

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 98 (2000)

Heft: 6

Artikel: Intégration de systèmes satellitaires et inertiels pour la bathymétrie

Autor: Brugger, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235648>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Intégration de systèmes satellitaires et inertiels pour la bathymétrie

Actuellement, on établit la cartographie du fond d'une étendue d'eau en mesurant la profondeur en continu à l'aide d'un échosondeur. Par météo défavorable, un tel levé bathymétrique requiert la connaissance de l'orientation exacte de la sonde (angles de tangage, de roulis et de cap), afin de corriger les mouvements dus aux vagues. On peut déterminer cette orientation à l'aide d'un système satellitaire ou d'un système inertiel (gyroscopes et accéléromètres). Ce travail étudie l'intégration de mesures issues des deux systèmes dans le but de s'affranchir des défauts de chacun, tout en augmentant la surdétermination des paramètres. Afin de tester les algorithmes développés, des essais sur le lac Léman ont été effectués en collaboration avec le bureau Pierre Martin SA de Thierrens, spécialisé dans les travaux hydrographiques et subaquatiques.

Eine Tiefseemessung besteht darin, die Tiefe einer Wasserfläche mit einem Echolot kontinuierlich zu messen und eine Karte des Untergrunds zu erstellen. Die Aufnahme erschwert sich bei schlechtem Wetter, da in diesem Fall die genaue Orientierung der Sonde bekannt sein muss (Winkel Stampfen, Schlingern, Kurs), um die Bewegungen der Wellen zu korrigieren. Diese Orientierung kann anhand von satellitengestützten oder inertialen Systemen (Kreiseln und Beschleunigungsmesser) bestimmt werden. Diese Arbeit setzt sich mit der Integration von Messungen beider Systeme auseinander, mit dem Ziel, die Fehler jedes Systems zu beseitigen und gleichzeitig die Überbestimmung der Parameter zu erhöhen. Um die Algorithmen auch zu testen, fanden auf dem Genfersee Versuche statt in Zusammenarbeit mit dem Büro Pierre Martin AG (Thierrens), das sich in Untergrund-Arbeiten spezialisiert hat.

Al giorno d'oggi la batimetria del fondale di uno specchio d'acqua consiste nel misurare in continuazione la profondità con un ecoscandaglio. In caso di condizioni meteorologiche avverse, il rilevamento batimetrico necessita dell'orientamento molto preciso della sonda (angoli di beccheggio, rollio e rotta) per correggere il movimento delle onde. Quest'orientamento è definibile tramite un sistema satellitare o un sistema inerziale (giroscopi e accelerometri). Questo lavoro analizza l'integrazione delle misure risultanti dai due sistemi, con l'intento di eliminare i difetti di ognuno aumentando la sovradeterminazione dei parametri. Per mettere alla prova gli algoritmi sviluppati si sono realizzati dei test sul Lago Lemano. Questi ultimi sono avvenuti in collaborazione con lo studio Pierre Martin SA di Thierrens, specializzato in lavori idrografici e subacquei.

D. Brugger

Introduction

Les systèmes satellitaires et les capteurs inertiels sont des outils d'aide à la navigation qui prennent une place toujours plus importante dans la profession de géomaticien. Leur intégration crée un système tel que les performances de l'en-

semble sont supérieures à la somme des performances individuelles des capteurs. Elle permet de nombreuses applications nouvelles. Ce travail de diplôme étudie ces systèmes et leur intégration dans le cadre de travaux hydrographiques et plus précisément de levés bathymétriques. Ces investigations s'inscrivent dans la ligne de travaux de diplôme précédents, voir [1] et [7].

L'hydrographie

Pour l'ingénieur en géomatique, l'hydrographie recouvre la cartographie des fonds marins, le positionnement d'embarcations et l'élaboration d'outils d'aide à la navigation (maintien du cap à suivre, correction de l'orientation de l'échosondeur). Le levé bathymétrique consiste à mesurer, en continu, la profondeur des fonds marins ou lacustres à l'aide d'un échosondeur. Afin de parvenir à lever le fond du plan d'eau avec une bonne précision lors de mauvaises conditions météorologiques, la direction de l'onde sonore doit être connue. Cette orientation, appelée attitude de la sonde, est déterminée par les angles de cap, roulis et tangage du bateau et peut être obtenue indépendamment par le système GPS et par le système INS. C'est sur la détermination d'attitude qu'a porté l'essentiel du travail de diplôme.

Les deux systèmes de navigation et d'orientation

GPS

Le système satellitaire GPS permet de déterminer sa position avec une précision dépendant du mode de mesures et du matériel utilisé. Une application particulière de ce système de navigation est la détermination de l'attitude d'une plate-forme [1]. L'attitude du bateau est déterminée en calculant deux vecteurs entre trois antennes placées sur l'embarcation. D'une part on mesure les deux même vecteurs directement sur le dispositif et d'autre part, on les détermine par mesures satellitaires. La connaissance des deux vecteurs dans deux référentiels différents permet d'obtenir la matrice d'attitude. Les avantages du système GPS sont le maintien de la précision qui ne se détériore pas avec le temps et son utilisation en continu, partout dans le monde et par tout temps. Son principal défaut est d'être dépendant de la visibilité des satellites, ce qui limite son utilisation en terrain non dégagé.

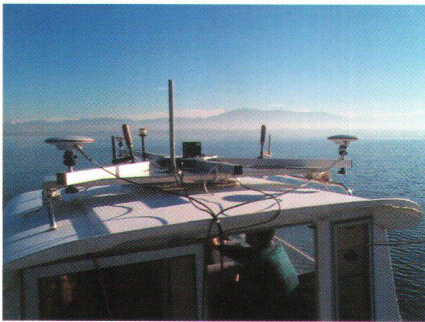


Fig. 1: Le dispositif de mesure fixé sur le toit du bateau.

INS

Les systèmes de navigation INS (inertial navigation system) appelés «strapdown» sont fixés solidairement à l'élément en mouvement et ne sont plus montés sur cardans. Les systèmes strapdown sont constitués de trois accéléromètres et de trois gyroscopes [2]. Ils reposent sur le principe de la mesure d'accélération selon des directions appelées axes sensibles. L'orientation spatiale des accéléromètres par rapport à un système de référence est déterminée par la matrice d'attitude obtenue à partir des mesures de vitesses angulaires issues des gyroscopes. La position du mobile est ensuite obtenue par double intégration des accélérations.

Les angles d'attitude calculés par INS sont déterminés grâce à la relation qui lie leurs dérivées aux vitesses angulaires mesurées par les gyroscopes [3].

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \cdot \tan \theta & \cos \varphi \cdot \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

où: φ , θ et ψ sont les angles de tangage, roulis et cap
 ω_x , ω_y et ω_z sont les vitesses angulaires mesurées par les gyroscopes

Cette équation montre qu'un angle dépend des vitesses angulaires mesurées sur les trois axes, un gyroscope ne déterminant pas un angle d'attitude à lui seul. L'avantage des capteurs inertiels est leur indépendance par rapport au monde extérieur. De plus la fréquence d'acquisition

est plus grande que celle des capteurs GPS. Le désavantage principal est l'accumulation des erreurs qui induit une dérive au cours du temps. Ceci implique un besoin de calibration.

Intégration INS/GPS

Les avantages et inconvénients des systèmes inertiels et satellitaires conduisent à l'idée d'intégration des deux outils d'aide à la navigation. L'intégration des deux systèmes permet de corriger les dérives des capteurs inertiels et d'augmenter le rythme de mesures et la surdétermination.

Une manière de procéder est de combiner les systèmes en appliquant une moyenne pondérée entre les angles d'attitude obtenus par GPS et ceux obtenus par INS. Le désavantage de cette méthode est qu'elle n'intègre les données des deux systèmes que lorsque les angles calculés par GPS sont disponibles pour une mise à jour (updates).

Une deuxième méthode consiste à déterminer à l'aide des angles GPS certains paramètres de corrections de l'INS qui seront calculés à chaque update puis appli-

qués aux mesures gyroscopiques brutes. Ainsi, les angles GPS calibrent les mesures INS.

La méthode retenue dans ce travail tient compte du fait que les paramètres de correction obtenus à un update ne sont pas indépendants de ceux qui sont obtenus à l'update précédent. Cette caractéristique est modélisée à l'aide d'un filtre de Kalman [4]. De manière générale, le filtre de Kalman permet d'étendre l'estimation des paramètres aux applications cinématiques, c'est-à-dire à des paramètres variant au cours du temps, notion cruciale en navigation. Ce filtre met en commun un modèle classique des observations qui les lie aux inconnues et un modèle de mouvement permettant de prédire le comportement des inconnues. Les paramètres ont, dans la plupart des cas, les caractéristiques de processus aléatoires de types bruit blanc ou processus markoviens [5].

Architecture du filtre

Les angles d'attitude calculés indépendamment par les deux systèmes de navigation montrent la dérive dont sont af-

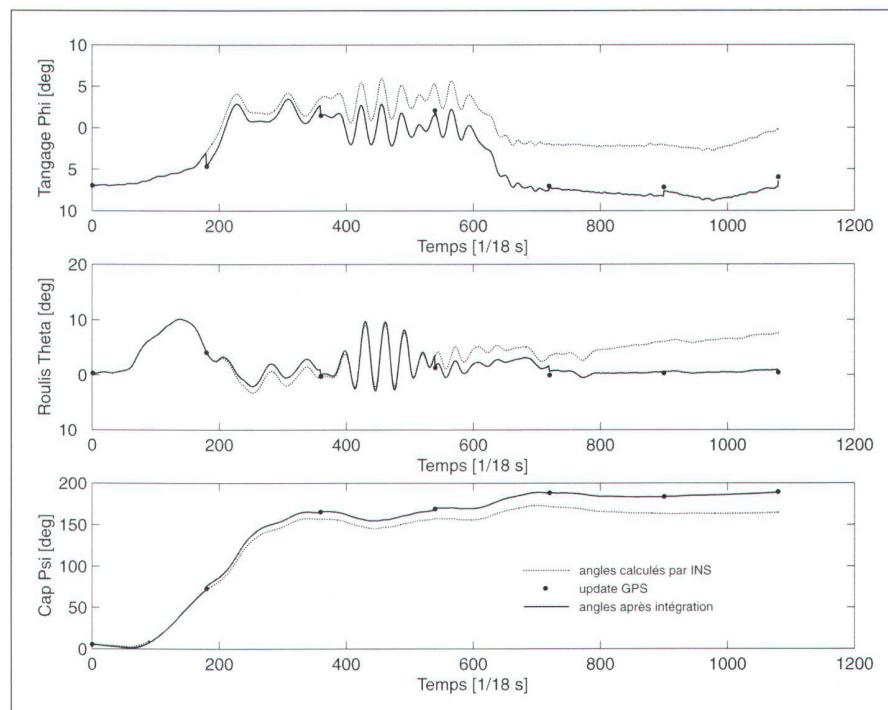


Fig. 2: Résultats de l'intégration INS et GPS.

fectées les mesures inertielles. Cette constatation nous conduit à calculer, à partir des angles GPS, des paramètres de correction des mesures gyroscopiques brutes, ces dernières étant affectées d'un biais et d'un facteur d'échelle. Le biais est le signal émis par le capteur lorsqu'il n'y a pas de mouvement tandis que le facteur d'échelle est la pente de la relation liant la grandeur physique réelle et la grandeur électrique mesurée par le capteur. On modélise dans le filtre de Kalman les biais et les facteurs d'échelle des gyroscopes ainsi que les accroissements des angles d'attitude qui peuvent être assimilés à des erreurs d'alignement entre le référentiel défini par les axes des gyroscopes et celui que définissent les antennes GPS. Les paramètres sont calculés à chaque update et sont combinés avec leur détermination antérieure. Ils sont donc immédiatement utilisés pour corriger les mesures gyroscopiques brutes. Le comportement de ces paramètres entre les updates est déterminé par le modèle de mouvement présenté dans l'encadré ci-contre.

Essais et résultats

Des essais sur le Lac Léman ont eu lieu en collaboration avec le bureau Pierre Martin SA. Dans le cadre de ce travail, les capteurs GPS et INS suivants ont été utilisés:

- 4 GPS Leica système 500, fréquence de 5Hz;
- Crossbow DMU-VG, fréquence de 18 Hz [6].

Les trois antennes GPS et le système inertiel ont été fixés sur un dispositif de mesures en forme de Y (Fig. 1). Une station GPS de référence a été installée sur la jetée du port de Versoix. Les mesures satellitaires se font en mode relatif avec mesure de la phase.

Pour tester les systèmes GPS et INS ainsi que leur intégration, les mesures ont été effectuées dans des conditions de navigation difficiles présentant des mouvements du bateau importants.

L'échantillon d'une durée de 60 secondes présenté ci-dessous montre de grandes amplitudes de roulis et tangage. Les up-

Le vecteur état contient les paramètres suivants:

$$dx = [d\varphi \ d\theta \ d\psi \ b_x \ b_y \ b_z \ S_x \ S_y \ S_z]^T$$

où $d\varphi, d\theta, d\psi$ sont les erreurs d'alignement
 b_x, b_y, b_z sont les biais des gyroscopes
 S_x, S_y, S_z sont les facteurs d'échelle

Les angles calculés par GPS sont introduits dans le filtre et permettent une mise à jour (update) des angles calculés par le système INS.

Le modèle de mouvement se réfère aux mesures gyroscopiques qui sont utilisées pour effectuer la prédiction du mouvement.

La forme continue $dx = F \cdot dx + G \cdot u$ du modèle de mouvement est la suivante:

$$F = \begin{bmatrix} 0_3 & J & L \\ 0_3 & GM_b & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & GM_s \end{bmatrix} \text{ avec:}$$

$$GM_b = \begin{bmatrix} -\frac{1}{60} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{60} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{60} \end{bmatrix}$$

$$GM_s = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_x}{60} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_y}{60} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\omega_z}{60} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 1 \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_x \sin \varphi \tan \theta & \omega_x \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \omega_y \cos \varphi & \omega_y \sin \varphi \\ 0 & \omega_z \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \omega_z \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{bmatrix}$$

$$G = [0 \ 0 \ 0 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001]^T$$

Cette équation fait intervenir les mesures gyroscopiques dans le modèle stochastique ainsi que les angles calculés au pas précédent.

dates GPS ont été effectués toutes les 10 secondes.

Les résultats de l'échantillon présenté montrent que l'intégration des deux systèmes de navigation permet de corriger la dérive du système inertiel. La précision des angles d'attitude calculés par GPS est constante tout au long de l'essai et vaut 0.5°. Elle est dans une moindre mesure liée au mouvement du bateau. Après 60 secondes de mesures, la précision des angles calculés par INS est environ dix fois moins bonne que par GPS. Les précisions des angles après intégration des deux cap-

teurs montrent bien l'effet de l'introduction des mesures issues du système GPS lors de chaque update. Après deux updates, la précision est de l'ordre de 2° et atteint 0.5° à la fin de l'échantillon.

Perspectives et conclusions

Pour des conditions de navigation présentant des mouvements importants du bateau mais ne variant pas trop rapidement comme dans l'échantillon présenté dans cet article, on peut conclure que l'intégration des deux systèmes permet de

déterminer l'attitude de la sonde et de s'affranchir des défauts respectifs des deux capteurs. Par contre, le calcul sur des échantillons présentant des variations rapides des mouvements du bateau a montré les limites de l'intégration des deux systèmes. En effet, le filtre de Kalman développé ne permet pas d'arriver à des résultats satisfaisants.

Ce travail a permis l'étude et l'intégration de deux systèmes de navigation dans le cadre du levé bathymétrique. Cette combinaison de capteurs, généralement utilisés séparément, améliore la fiabilité et la précision de l'attitude du bateau lorsque celui-ci est caractérisé par des mouvements importants. Ces résultats montrent

l'utilité et les limites d'une telle intégration dans le cadre des travaux hydrographiques.

Bibliographie:

- [1] Gabaglio Vincent, Orientation d'un système multi-antennes, MPG 7/1997, pp. 453–456.
- [2] Farrell Jay, Barth Matthew, The global positioning system and inertial navigation, University of California, 1998.
- [3] Stoval Sherry, Basic Inertial Navigation, Naval Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, California, 1997.
- [4] Grewal Mohinder, Andrews Angus, Kalman filtering: theory and practice, 1993.

[5] Merminod B. (1989) The Use of Kalman Filters in GPS Navigation. M.Surv. thesis, Unisurv S-35, University of New South Wales, Australia, 203 p.

[6] Crossbow: <http://www.xbow.com>.

[7] Moullet Cédric, Intégration de systèmes GPS et inertiels pour la navigation, MPG 6/1999, pp. 324–328.

D. Brugger
Géomatique-Topométrie
EPFL-DGR
CH-1015 Lausanne
e-mail: david.brugger@epfl.ch

K&K

**ELECTRONIC
PUBLISHING**

CH-8902 URDORF
IN DER LUBERZEN 17
TELEFON 01/734 51 55
TELEFAX 01/777 17 86
ISDN 01/777 17 85

GESTALTUNG? ● KONZEPT? ● BELICHTUNG? ● DRUCK? ● WIR
SETZEN IHRE IDEEN UND VORSTELLUNGEN IN GEDRUCKTES UM. ● GESTAL-
TUNG? ● KONZEPT? ● BELICHTUNG? ● DRUCK? ● WIR SETZEN IHRE IDEEN
UND VORSTELLUNGEN IN GEDRUCKTES UM. ● GESTALTUNG? ● KONZEPT? ● BE-
LICHTUNG? ● DRUCK? ● WIR SETZEN IHRE IDEEN UND VORSTELLUNGEN IN GEDRUCK-
TES UM. ● GESTALTUNG? ● KONZEPT? ● BELICHTUNG? ● K & K ELECTRONIC PUBLISHING
IN DER LUBERZEN 17 ● 8902 URDORF ● TELEFON 01/734 51 55 ● TELEFAX 01/777 17 86