

FUSION MULTI-CAPTEURS : UN POINT DE VUE APPLICATIF

F. Dufour

Dept. de Physique Appliquée
Ecole Normale Supérieure
61 Av. du Pdt Wilson
94230 Cachan, France.

B. Malachane*, M. Mariton†

Lab. de Traitement des Images et du Signal
MATRA MS2i, BP 235
38 Bd P. Cezanne
78182 St Quentin-en-Yvelines, France.

Résumé : A partir d'une application pistage, on discute les problèmes de la fusion de données en insistant sur le choix des architectures systèmes.

Abstract : Building on a tracking application, data fusion problems are discussed with a special emphasis on systems architecture selection.

1 Introduction

Ce papier analyse le problème de fusion multi-capteurs pour le pistage d'une cible et s'efforce, à partir de cet exemple, de dégager quelques axes de recherche génériques aux nombreuses applications de la fusion de données. La cible est manoeuvrante et entourée de fausses alarmes (retour de paysage, leurres,...). Dans ce cadre, les objectifs du travail rapporté ici sont doubles : poser le problème du choix d'une architecture de fusion entre capteurs IR de type IRST (Infra Red Search and Track) ou FLIR (Forward Looking Infra Red) du point de vue des contraintes induites sur le système par les choix algorithmiques et montrer l'intérêt d'un capteur IR en complément d'un radar 2D (distance, azimut).

2 Architectures

La fusion de données est une fonction majeure des systèmes d'armes multi-capteurs et cette technologie se trouve de plus en plus souvent au coeur d'applications telles que la surveillance aérienne, la conduite coordonnée des tirs ou les systèmes informatiques de commandement. Une difficulté des

applications de fusion est le caractère multidisciplinaire des techniques mises en jeu. Il faut savoir intégrer dans une même démarche des points de vues différents et amener des spécialistes de calculateurs, communications, algorithmie, ... à parler le même langage. La performance algorithmique est ainsi influencée par un grand nombre de facteurs par exemple la qualité des capteurs (résolution, bruits de mesure, champ,...) ou la puissance de calcul disponible à chaque niveau et les échanges d'information autorisés entre les différents noeuds de fusion.

L'algorithmie sera alimentée par les mesures en provenance des capteurs et on conçoit donc aisément que sa performance soit étroitement liée à la structure des transferts de données dans le système. Ainsi pour chacun des choix possibles au niveau du réseau d'échanges d'information (connexions, bandes passantes, ...) on doit évaluer précisément, après optimisation de l'algorithme associé à la structure considérée, l'amélioration ou la dégradation des résultats - par exemple en terme de courbes caractéristiques probabilité de pistes vraies/probabilité de fausses pistes ou écart-type du pistage -. Mais l'évaluation complète n'est pas basée seulement sur cette performance particulière de l'algorithmie (détection-pistage-identification) Il faut aussi prendre en compte d'autres critères tels que la vulnérabilité aux pannes (y compris celles causées par le combat), la cohérence des données

*actuellement : Institut Supérieur des Affaires, Campus HEC, 78350 Jouy-en-Josas, France

†adresser toute correspondance à cet auteur. Recherches supportées par la DRET (DGA, Paris), contrat no.89/357.



la charge de calcul des différents noeuds ou la saturation du réseau de communication.

Dans la suite on présente, pour la fonction pistage, le point de vue de l'algorithmie en mettant en particulier en évidence l'interaction entre choix algorithmiques et dimensionnement du réseau de communications.

Pour fixer les idées, on pourra penser à un système de défense avec des capteurs optroniques grand champ basse fréquence (IRST) et petit champ grande fréquence (FLIR) et des radars 2D (distance, azimut) ou 3D (distance, azimut et élévation).

L'adjonction de capteurs passifs tels que IRST et FLIR dans des systèmes d'armes qui dépendaient traditionnellement uniquement de radars répond à la sophistication croissante de la menace. De plus en plus souvent il n'existe pas de système à capteur unique qui satisfasse les spécifications de performance.

La fusion de capteurs IR et EM rend le système moins vulnérable aux contres-mesures et à une première frappe qui détruirait un sous-système avant l'attaque principale. De plus les caractéristiques physiques des détections IR et EM se complètent de manière intéressante : un radar de surveillance mesure la distance et l'azimut mais l'élévation est en général difficile à obtenir à cause du fouillis de sol. La qualité des mesures d'azimut et d'élévation d'un capteur IR (fraction de mrd pour un FLIR à quelques mrd pour un IRST) permet un affinage angulaire des pistes issues du radar (la résolution angulaire en EM restant moins bonne, fraction de degré en millimétriques à quelques degrés en centimétrique). Les caractéristiques respectives de capteurs infra-rouge et électromagnétique en présence de contre-mesures font que pour attaquer un système multi-capteurs l'assaillant devrait être capable de leurrer aussi bien et simultanément en IR et en EM.

Pour minimiser la détectabilité du système de défense on pourra concevoir une solution "tout passif" excluant le radar, ou au moins envisager des modes de fonctionnement discrets "radars éteints". On ne dispose alors pas de mesure directe de la distance mais seulement des deux angles actuellement mesurables en IR passif. Cette limitation intrinsèque au capteur passif pose bien sûr problème puisque la situation tactique ne peut être établie utilement que sur la base d'une localisation 3D de l'assaillant. En particulier l'optimisation des feux (tir du mieux placé, allocation des vagues d'un raid, ...) peut difficilement se contenter d'une localisation

purement angulaire (2D) des cibles et il faut alors recourir à la fusion entre plusieurs capteurs passifs pour estimer la distance.

En considérant le cas a priori plus difficile du "tout passif", on présente maintenant trois des principales architectures de fusion et on discute à propos de cet exemple quelques critères d'évaluation (un système opérationnel pour les applications envisagées plus haut incluerait certainement une composante radar, au moins de manière intermittente : portée, tout temps, complémentarité IR/EM vis-à-vis du leurrage, ...).

- Solution 1 : Fusion de pistes

Une première solution est d'effectuer un pistage angulaire 2D pour chaque capteur puis de fusionner ces pistes pour obtenir une estimation 3D de la cible. Cette solution est hiérarchisée avec deux niveaux de traitement, le pistage 2D s'exécutant localement sur un calculateur proche du capteur et la fusion de pistes étant reportée dans le calculateur central.

L'association des pistes est un problème classique d'association de données pour lequel de nombreuses solutions existent selon la manière dont on mesure la "proximité" de deux pistes angulaires [1,2].

L'estimation 3D fournit par cette solution est de nature basse fréquence puisqu'elle travaille avec des lots de pistes. Il n'est donc pas utile d'envoyer les fichiers pistes au noeud de fusion à une cadence très élevée. De plus le filtrage temporel 2D réduira le nombre de fausses alarmes en éliminant celles à localisation aléatoire. Ainsi la demande en bande passante de communication vers le noeud de fusion sera faible.

- Solution 2 : Fusion de plots directe

Une autre solution, dite aussi centralisée, est celle où les mesures brutes ("points chauds" ou "plots") issues des deux capteurs sont envoyées au noeud de fusion où elles nourrissent directement un filtre d'estimation 3D. Le recalage du filtre 3D est non linéaire puisqu'on met à jour un état cartésien à l'aide de mesures angulaires. On utilise alors un filtre de Kalman étendu dont la stabilité doit être soigneusement garantie. Cette solution est optimale du point de vue des performances sur la localisation 3D de la cible puisque les mesures ne subissent aucun pré-traitement. La complexité inhérente à ce filtrage non linéaire induira une charge de calcul importante mais ceci est compatible avec une implantation dans le calculateur du noeud de fu-

sion qui pourra disposer d'une informatique puissante. Les fausses alarmes qui sont inévitablement présentes parmi les données brutes transitent sur le réseau de communication au même titre que les détections correspondants à des cibles réelles. En présence de fond de paysages structurés ceci peut induire un surcharge très significative pour le réseau et cette architecture exigera donc une bande passante de communication élevée, ce d'autant plus qu'il est souhaitable d'envoyer les mesures brutes à une cadence proche de la cadence capteur pour bénéficier pleinement de la qualité du 3D.

- Solution 3 : Fusion de plots indirecte

Une troisième solution est de créer une "pseudo mesure" 3D en triangulant les plots issus des capteurs avant de les injecter indirectement dans le filtre 3D. La triangulation des données brutes génèrent instantanément des erreurs supérieures à la triangulation des mesures filtrées de la solution 1 mais ces erreurs peuvent être modélisés et donc prises en compte par le filtrage temporel 3D. Dans cette solution hiérarchisée les deux niveaux sont implantés dans le calculateur central et on retrouve donc une exigence de bande passante semblable à celle de l'architecture centralisée.

- Solution 4 : Fusion des données capteurs brutes

Cette dernière solution, très peu explorée jusqu'à présent et qui ne sera pas détaillée ici, est celle pour laquelle s'ouvre les plus riches perspectives de recherche. En particulier on pourra alors mettre en oeuvre des détections stéréo par fusion d'images ou exploiter la complémentarité entre capteurs de résolutions différentes.

On s'attache ici, en comparant les solutions 1 et 2 ci-dessus, à mettre en évidence le couplage fort qui existe entre choix algorithmiques et contraintes système. La solution 1 demande une bande passante plus faible au réseau de communication en raison de l'élimination d'une partie des fausses alarmes par le pistage 2D local. En contre-partie ce pré-filtrage fait perdre l'optimalité de l'estimation 3D, qui reste l'apanage de la solution 2, très consommatrice en bande passante. Ces solutions 1 et 2 sont en fait naturellement complémentaires et on a intérêt à les associer : pour un mode de surveillance, avec un capteur couvrant à basse cadence un large champ et des cibles multiples mais à dynamiques "lentes" (grande distance), on recommande la solution "fusion de pistes", alors que la solution "fusion

de plots directe" sera réservée à un mode de poursuite, avec un capteur petit champ à cadence rapide et une cible unique potentiellement manoeuvrante (attaque). Les deux modes pourront se succéder au cours du temps avec, par exemple, ralliement d'un FLIR sur une pisteIRST particulièrement intéressante.

3 Pistage de Cibles Manoeuvrantes

Les architectures des solutions 1 à 3 précédentes ont été implantées dans le cadre d'applications pistage sur cibles manoeuvrantes. La présence de manoeuvres de la cible rend la conception de l'algorithme de pistage délicate et de nombreuses solutions ont été essayées dans la littérature. Le filtre de Kalman classique (non adaptif) peut décrocher lors de la mise en virage de la cible ou diverger sur des fausses alarmes et, dans tous les cas, il produit une performance dégradée (traînage) lors de la manoeuvre. Ceci est particulièrement gênant puisque le décrochage contraint à des ré-initialisations de pistes avec pertes de continuité des attributs et que le traînage gêne les conduites de tir qui doivent attendre pour réacquérir finement la cinématique de la cible. On conçoit donc tout l'intérêt opérationnel d'algorithmes de pistage adaptatifs qui permettraient de conserver une bonne performance même pendant les manoeuvres les plus extrêmes [3,4].

Les systèmes hybrides [5,6] permettent de modéliser naturellement l'occurrence des manoeuvres en terme d'intensité et de fréquence et ils conduisent ainsi à des filtres de pistage capables de s'adapter aux changements de régime des mobiles pistés. En particulier on a mis en oeuvre un algorithme hybride quasi-optimal, le filtre IMM-PDA (Interacting Multiple Models and Probabilistic Data Association, [7]), qui réalise un bon compromis complexité - performance et permet de traiter l'incertitude sur l'association de données générée par la présence de fouillis et de leurrage [8].

Les résultats détaillés sont rapportés dans [9,10] et ici on donne simplement un aperçu des sorties de ce travail, en considérant deux situations, l'une avec deux capteurs IR séparés par une base de triangulation, l'autre avec un radar, 2D ou 3D, et un capteur IR colocalisés.

- Fusion IR/EM :



On balaye le niveau des bruits de mesures (angulaire et distance) pour mettre en évidence le rôle respectif des différentes observations disponibles. Le Tableau 1 ci-après est typique des résultats obtenus.

$\sigma_{ang,EM}$ (mrd)	0	20	50	100	400
Erreur RMS (m)	7.6	79.8	93.1	95	95

Tableau 1 : Erreur de pistage en fonction du bruit angulaire radar

On constate qu'au delà de $40mrd$ la performance cesse de se dégrader. Ceci s'explique par la présence des mesures IR : le filtre pondère les mesures disponibles selon leur qualité et l'estimation est en fait produite en utilisant le radar presque exclusivement pour la distance et l'IRST pour les angles. Ceci nous conduit à penser qu'associer un capteur IRST à un radar 2D est une solution plus performante qu'un radar 3D seul et aussi performante (et moins coûteuse) que l'association IR-radar 3D.

- Fusion IR/IR :

On a montré la faisabilité d'une poursuite 3D précise par association des mesures passives de deux FLIRs. Pour traiter les manoeuvres, on a tout d'abord essayé de faire fonctionner l'IMM avec les modèles couramment proposés dans la littérature, c'est-à-dire position-vitesse-accélération et position-vitesse selon que la cible manoeuvre ou ne manoeuvre pas. Cet essai n'a pas été fructueux et il apparaît en fait que l'IMM, comme tout algorithme à base de modèles, à besoin d'une modélisation précise pour bien fonctionner. Grâce aux modèles de la manoeuvre que l'on a proposé, un algorithme de pistage a pu être mis au point qui "gomme" presque complètement le trainage induit par la manoeuvre. Ces travaux se poursuivent actuellement pour traiter le cas de la fusion entre capteurs imageurs et capteurs non imageurs.

4 Références

[1] Janssens, T.J., McAllister, D.F., et Prodmore-Brown, D.C., Testing track initiation algorithms that fuse 2D tracks, Proc. SPIE, vol.1096, Signal and Data Processing for Small Targets, 1989, 284-297.

[2] Malachane, B., Fusion numérique de capteurs homogènes : application à la triangulation passive, MATRA MS2i, 1990.

[3] Bar-Shalom, Y., and Fortman, T.E., Tracking and Data Association, Academic Press, New York, 1988.

[4] Blackman, S.S., Multiple Target Tracking with Radar Applications, Artech House, Dedham, 1986.

[5] Sworder, D.D., Control of systems subject to sudden changes in character, Proc. IEEE, vol.64, 1219-1225, 1976.

[6] Mariton, M., Jump Linear Systems in Automatic Control, M. Dekker Inc., New York, 1990.

[7] Blom, H.A.P., A sophisticated tracking algorithm for ATC surveillance data, Proceeding of the International Radar Conference, Paris, France, Mai 1984.

[8] Houles, A., and Bar-Shalom, Y., Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, AES-25, 176-188, 1989.

[9] Dufour, F., et Mariton, M., Tracking a 3D maneuvering target with passive sensors, à paraître IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Juillet 1990.

[10] Mariton, M., Fusion multicapteurs et pistage de cibles manoeuvrantes, Revue Scientifique et Technique de la Défense, vol.3, no.9, 13-29, 1990.