

Auto-localisation d'un véhicule sous-marin exploratoire quadrillant une zone

Manon BORGETTO¹, Claude JAUFFRET¹, Vincent RIGAUD²

¹Laboratoire SIS/GESSY

Université de Toulon et du Var, Avenue de l'Université, BP 132, 83957 La Garde Cedex, France

²IFREMER centre de Toulon/La Seyne

Service DNIS/SM, Zone portuaire de Brégaillon, BP 330, 83507 La Seyne sur Mer Cedex, France

Manon.Borgetto@univ-tln.fr,

Claude.Jauffret@univ-tln.fr,

Vincent.Rigaud@ifremer.fr

Résumé – Cet article décrit une méthode originale de localisation d'un engin sous-marin. Celui-ci est équipé de capteurs de cap et de vitesse et explore une zone d'intérêt à l'aide d'une caméra embarquée. La méthode est détaillée sur un exemple simple puis généralisée. Enfin, des résultats prouvant son efficacité sont présentés.

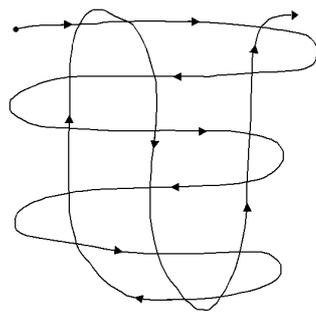
Abstract – This article presents an original method to localize an underwater vehicle. It is equipped by a speed and angle sensors and explores a zone of interest thanks to an attached camera. The method is first detailed on a basic example, and is then generalized. Finally, some results proving its efficiency are presented.

1 Position du problème

Parmi les missions confiées à l'Ifremer, l'exploration d'une zone par caméra embarquée nécessite d'estimer la trajectoire du porteur sous-marin (exemple d'engin figure 1(a): le Remotely Operated Vehicle -ROV- Victor 6000 d'Ifremer [1]) à partir des seules mesures de cap et de vitesse. Les trajectoires



(a) ROV Victor 6000



(b) Trajectoire type du ROV

FIG. 1: Engin sous-marin (ROV Victor 6000) et trajectoire type lors d'une exploration d'une zone d'intérêt

sont en général du type de celle donnée en figure 1(b). Elles aident à la reconstruction de la cartographie de la zone d'intérêt par l'intermédiaire de mosaïques d'images [2]. Le problème sous-jacent est celui de l'estimation de la trajectoire du porteur lorsque l'on sait qu'il existe des lieux géométriques par lesquels le véhicule passe deux fois, par exemple matérialisé par un amer artificiel déposé durant la plongée.

L'objectif de ce papier est de proposer une méthode originale d'estimation d'une telle trajectoire.

Insistons sur le fait que les positions extrêmes de la trajectoire de l'engin sous-marin sont supposées estimées avec une précision donnée, sur la base du retour sur l'amer pré-cité.

2 Modélisation

2.1 Mesures

Les mesures disponibles sont :

- des données de cap et de vitesse (bruitées)
- de couples d'instants où l'engin repasse au même endroit (supposés non-bruités)

2.2 Données de cap et de vitesse

Les mesures bruitées de cap et de vitesse sont effectuées respectivement par un gyrocompas et un loch-Doppler. Les bruits de mesure sont supposés additifs, centrés, gaussiens, indépendants dans leur ensemble et mutuellement indépendants. Soit c_k et v_k les cap et vitesse vrais à l'instant de mesure t_k , et \tilde{c}_k et \tilde{v}_k les cap et vitesse mesurés à l'instant t_k . On a :

$$\begin{aligned}\tilde{c}_k &= c_k + \varepsilon_{c_k} \\ \tilde{v}_k &= v_k + \varepsilon_{v_k}\end{aligned}\quad (1)$$

2.3 Données de recalage

Ce que nous appelons données de recalage sont des couples d'instants où l'engin repasse par un même lieu (par exemple au-dessus d'un même rocher). Ils sont déterminés en pratique par les images.

2.4 Modélisation des trajectoires

Soit $X_k = (x_k, y_k)^T$ la position de l'engin à l'instant de mesure t_k . Les trajectoires sont assimilées à des lignes polygonales (segments de droite entre deux instants de mesure) :

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + (t_k - t_{k-1})v_{k-1} \sin c_{k-1} \\ y_k &= y_{k-1} + (t_k - t_{k-1})v_{k-1} \cos c_{k-1} \end{aligned} \quad (2)$$

3 Méthode proposée : principe sur un exemple simple

Implicite, il s'agit d'estimer le paramètre

$$\theta = [X_2^T \quad \dots \quad X_k^T \quad \dots \quad X_{N-1}^T]^T \quad (3)$$

(X_1 et X_N étant connus ou préalablement estimés), à partir des mesures \tilde{c}_k et \tilde{v}_k définies pour $k = 1..N - 1$ par :

$$\begin{aligned} \tilde{c}_k &= c_k(\theta) + \varepsilon_{c_k} = \arctan\left(\frac{x_{k+1} - x_k}{y_{k+1} - y_k}\right) + \varepsilon_{c_k} \\ \tilde{v}_k &= v_k(\theta) + \varepsilon_{v_k} = \frac{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}}{T_k} + \varepsilon_{v_k} \end{aligned} \quad (4)$$

La méthode du maximum de vraisemblance [4](sous hypothèse gaussienne), bien que séduisante, est inenvisageable ici du fait de la dimension de θ . Aussi proposons-nous l'alternative suivante : étant données les deux positions extrêmes (positions initiale et finale), l'idée de base est de fusionner une trajectoire à l'estime "aller" et une trajectoire à l'estime "retour" (c'est-à-dire en parcourant les caps et vitesses en sens rétrograde). Cette démarche est celle des lisseurs par maximum de vraisemblance dans les systèmes linéaires [3].

3.1 Estimation aller (forward)

Soit $\hat{X}_{k|k}^+ = (\hat{x}_{k|k}^+, \hat{y}_{k|k}^+)^T$ la position estimée à l'instant t_k , connaissant les $(k - 1)$ premiers caps et vitesses. Les positions estimées sont calculées grâce à l'équation (2), en remplaçant c_{l-1} et v_{l-1} par respectivement \tilde{c}_{l-1} et \tilde{v}_{l-1} .

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k}^+ &\triangleq x_0 + \sum_{l=1}^{k-1} (t_l - t_{l-1})\tilde{v}_{l-1} \sin \tilde{c}_{l-1} \\ \hat{y}_{k|k}^+ &\triangleq y_0 + \sum_{l=1}^{k-1} (t_l - t_{l-1})\tilde{v}_{l-1} \cos \tilde{c}_{l-1} \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 Estimation retour (backward)

Soit $\hat{X}_{k|N-k}^- = (\hat{x}_{k|N-k}^-, \hat{y}_{k|N-k}^-)^T$ la position estimée à l'instant t_k , connaissant les $(N - k)$ caps et vitesses en partant du point final. En utilisant une fois de plus l'équation (2), on obtient :

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|N-k}^- &\triangleq x_N - \sum_{l=k}^{N-1} (t_l - t_{l-1})\tilde{v}_{l-1} \sin \tilde{c}_{l-1} \\ \hat{y}_{k|N-k}^- &\triangleq y_N - \sum_{l=k}^{N-1} (t_l - t_{l-1})\tilde{v}_{l-1} \cos \tilde{c}_{l-1} \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 Débiaisage

Les biais et les variances théoriques des navigations à l'estime "aller" et "retour" sont facilement calculables. Nous donnons ci-dessous les formules pour les positions aller (les formules pour les positions retour sont de la même forme). Nous rappelons que $\mathbf{E}[\sin \tilde{c}_{l-1}] = e^{-\frac{\sigma_c^2}{2}} \sin c_{l-1}$.

$$\begin{aligned} b_x(k) &= \sum_{l=1}^k (t_l - t_{l-1})v_{l-1} \sin c_{l-1} [1 - e^{-\frac{\sigma_c^2}{2}}] \\ b_y(k) &= \sum_{l=1}^k (t_l - t_{l-1})v_{l-1} \cos c_{l-1} [1 - e^{-\frac{\sigma_c^2}{2}}] \\ \mathbf{Var}[\hat{x}_k] &= \sum_{l=1}^k \left[\frac{v_{l-1}^2}{2} (1 - e^{-\sigma_c^2} + 2 \cos 2c_{l-1} \sinh \frac{\sigma_c^2}{2} e^{-3\sigma_c^2/2}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_v^2}{2} (1 - \cos 2c_{l-1} e^{-2\sigma_c^2}) \right] (t_l - t_{l-1})^2 \\ \mathbf{Var}[\hat{y}_k] &= \sum_{l=1}^k \left[\frac{v_{l-1}^2}{2} (1 - e^{-\sigma_c^2} - 2 \cos 2c_{l-1} \sinh \frac{\sigma_c^2}{2} e^{-3\sigma_c^2/2}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_v^2}{2} (1 + \cos 2c_{l-1} e^{-2\sigma_c^2}) \right] (t_l - t_{l-1})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Pour débiaiser les trajectoires aller et retour, il suffit de remarquer que l'espérance est donnée par la formule :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[\hat{x}_{k|k}^+] &= x_0 + \sum_{l=1}^k \mathbf{E}[\tilde{v}_{l-1}] \mathbf{E}[\sin \tilde{c}_{l-1}] \\ &= x_0 + \sum_{l=1}^k v_{l-1} \sin c_{l-1} e^{-\frac{\sigma_c^2}{2}} \end{aligned} \quad (8)$$

Il est alors possible de débiaiser simplement les abscisses estimées (on procède de la même façon pour les ordonnées) en posant

$$\tilde{x}_{k|k}^+ \triangleq e^{\frac{\sigma_c^2}{2}} \hat{x}_{k|k}^+ + (1 - e^{\frac{\sigma_c^2}{2}}) x_0 \quad (9)$$

On vérifie que $\mathbf{Var}[\tilde{x}_{k|k}^+] = \mathbf{Var}[\hat{x}_{k|k}^+] e^{\sigma_c^2}$.

NB : L'hypothèse de gaussianité des bruits additifs est indispensable ici.

3.4 Estimation aller-retour (forward-backward). Méthode dite d'auto-estimation

L'idée de départ de la méthode proposée ici est de fusionner les estimés "aller" avec les estimés "retour", après avoir débiaisé.

À un chaque instant, les caps et vitesses mesurés précédant cet instant et les caps et vitesses suivant cet instant sont indépendants. Ainsi, les deux estimés débiaisés, l'aller $\tilde{X}_{k|k}^+$ et le retour $\tilde{X}_{k|N-k}^-$ sont indépendants. Nous pouvons dire que le vecteur $\begin{pmatrix} \tilde{X}_{k|k}^+ \\ \tilde{X}_{k|N-k}^- \end{pmatrix}$ a pour espérance

$$\mathbf{E} \left[\begin{pmatrix} \tilde{X}_{k|k}^+ \\ \tilde{X}_{k|N-k}^- \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} \tilde{X}_{k|N} \\ \tilde{X}_{k|N} \end{pmatrix} \quad (10)$$

et pour matrice de variance-covariance :

$$\mathbf{P} \left[\begin{pmatrix} \tilde{X}_{k|k}^+ \\ \tilde{X}_{k|N-k}^- \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} \mathbf{P}[\tilde{X}_{k|k}^+] & 0 \\ 0 & \mathbf{P}[\tilde{X}_{k|N-k}^-] \end{pmatrix} \quad (11)$$

La fusion de ces deux estimateurs au sens des moindres carrés est donnée par :

$$\tilde{X}_{k|N} \triangleq \left(\mathbf{P} \left[\tilde{X}_{k|k}^+ \right]^{-1} + \mathbf{P} \left[\tilde{X}_{k|N-k}^- \right]^{-1} \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{P} \left[\tilde{X}_{k|k}^+ \right]^{-1} \tilde{X}_{k|k}^+ + \mathbf{P} \left[\tilde{X}_{k|N-k}^- \right]^{-1} \tilde{X}_{k|N-k}^- \right) \quad (12)$$

Remarque : en effectuant le débiaisage, les variances et les covariances sont multipliées par le terme e^{σ^2} . Cela n'agit donc pas sur l'estimation aller-retour (équation 12).

3.5 Comparaison avec la Borne de Cramer-Rao

La borne de Cramer-Rao (BCR) permet de donner une borne inférieure à la matrice de variance-covariance de tout estimateur [4], c'est pourquoi nous avons cherché à la calculer afin d'évaluer les performances de notre méthode.

La matrice d'information de Fisher (inverse de la BCR) se calcule de la façon suivante :

$$I_\theta(z_1, \dots, z_n) = \sum_{k=1}^n I_\theta(z_k) \quad (13)$$

$$= \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{\sigma_c^2} \nabla_\theta c_k(\theta) \nabla_\theta^T c_k(\theta) + \frac{1}{\sigma_v^2} \nabla_\theta v_k(\theta) \nabla_\theta^T v_k(\theta) \right]$$

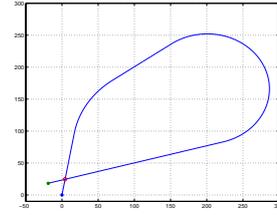
3.6 Évaluation sur une trajectoire contenant une seule boucle

La trajectoire illustrée sur la figure 2(a) a été choisie car elle représente la brique de base d'une trajectoire plus complexe. Les résultats sur l'efficacité de notre correcteur de biais sont présentés sur les figures 2(b) et 2(c). La fig.2(b) présente trois courbes : $\mathbf{E}[\tilde{x}_{k|N}] - x_k$, $\mathbf{E}[\hat{x}_{k|N}] - x_k$ et $b_x(k)$. Sur cette figure, l'axe des abscisses est gradué de 0 à 1400s par pas de 200s et celui des ordonnées de -1 à 7m par pas de 1m. Avant débiaisage, on remarque une courbe en cloche qui culmine à 6.5m et qui est très proche de la courbe du biais théorique (en trait continu). Après débiaisage, le biais oscille entre $\pm 0.2m$. Les résultats sur les biais en y sont similaires (cf. fig. 2(c)).

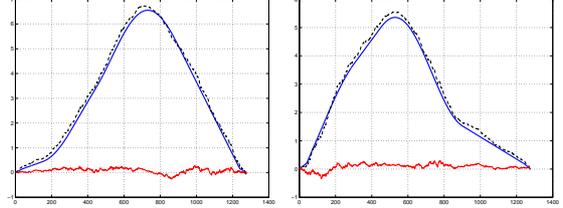
Les variances sont illustrées sur les figures 2(d) et 2(e). L'axe des abscisses est gradué de 0 à 1400s par pas de 200s et celui des ordonnées de resp. 0 à 120m² par pas de 20m² (fig. 2(d)) et de 0 à 80m² par pas de 10m² (fig. 2(e)). Nous pouvons remarquer que les variances calculées sont très proches de la borne inférieure calculée grâce à la BCR ($\sigma_x < 10m$ et $\sigma_y < 8m$). Pour cet exemple, la méthode fournit donc une estimation quasi-efficace.

4 Extension de la méthode à une trajectoire contenant plusieurs boucles

Dans le cas général, la trajectoire comporte plusieurs boucles (voir figure 1(b)). Elle est assimilée à un graphe **orienté**, avec des noeuds correspondant aux points de recalage dont les positions sont à estimer. La matrice de coûts de ce graphe est construite en considérant que la longueur d'un arc est égal aux

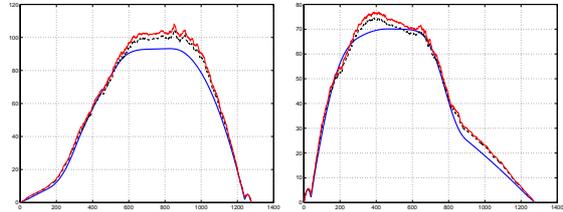


(a) Exemple de trajectoire traitée



(b) Correction du biais en x

(c) Correction du biais en y



(d) Variances théoriques, simulées et BCR en x

(e) Variances théoriques, simulées et BCR en y

FIG. 2: Traitement d'une trajectoire contenant une seule boucle. *En trait plein, les biais théoriques et variances données par la BCR. En pointillés, les résultats sans correction de biais. En trait plein fin, les résultats après correction de biais.*

nombre de mesures disponibles entre les noeuds. L'idée est d'estimer les positions dans l'ordre qu'elles apparaissent le long du plus court chemin entre deux positions connues ou préalablement estimées. La trajectoire est donc estimée itérativement selon la stratégie décrite ci-après.

4.1 Stratégie

La stratégie de parcours proposée est la suivante :

1. Rechercher le plus court chemin entre les extrémités connues (première et dernière positions) grâce à l'algorithme de Dijkstra [6],
2. Estimer les positions le long de ce plus court-chemin grâce à la méthode d'auto-estimation,
3. Considérer les points de recalage estimés à l'itération précédente,
4. Rechercher pour chaque couple de ces points, le plus court chemin non encore traité,
5. Auto-estimer les positions le long des plus courts chemins ainsi déterminés,
6. Revenir à l'étape 3.

NB : si plus d'un arc relie deux noeuds, nous traitons d'abord le chemin le plus court qui les relie (cf. 4.). Une fois l'algorithme

terminé, nous traitons les chemins restants.

4.2 Évaluation sur une trajectoire contenant plusieurs boucles

Dans le cas de la trajectoire figure 4(a), nous avons traité chaque plus court chemin de façon itérative (voir section 4.1 et figures 3(a) à 3(i)).

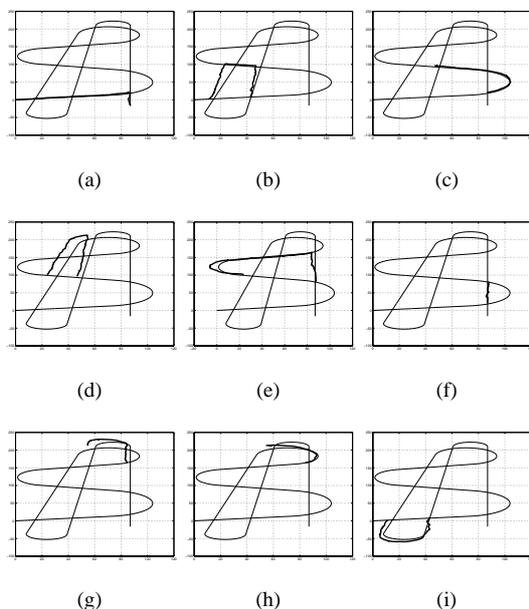


FIG. 3: Traitement d'une trajectoire contenant plusieurs boucles. En gras, les sous-chemins traités séquentiellement.

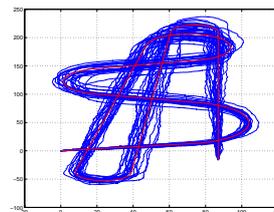
Les résultats sur l'efficacité de notre correcteur de biais sont présentés sur les figures 4(b) et 4(c). L'axe des abscisses est gradué de 0 à 1400s par pas de 200s, celui des ordonnées de -0.8m à 1m par pas de 0.2m pour le biais en x et de -1m à 3.5m par pas de 0.5m pour le biais en y . Comme pour pour les résultats associés à la trajectoire "simple" présentée 3.6, nous pouvons constater que les biais sont réduits et oscillent entre $\pm 0.3m$ pour le biais en x et $\pm 0.5m$ pour le biais en y .

Les variances sont illustrées fig. 4(d) et 4(e). L'axe des abscisses varie de 0 à 1400s, celui des ordonnées de 0 à $25m^2$ par pas de $5m^2$ (variance en x) et de 0 à $60m^2$ par pas de 10 (variance en y). Comme prévu, les variances des positions biaisées et débiaisées sont quasi-équivalentes.

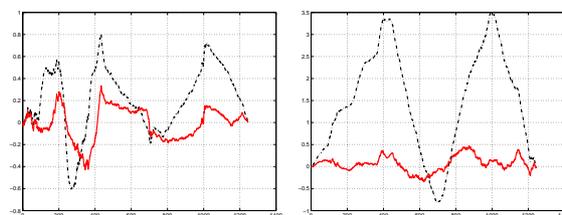
Le calcul de la BCR n'a malheureusement pas pu être automatisé. En effet, l'inversion de la matrice de Fisher requiert déjà beaucoup de mémoire dans le cas relativement simple d'un seul recalage (fig. 2(a)). Nous avons tout de même effectué ce calcul pour quelques trajectoires données (jusqu'à 5 recalages) et le résultat obtenu en section 3.6 (variances proches de la BCR) a été confirmé.

5 Conclusion

D'après les résultats satisfaisants que nous avons obtenus par la méthode d'auto-estimation via le parcours de graphe, tout laisse à croire que la méthode proposée dans cette communication est quasi-efficace. Elle sera donc sera mise en oeuvre

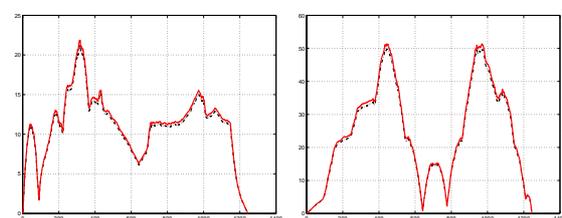


(a) Faisceau de trajectoires



(b) Biases simulés en x

(c) Biases simulés en y



(d) Variances simulées en x

(e) Variances simulées en y

FIG. 4: Traitement d'une trajectoire contenant plusieurs boucles. En pointillés, les résultats sans correction de biais, en trait plein, les résultats après correction de biais.

prochainement sur des données réelles acquises en bassin.

Références

- [1] *Evaluation of the 1st year of scientific use of the French ROV VICTOR 6000*. P.-M. Sarradin, K. Olu Leroy, H. Ondréas, M. Sibuet, M. Klages, Y. Fouquet, B. Savoye, J.-F. Drogou and J.-L. Michel. Underwater Technology 2002, pp. 11-16, Tokyo, Japan.
- [2] *Real-Time Georeferenced Video Mosaicking with the Matisse System*. A.-G. Vincent, N. Pessel, M. Borgetto, J. Jouffroy, J. Opderbecke, V. Rigaud. Proceedings of the 2003 MTS/IEEE Oceans Conference, San Diego. A paraître.
- [3] H.E. Rauch, F. Tung and C.T. Striebel. *Maximum Likelihood Estimates of Linear Dynamic Systems*. AIAA Journal. 1965. vol.3, number 8, pp 1145-1450.
- [4] Yaakov Bar-Shalom and Xiao-Rong Li. *Estimation and Tracking, Principles, Techniques and Software*. Artech House, 1993.
- [5] Claude Berge. *Graphes*. Gauthier-Villars, 1983.
- [6] E.W. Dijkstra. *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische Mathematik, vol.1, pp. 269-271, 1959.