'est donc pas minimal.

Les variables de fermeture sont imposées par les équations aux contraintes : ce sont les vitesses gyrométriques. Nous savons qu'il faut connaître les

dérivés de celles-ci en fonction des accélérations pour établir les équations d'état. Au paragraphe 2.3 nous avons vu que seules les vitesses gyrométriques en latérale et en sitale (Ω_L, Ω_S) remplissent ces conditions.

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_L = -2 \frac{\dot{D}}{D} \Omega_L + \Omega_S \Omega_V - \frac{\Gamma_L}{D} & (17) \\ \dot{\Omega}_S = -2 \frac{\dot{D}}{D} \Omega_S - \Omega_L \Omega_V + \frac{\Gamma_S}{D} & (18) \end{cases}$$

Nous sommes donc obligés de construire une "pseudo" vitesse de rotation en fonction de D.

$$\text{soit : } \Omega_D = \frac{\dot{D}}{D} \quad (19)$$

$$\text{et donc : } \dot{\Omega}_D = \frac{\ddot{D}}{D} - \frac{\dot{D}^2}{D^2} \text{ avec } \frac{\dot{D}^2}{D^2} = \frac{\Gamma_V}{D} + (\Omega_L^2 + \Omega_S^2)$$

On aura finalement :

$$\dot{\Omega}_D = -\frac{\dot{D}^2}{D^2} + \Omega_L^2 + \Omega_S^2 + \frac{\Gamma_V}{D}$$

Soient les trois équations de fermeture :

$$\dot{\Omega}_L = -2 \Omega_D \Omega_L + \Omega_S \Omega_D - \Gamma_L/D \quad (20)$$

$$\dot{\Omega}_S = -2 \Omega_D \Omega_S - \Omega_L \Omega_V + \Gamma_S/D \quad (21)$$

$$\dot{\Omega}_D = -\Omega_D^2 + \Omega_L^2 + \Omega_S^2 + \Gamma_V/D \quad (22)$$

Les trois variables de fermeture sont :

$$x_5 = \Omega_L \quad x_6 = \Omega_S \quad x_7 = \Omega_D$$

Ω_V sera donc un terme de commande.

Le choix des variables de pilotage constitue en fait le choix le plus délicat, (caractérisation de celles-ci). Dans le trièdre antenne, nous avons vu que ce sont les composantes de l'accélération $\vec{\Gamma}$ ($\Gamma_L, \Gamma_V, \Gamma_S$) qui s'adaptent le mieux au pilotage du modèle.

Si nous nous reportons au modèle de SINGER, les variables de pilotage (accélérations cartésiennes x, y et z) sont caractérisées de la manière suivante :

$$\dot{x}(t) = -\alpha x(t) + \beta(t) \quad (23)$$

On considère que le mobile est manoeuvrant et que toute manoeuvre qui se traduit par une variation de l'accélération est une perturbation sur la trajectoire à vitesse constante.

Dans le cas du trièdre antenne, nous appliquerons ces mêmes hypothèses sur les composantes de l'accélération $\vec{\Gamma}$.

$$\dot{\Gamma}_L = -a_L \Gamma_L + w_1 \quad (25)$$

$$\dot{\Gamma}_V = -a_V \Gamma_V + w_2 \quad (26)$$

$$\dot{\Gamma}_S = -a_S \Gamma_S + w_3 \quad (27)$$

Les variables de pilotage sont représentées par un processus markovien. Les trois variables de pilotage sont donc :

$$x_8 = \Gamma_L \quad x_9 = \Gamma_S \quad x_{10} = \Gamma_V$$

2.5 - Equations d'état dans le cas où les écarts de poursuite sont nuls.

a) - Modèle N° 1

Vecteur d'état

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= A \sin S \\ x_2 &= A \cos S \\ x_3 &= 1/D \\ x_4 &= S \end{aligned} \right\} \text{variables primaires}$$



UN ESTIMATEUR DE CINEMATIQUE RESPECTANT
LES CONDITIONS DE FERMETURE
APPLICATION AUX PROBLEMES DE POURSUITE 3D

$$\left. \begin{aligned} x_5 &= \Omega_L \\ x_6 &= \Omega_S \\ x_7 &= \Omega_D \\ x_8 &= \Gamma_L \\ x_9 &= \Gamma_S \\ x_{10} &= \Gamma_V \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{variables de fermeture} \\ \text{variables de pilotage} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_1 = A + v_{kA} \\ z_2 = D + v_{kD} \\ z_3 = S + v_{kS} \\ z_4 = \Omega_L + v_{k\Omega_L} \\ z_5 = \Omega_S + v_{k\Omega_S} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} z_1 = (x_1^2 + x_2^2)^{1/2} + v_{kA} \\ z_2 = 1/x_3 + v_{kD} \\ z_3 = x_4 + v_{kS} \\ z_4 = x_5 + v_{k\Omega_L} \\ z_5 = x_6 + v_{k\Omega_S} \end{array} \right.$$

2.6 - Equations d'état dans le cas où les écarts de poursuite ne sont pas nuls.

Equations de dynamique

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{A} \sin S + A\dot{S} \cos S = -\Omega_V x_2 + x_1 x_6 \\ \dot{x}_2 &= A \cos S - A\dot{S} \sin S = -x_5 - x_1 x_6 \\ \dot{x}_3 &= -\dot{D}/D^2 = -x_3 x_7 \\ \dot{x}_4 &= \dot{S} = x_6 \\ \dot{x}_5 &= \dot{\Omega}_L = -2x_7 x_5 + x_6 \Omega_V - x_3 x_8 \\ \dot{x}_6 &= \dot{\Omega}_S = -2x_7 x_6 - x_5 \Omega_V + x_3 x_9 \\ \dot{x}_7 &= \dot{\Omega}_D = x_3 x_{10} + x_5^2 + x_6^2 - x_7^2 \\ \dot{x}_8 &= \dot{\Gamma}_L = -a_L x_8 + w_1 \\ \dot{x}_9 &= \dot{\Gamma}_S = -a_S x_9 + w_S \\ \dot{x}_{10} &= \dot{\Gamma}_V = -a_V x_{10} + w_V \end{aligned}$$

Ces équations d'état ont été établies à partir des équations (6), (7), (8), (20), (21), (22), (25), (26), (27).

Vecteur de mesure Equations de mesure

$$\left\{ \begin{array}{l} z_1 = A + v_{kA} \\ z_2 = D + v_{kD} \\ z_3 = S + v_{kS} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} z_1 = (x_1^2 + x_2^2)^{1/2} + v_{kA} \\ z_2 = 1/x_3 + v_{kD} \\ z_3 = x_4 + v_{kS} \end{array} \right.$$

Si nous appelons u la commande Ω_V on obtient le processus markovien "continu discret".

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,u) + cw_t \\ z_k = h(x_k) + v_k \end{cases}$$

avec :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{dim. } 10) \quad w = \begin{bmatrix} w_L \\ w_S \\ w_V \end{bmatrix} \quad v_k = \begin{bmatrix} v_{kA} \\ v_{kD} \\ v_{kS} \end{bmatrix}$$

On remarque que la matrice des bruits de dynamique C est stationnaire.

b) - Modèle N° 1

La vitesse Ω_V étant considérée comme une commande, on peut insérer les vitesses Ω_V et Ω_S dans le vecteur de mesure.

Les équations de dynamique restant les mêmes, on obtient les équations de mesure suivantes :

Vecteur d'état

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = A \sin S \\ x_2 = A \cos S \\ x_3 = 1/D \\ x_4 = S \\ x_5 = \Omega_L \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} x_6 = \Omega_S \\ x_7 = \Omega_D \\ x_8 = \Gamma_L \\ x_9 = \Gamma_S \\ x_{10} = \Gamma_V \\ x_{11} = \Gamma_S \\ x_{12} = \Gamma_V \end{array} \right.$$

Equations d'état

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{A} \sin S + A\dot{S} \cos S = x_2 x_6 - x_8 \omega_S - x_9 \omega_L - \omega_V \\ \dot{x}_2 &= \dot{A} \cos S - A\dot{S} \sin S = -x_5 - x_1 x_6 \\ \dot{x}_3 &= -\dot{D}/D^2 = -x_3 x_7 \\ \dot{x}_4 &= \dot{S} = x_6 \\ \dot{x}_5 &= \dot{\Omega}_L = -2x_7 x_5 - x_{10} x_3 + x_6 x_8 \omega_S + x_6 x_9 \omega_L + x_6 \omega_V \\ \dot{x}_6 &= \dot{\Omega}_S = -2x_7 x_6 + x_{11} x_3 - x_5 x_8 \omega_S - x_5 x_9 \omega_L - x_5 \omega_V \\ \dot{x}_7 &= \dot{\Omega}_D = x_5^2 + x_6^2 - x_7^2 + x_{12} x_3 \\ \dot{x}_8 &= \dot{\Gamma}_L = -x_5 + \omega_L - x_9 \omega_V \\ \dot{x}_9 &= \dot{\Gamma}_S = x_6 - \omega_S + x_8 \omega_V \\ \dot{x}_{10} &= \dot{\Gamma}_L = -a_L x_{10} + w_L \\ \dot{x}_{11} &= \dot{\Gamma}_S = -a_S x_{11} + w_S \\ \dot{x}_{12} &= \dot{\Gamma}_V = -a_V x_{12} + w_V \end{aligned}$$

Ces équations ont été élaborées à partir des équations (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15) et (16).

Vecteur de mesure Equations de mesures

$$\left\{ \begin{array}{l} z_1 = A + v_{kA} \\ z_2 = D + v_{kD} \\ z_3 = S + v_{kS} \\ z_4 = \epsilon_L + v_{\epsilon L} \\ z_5 = \epsilon_S + v_{\epsilon S} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} z_1 = (x_1^2 + x_2^2)^{1/2} + v_{kA} \\ z_2 = 1/x_3 + v_{kD} \\ z_3 = x_4 + v_{kS} \\ z_4 = x_8 + v_{\epsilon L} \\ z_5 = x_9 + v_{\epsilon S} \end{array} \right.$$

2.7 - Linéarisation du modèle

Il s'agit de calculer :

$$\frac{\partial \phi[\hat{x}(k), k]}{\partial \hat{x}(k)} \quad \frac{\partial h[\hat{x}(k+1/k), k+1]}{\partial \hat{x}(k+1, k)}$$

UN ESTIMATEUR DE CINEMATIQUE RESPECTANT
LES CONDITIONS DE FERMETURE
APPLICATION AUX PROBLEMES DE POURSUITE 3D

Matrice de dynamique linéarisée

$$\frac{\partial \Phi[\hat{x}(k), k]}{\partial \hat{x}(k+1/k)} = \begin{bmatrix} 0 & x_6 & 0 & 0 & 0 & x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_6 & 0 & 0 & 0 & -1 & -x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -x_7 & 0 & 0 & 0 & -x_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -x_8 & 0 & -2x_7 & u & -2x_5 & -x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_9 & 0 & -u & -2x_7 & -2x_6 & 0 & x_3 & 0 \\ 0 & 0 & x_{10} & 0 & 2x_5 & 2x_6 & -2x_7 & 0 & 0 & x_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_V \end{bmatrix} = F_{k/k}$$

3. - RESULTATS DE FILTRES ELABORES

3.1 - Introduction

On présente quelques résultats obtenus avec les trois modèles étudiés ci-dessus, en simulation ou sur passe réelle. :

modèle 1 : modèle sans écartométries et ne comportant pas de termes de vitesses gyrométriques dans le vecteur de mesure.

modèle 2 : modèle sans écartométries et comportant les termes de vitesses gyrométriques dans le vecteur de mesure.

modèle 3 : modèle avec écartométries.

3.2 - Résultats obtenus en simulation avec les modèles 1 et 2

a) - Définition de simulation envisagée

Cette trajectoire correspond à un avion évoluant à vitesse constante (300 m/s) et à altitude constante (50m) et effectuant une portion de ligne droite, un virage à accélération normale constante (5g), puis une portion de ligne droite.

La période d'échantillonnage est de 50 ms, et la passe a une durée de 30 secondes (10 s de ligne droite, 10 s de virage et 10 s de ligne droite).

Les écarts type du bruit de mesure superposés à la trajectoire sont définis de la façon suivante :

$\sigma = 7$ m sur la distance $\sigma = 0,4$ mrd sur l'azimut et le site $\sigma = 1$ mrd/s sur les vitesses gyrométriques.

b) - Résultats obtenus

Sur les figures 1 et 2 on constate que :

- le temps de "recalage" pour le modèle 1 est de 1,8s environ,
- le temps de "recalage" pour le modèle 2 est de 0,5 s environ,

Les "pseudo" vitesses gyrométriques estimées ($\hat{\Omega}_D$) des modèles 1 et 2 se superposent exactement.

Courbes 3 et 4 $\Gamma_L = f(t)$

L'accélération latérale Γ_L élaborée par le filtre relatif au modèle 2 est nettement moins biaisée, et moins bruitée que celle du modèle 1.

Les résultats obtenus avec les accélérations sur l'axe de visée Γ_V des modèles 1 et 2 sont équivalents.

c) - Conclusion

On remarque que le fait d'insérer les vitesses gyrométriques bruitées dans le vecteur de mesure, conduit à des résultats favorables sur les positions, les vitesses et les accélérations estimées. Les seules variables qui ne sont pas améliorées sont $\hat{\Omega}_D$ et Γ_V .

- comme $\hat{\Omega}_D = \frac{\dot{D}}{D}$, il est évident que la mesure vitesses gyrométriques $\hat{\Omega}_L$ et $\hat{\Omega}_S$ n'ajoute aucune information sur $\hat{\Omega}_D$.

- si l'on analyse les équations aux contraintes (3), (4) et (5) on constate que l'accélération Γ_V n'est pas fonction d'une dérivée de la vitesse gyrométrique ($\hat{\Omega}_L, \hat{\Omega}_S$) mais fonction de $\hat{\Omega}_D$.

3.3 - Résultats obtenus sur données réelles (modèles 1 et 2)

a) - Définition de la trajectoire

Il s'agit d'une trajectoire "baïonnette" avec une vitesse moyenne absolue de 120 m/s et une période d'échantillonnage de 80 m s.

b) - Résultats obtenus avec les modèles 1 et 2

On présente sur les figures 5 et 6 les sites bruités et estimés sur 7,04 secondes.

On observe que le site estimé à partir du modèle 1 présente une traînée lors de l'évolution.

Les vitesses gyrométriques latérales estimées sur 7 secondes sont reproduites sur les figures 7 et 8. On remarque le biais apparaissant sur $\hat{\Omega}_L$ et provenant du modèle 1.

c) - Conclusion

Les résultats obtenus sur passe réelle confirment les conclusions établies en simulation : le modèle 2 améliore considérablement la qualité des valeurs estimées obtenues (par rapport au modèle 1).

4. - COMPARAISON AVEC LE MODELE DE SINGER

a) - Introduction

Le modèle envisagé est caractérisé dans l'espace en exploitant le modèle de SINGER appliqué sur chaque coordonnée X, Y et Z, et comporte une linéarisation de la mesure par la méthode de De LARMINAT.

Le trièdre choisi est le trièdre géographique cartésien : l'équation de dynamique est donc linéaire.

On présente les résultats obtenus à partir de la simulation d'une trajectoire baïonnette, le mobile poursuivi évoluant à une vitesse de 400 m/s, à basse altitude (maximum 150 m).

Les caractéristiques des bruits de mesure sont les mêmes que celles de la trajectoire simulée dans le paragraphe précédent (période de 0,05 secondes).

Les réglages choisis sont tels que tous les filtres donnent les mêmes estimations de la vitesse en X, Y et Z. (On peut alors comparer les positions).

b) - Résultats

Les résultats sont présentés sur les courbes 9 à 11. On trouve successivement la position en Z estimée du modèle 3D de SINGER, du modèle 1, et du modèle 2.

On constate que la traînée due à l'évolution de Z est moins importante que celle provenant du modèle 2 ; il en est de même pour le modèle 1 vis à vis du modèle de SINGER.

(Voir figures 9, 10 et 11).

5. - PRESENTATION DES FIGURES

Les positions sont en m, les vitesses en m/s ou rd/s et les accélérations en m/s². Par ailleurs, les échelles des différentes grandeurs sont les mêmes sur les planches de comparaison.

6. - CONCLUSION

L'analyse des problèmes de modélisation, permet de mettre en évidence l'importance du choix du trièdre antenne.

En effet, l'écriture des vitesses gyrométriques ainsi que des écartométries étant directe dans ce trièdre, le modèle élaboré dans le même trièdre a des propriétés



UN ESTIMATEUR DE CINEMATIQUE RESPECTANT
LES CONDITIONS DE FERMETURE
APPLICATION AUX PROBLEMES DE POURSUITE 3D

particulièrement simples.

Ce modèle résulte des travaux effectués par BOZZO, BLONDEL et SIFFREDI en 1979-1980, travaux qui ont permis de développer des modèles de poursuite dont les équations de dynamique ne sont que partiellement non linéaires (processus pseudo ARMA). Il existe par ailleurs, trois variantes possibles pour ces caractérisations :

- Modèle ne comportant pas les écartométries et les vitesses gyrométriques dans le vecteur de mesure.
- Modèle sans écartométries mais comportant les vitesses gyrométriques dans le vecteur de mesure.
- Modèle avec écartométries.

L'évolution de la dynamique (matrice Φ) de ces modèles conduit à des équations non linéaires. Il est nécessaire de définir des procédures de discrétisation "Optimales" ou sous optimales.

Pour résoudre ce problème sur calculateur numérique, nous avons utilisé la méthode d'intégration de RUNGE-KUTTA, celle-ci ne donnant bien entendu que des résultats approchés.

On peut penser que la connaissance exacte des équations intégrées améliorerait considérablement les résultats déjà acquis. L'étude correspondante est actuellement effectuée par une équipe de recherche de l'Université de Toulon.

Une deuxième classe de solution consisterait à implémenter les équations non linéaires (équations de dynamique) sur la partie continue d'un calculateur hybride. Cette solution n'a pas été analysée de façon détaillée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. BOZZO, C. BLONDEL, A. GUILBERT, E. SIFFREDI
"Caractérisation et modélisation de la trajectoire et des mouvements de mobiles manoeuvrants - Application aux problèmes de poursuite 3D" - Huitième colloque GRETSI sur le traitement du signal et ses applications - NICE - Juin 1981.
- [2] D. PERRIOT-MATHONNA
a) "Le filtrage de KALMAN adaptatif. Application à la poursuite de cibles manoeuvrantes". Revue technique THOMSON-CSF Vol 12 n° 1 - Mars 1980.
b) "Contribution à l'étude et à la mise en oeuvre d'algorithmes de filtrage de KALMAN adaptatif". Thèse de Doctorat d'Ingénieur PARIS - Mai 1979.
- [3] L. PASSERON
a) "Modélisation et traitement de trajectoire". Huitième Colloque GRETSI sur le traitement du signal et ses applications - NICE 1 au 5 Juin 1981.
b) "Application du filtrage de KALMAN au contrôle d'attitude de satellite et à la poursuite de cibles manoeuvrantes". Thèse de Doctorat d'Ingénieur NICE - 18 Juin 1981.
- [4] C. BLONDEL
"Analyse de différentes modélisations en vue de l'estimation des éléments de cinématique de la trajectoire d'un mobile manoeuvrant. Etude d'un modèle dans le trièdre antenne". Thèse de 3° cycle - AIX-MARSEILLE - 14 Octobre 1982.
- [5] C. BOZZO
"Le filtrage optimal et ses applications aux problèmes de poursuite". "Techniques et Documentation" - PARIS - 1983.

- [6] R.A. SINGER
"Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Manoeuvring Targets". IEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol AES-6, N° 4 - July 1970.
- [7] C. BOZZO, C. BLONDEL, B. DELLERY, A. GUILBERT, E. SIFFREDI
"A New Adaptive Model for Radar and optronic Trackers". Sixth IFAC Symposium Washington. Identification and System Parameter estimation. 7-11 June 1982.

