

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural  |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF) |
| <b>Band:</b>        | 99 (2001)   |
| <b>Heft:</b>        | 6   |
| <b>Artikel:</b>     | Combinaison de capteurs pour la navigation pédestre   |
| <b>Autor:</b>       | Levet, Yannick / Gabaglio, Vincent  |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-235793">https://doi.org/10.5169/seals-235793</a>   |

### 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:** 25.01.2026

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

# Combinaison de capteurs pour la navigation pédestre

Cet article présente une approche d'un système conçu pour localiser une personne se déplaçant à pied, en tout temps et par toutes conditions. Le système étudié combine un récepteur GPS et des capteurs inertIELS (accéléromètres et gyroscopes). Deux accéléromètres sont utilisés pour déterminer la distance parcourue et un gyroscope pour l'orientation. L'intégration de ces capteurs combine les avantages de chacun: lorsque GPS est inopérant, le système inertiel continue la localisation et lorsque l'INS dérive trop, GPS permet de le recaler. Les principes du calcul sont exposés et les résultats d'un test illustrent la faisabilité de la technique.

*Dieser Artikel beschreibt ein Versuchssystem, das es erlaubt, eine zu Fuss gehende Person jederzeit und unter allen Bedingungen zu orten. Das System verbindet einen GPS-Empfänger mit Trägheitsmessern (Beschleunigungsmesser und Gyroskop). Zwei Beschleunigungsmesser werden für die zurückgelegte Distanz verwendet und ein Gyroskop für die Orientierung. Die Integration dieser Messgeräte vereinigt die Vorteile eines jeden: wenn das GPS funktionsunfähig ist, führt das Trägheitssystem die Ortung weiter, und wenn das INS zu stark abweicht, erlaubt das GPS es wieder zu richten. Die Prinzipien der Berechnung werden erläutert und die Resultate eines Tests illustrieren die Machbarkeit der Technik.*

Quest'articolo presenta un approccio di un sistema studiato per localizzare, sempre e in tutte le circostanze, una persona che si sposta a piedi. Il sistema esaminato abbina un ricettore GPS e dei ricettori inerziali (accelerometri e giroscopi). Si sono utilizzati due accelerometri per determinare la distanza percorsa e un giroscopio per l'orientamento. L'integrazione dei ricettori abbina tutti vantaggi: quando il GPS non è operativo, il sistema inerziale continua a effettuare la localizzazione; mentre quando l'INS deriva troppo, il GPS permette di allentare i ricettori inerziali. I principi del calcolo sono presentati qui di seguito, accompagnati dai risultati di un test che illustra la fattibilità tecnica.

Y. Levet, V. Gabaglio

## Contexte

Le concept de navigation s'est originellement appliqué aux domaines maritimes et aériens. Depuis plusieurs années une forte extension apparaît dans les applications terrestres. Ces nouvelles applications concernent surtout la localisation de véhicules et de personnes. La navigation routière en est probablement l'exemple le plus flagrant avec la généralisation des systèmes d'aide à la navigation et la gestion des flottes de véhicules. Mais qu'en est-il au juste de la localisation de personnes se déplaçant à pied? Cette question est, semble-t-il, restée jusqu'à pré-

sent un peu en marge des principales préoccupations de la navigation. Le manque d'investigations conduites jusqu'à présent offre une opportunité de recherche. Une problématique commune émerge progressivement de sujets aussi divers que l'analyse d'événements sportifs, le suivi de patients, le L-commerce (location based services), les systèmes de guidage pour les personnes aveugles, le levé en milieu forestier, etc. S'il est évident que chacun de ces exemples ne peut se concrétiser que par le développement d'un système propre, il n'en demeure pas moins que l'approche pour la localisation de personnes se déplaçant à pieds constitue un défi à part dans le domaine de la navigation.

## Systèmes de localisation et complémentarités

En navigation, la localisation par satellites (Leick, 1995) apparaît aujourd'hui comme une technique incontournable, car elle fournit la plupart des informations qui caractérisent un déplacement, à savoir la position, l'orientation, la vitesse, ainsi qu'une référence temporelle. Son avantage est d'offrir toutes ces indications, référencées dans un système géodésique rigoureux, avec une précision et une fiabilité connues. L'utilisation d'un tel système se heurte cependant à des pertes du signal, en particulier dans les sites urbains ou, de manière générale, lorsque la visibilité vers les satellites est fortement obstruée.

Les systèmes de navigation inertIELS (INS = Inertial Navigation System) utilisent essentiellement trois accéléromètres et trois gyroscopes (Titterton et al., 1997). Ils permettent la saisie d'un déplacement en tout temps. Les systèmes à estimation de parcours (Dead Reckoning) qui combinent divers capteurs (capteurs inerziali, compas magnétique, baromètre, odomètre, pédomètre, etc.) sont également souvent utilisés en navigation terrestre. Avec ces systèmes, le déplacement n'est décrit que relativement et sa précision varie fortement en fonction de la qualité des capteurs. La localisation par estimation de parcours implique également un cumul des erreurs sans compensation (dérive progressive de la position estimée). Utilisant des techniques indépendantes, INS et GPS sont complémentaires. Chaque système est capable de pallier les inconvénients de l'autre. En particulier, l'utilisation de capteurs inerziali remédié aux périodes d'indisponibilité du signal GPS, tandis que celui-ci permet de recaler les capteurs inerziali.

## Proposition de système

Le système étudié (Gabaglio, 2001) propose une combinaison de capteurs GPS et inerziali. Les critères d'encombrement et de prix optimaux sont à la base du choix des capteurs miniaturisés suivants:

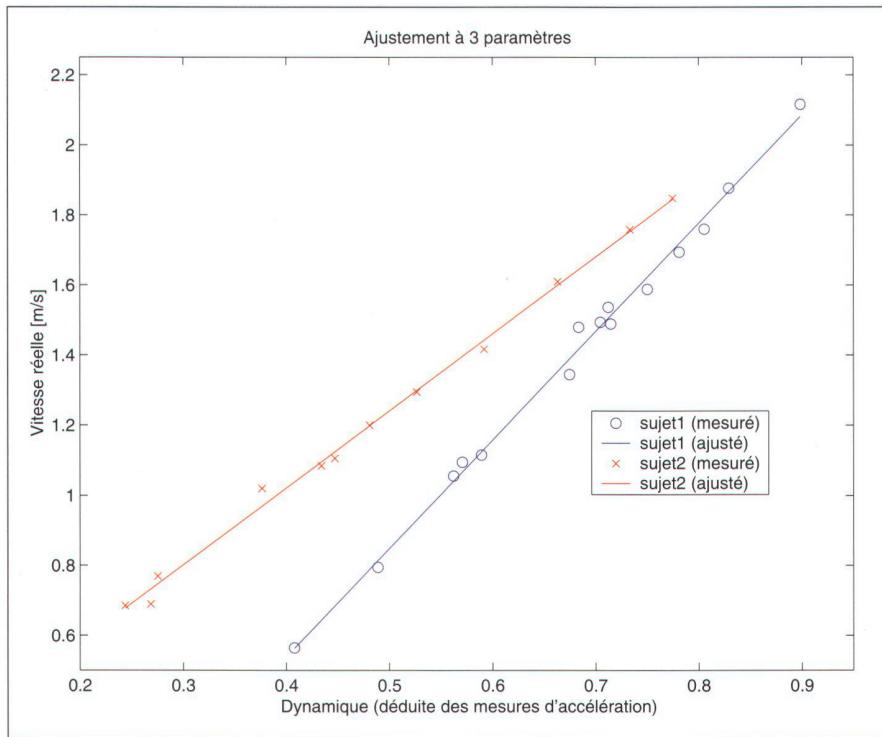


Fig. 1: Ajustement de la vitesse sur la dynamique pour deux sujets.

- 1 récepteur GPS Canadian Marconi Company (CMC), avec une antenne GPS petite et légère, portable sur l'épaule ou sur une casquette. La mesure de code absolu est utilisée à une fréquence de 2 Hz. En outre, les mesures de code sont lissées sur les mesures de vitesse de phase, ce qui permet d'améliorer la précision des vitesses et azimuts mesurés, mais pas celle des positions absolues.
- 1 Crossbow DMU-VG, englobant 3 accéléromètres (silicium), ainsi que 3 gyroscopes vibrants (céramique), disposés selon 3 axes orthogonaux. La fréquence de mesure a été choisie à 30 Hz. Le dispositif expérimental est porté au niveau du thorax et immobilisé contre le corps. Le système proposé n'utilise que les données provenant de deux accéléromètres et d'un gyroscope.

## Estimation de parcours

En tout temps, le parcours peut être estimé grâce à l'INS. Cette estimation comporte deux aspects : la distance et l'orientation du déplacement. La mécanisation

des mesures issues des capteurs inertIELS fournit des informations de distance (via les accéléromètres) et d'orientation (via le gyroscope), qui se convertissent aisément en une position. Pour la marche, la disposition des capteurs inertIELS sur la personne est très importante, de même que l'est le choix du nombre de capteurs inertIELS utilisés.

## Estimation de distance

L'approche de navigation inertIELLE classique consistant à obtenir la distance parcourue par double intégration des mesures d'accélérationS est très mal adaptée à la navigation pédestre. La complexité de la dynamique de marche, la variabilité du signal accélération, ainsi que la performance restreinte des capteurs miniaturisés forcent à adopter une autre stratégie. Une solution consiste à trouver, puis à ajuster une relation entre la vitesse et une caractéristique choisie du signal accélérométrique. De telles relations empiriques ont été démontrées dans le cadre de travaux de recherches en biomécanique, mais celles-ci diffèrent d'une personne à

l'autre. Dans cette optique, l'accélération est mesurée selon les composantes « verticales » et tangentielleS à la trajectoire. Diverses relations ajustées empiriquement peuvent être proposées. Notamment, la combinaison de la détection du rythme des pas et de la variance du signal peut fournir la longueur des pas (Ladetto et al., 2000). Dans ce travail, la relation proposée s'intéresse directement à l'estimation de la vitesse de déplacement. Elle a été ajustée pour plusieurs sujets, sur la base de tests de calibrage (parcours de 100 m chronométrés) à des vitesses comprises entre 0.5 et 2 m/s, puis validée sur d'autres tests (100 et 400 m), avec des écarts maximaux sur la distance parcourue de  $\pm 4\%$ . Elle prend la forme d'une régression linéaire de la vitesse par rapport à une caractéristique choisie du signal accélérométrique (appelée ici dynamique).

La figure 1 illustre un ajustement off-line (en post-traitement) à 3 paramètres entre la vitesse et la dynamique. Une fois l'ajustement effectué, les 3 paramètres sont utilisés pour déterminer la vitesse de la personne à partir des mesures d'accélération. La distance est finalement obtenue par intégration de la vitesse prédictive.

## Estimation de l'orientation du déplacement

Pour saisir l'orientation du parcours, un gyroscope est placé sur la personne en essayant d'orienter son axe de façon verticale. L'inévitable défaut de verticalité entraîne une erreur d'échelle sur les vitesses angulaires mesurées. On admet l'hypothèse que ce facteur d'échelle reste petit. D'autre part le système d'axes est solidaire du tronc de la personne. Comme le tronc pivote lors de la marche, le signal du gyroscope est affecté par des oscillations indésirables (fig. 2). L'application d'un filtre permet d'atténuer ces effets indésirables, mais provoque un retard de l'information.

Ces mêmes mesures sont encore affectées d'un biais non constant dans le temps. Par conséquent il est impératif de recalculer cette valeur assez régulièrement en cours d'utilisation, de telle sorte à cor-

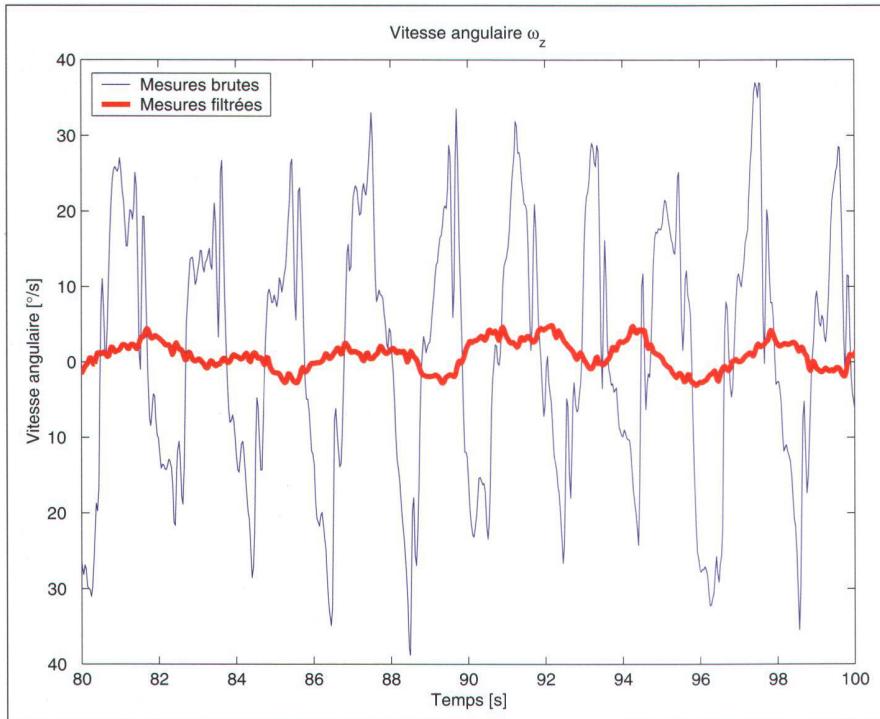


Fig. 2: Oscillations sur la vitesse angulaire provoquées lors de la marche et préfiltrage.

riger son effet sur l'orientation et donc sur la position.

## Recalage du système INS

Les paramètres de navigation considérés sont la position (coordonnées Est et Nord), l'azimut et le biais du gyroscope. Deux sources indépendantes permettent d'obtenir les trois premiers (coordonnées et azimut) : GPS fournit des valeurs observées lorsque le signal est disponible, tandis que l'INS fournit des valeurs mécanisées en continu. Quant au biais qui n'est pas directement observable, son comportement est modélisé par un processus aléatoire de type markovien (Merminod, 1989). Les paramètres sont compensés périodiquement, lorsque la précision sur l'azimut prédict se dégrade au-delà d'un seuil fixé.

La compensation des paramètres (update) est réalisée par un filtre de Kalman (Merminod, 1989). Ce filtre est particulièrement bien adapté à l'estimation de paramètres variables dans le temps puisqu'il combine un modèle de compensation paramétrique classique (modèle

d'observation) à un modèle de mouvement qui qualifie l'évolution temporelle des paramètres. Concrètement, dans chacun des modèles présentés, on ne travaille pas avec les valeurs des paramètres, mais directement avec les accroissements (ou corrections) sur les paramètres. Le modèle d'observation est le suivant (3 observations et 4 paramètres) :

$$1 - f(\tilde{x}) - v = A \cdot \delta x \quad (1)$$

ou encore

$$\begin{pmatrix} y_{GPS} - \tilde{y}_{INS} \\ x_{GPS} - \tilde{x}_{INS} \\ \varphi_{GPS} - \tilde{\varphi}_{INS} \end{pmatrix} - v = A \begin{pmatrix} \delta y \\ \delta x \\ \delta \varphi \\ \delta b \end{pmatrix}; \quad Q_{II} \quad (2)$$

où

$y_{GPS}$ ,  $x_{GPS}$ ,  $\varphi_{GPS}$  sont les observations GPS (coordonnées et azimut),

$y_{INS}$ ,  $x_{INS}$ ,  $\varphi_{INS}$  sont les paramètres mécanisés grâce aux mesures INS (coordonnées et azimut),

$v$  sont les résidus sur les observations GPS,

$A$  le modèle fonctionnel d'observation,

$Q_{II}$  est le modèle stochastique des observations (matrice des cofacteurs des para-

mètres observés), et  $\delta x = (\delta y \ \delta x \ \delta \varphi \ \delta b)^T$  sont les accroissements des paramètres estimés au moment de l'update.

Explicitement, les corrections à apporter aux 4 paramètres sont fonction des différences entre les observations ponctuelles GPS et les paramètres provenant de la mécanisation des mesures inertielles. En parallèle, les paramètres mécanisés sont utilisés comme valeurs prédictes des paramètres et les accroissements des paramètres suivent un modèle de mouvement qui s'exprime sous forme continue par l'équation différentielle suivante:

$$\dot{dx} = F dx + Gw \quad (3)$$

où

$dx$  sont les incrémentations sur les paramètres et  $\dot{dx}$  leur dérivée,

$w$  est le bruit moteur introduit sur les paramètres

$F, G$  sont la partie fonctionnelle, respectivement stochastique de la forme continue du modèle de mouvement

Le filtre de Kalman consiste à combiner les modèles (1) et (3). Il prend en compte les nouvelles observations et les anciennes compensations des paramètres pour estimer les corrections à apporter aux paramètres lors des updates. A cet instant, la valeur estimée du biais résulte de la comparaison de l'azimut observé et de l'azimut mécanisé.

Finalement, de manière à améliorer la précision du biais estimé, les azimuts INS et GPS sont filtrés et lissés. L'utilisation d'un lissage restreint implique notamment un retard dans l'application de la procédure d'update, mais participe à améliorer l'efficacité des recalages du système.

## Essais et résultats

L'exemple présenté illustre le parcours d'un piéton effectuant le tour du bâtiment du GR à l'EPFL (environ 400 m) à une vitesse d'environ 1.6 m/s. Pendant le cheminement le signal GPS est perdu. Le système INS est tout d'abord initialisé avec une position et un azimut fournis par GPS,

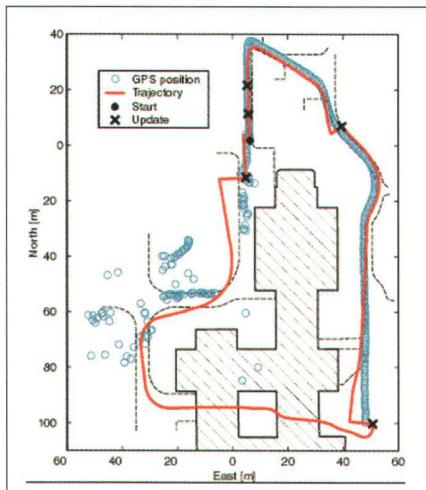


Fig. 3: Exemple du tour du bâtiment du GR à l'EPFL.

et avec une valeur initiale nulle pour le biais du gyroscope. Les précisions initiales sur les paramètres estimés (INS) sont volontairement fixées grandes de telle sorte que le système réalise rapidement des updates et que le biais converge au plus tôt vers une valeur réaliste. Puis, au fil des recalages, l'erreur sur les paramètres diminue et les updates s'espacent dans le temps.

L'exemple est représenté dans un système de coordonnées topocentrique local. D'une part, on observe que l'effet d'une mauvaise estimation du biais se traduit par une dérive sur la position prédictive par INS. Par conséquent, cette dérive est cor-

rigée au moment des updates et se traduit par un saut de la position INS qui vient se rapprocher de la position GPS observée. Idéalement, sans erreur INS, un update correspondrait à la moyenne de positions GPS. Lorsque le système est bien calibré et que les erreurs de l'INS restent faibles, les updates permettent d'améliorer la position absolue. D'autre part, l'avantage principal de la combinaison des systèmes ressort également : au moment où la position GPS n'est plus fournie, on constate que l'INS continue à localiser la personne en marche. De même, lors de sa réapparition, le signal est perturbé (multi-trajets) et l'INS assure toujours la localisation.

## Conclusion

Les recherches présentées proposent une approche pour le traitement des mesures inertielles et GPS, en vue de l'optimisation de la disponibilité et de la qualité de l'information de position pour une personne se déplaçant à pied. Il ressort que la principale difficulté est essentiellement liée à la modélisation des mesures angulaires, particulièrement bruitées qui nécessitent d'être soigneusement traitées. Cependant, les essais ont montré la pertinence des modèles utilisés et offrent des perspectives intéressantes. Les limites actuelles d'un tel système sont également

apparues. Avant de pouvoir donner lieu à un système fonctionnant de manière totalement autonome, fiable et conviviale, certains aspects devront encore être intégrés, notamment le contrôle de l'intégrité des mesures, de même que certains aspects de la modélisation devront être affinés.

## Bibliographie:

Crossbow: <http://www.xbow.com>  
 Gabaglio V., GPS – INS Integration for Low-Dynamic Application, Thèse en cours, EPFL, IGEO-TOPO, 2001.

Ladetto Q., Gabaglio V., Merminod B., Terrier P., Schutz Y., Human Walking Analysis Assisted by DGPS, GNSS 2000, Edinburgh (sc), 1–4 May, 2000.

Leick A., GPS, Satellite Surveying, second edition. Department of Surveying Engineering, University of Maine, 1995.

Merminod B., The Use of Kalman Filters in GPS Navigation, University of New South Wales: Sydney, 1989.

Titterton D.H., Weston J.L., Strapdown Inertial Navigation Technology, 1997.

Yannick Levet  
 Vincent Gabaglio  
 Géomatique-Topométrie  
 EPFL-DGR  
 CH-1015 Lausanne  
 yannick.levet@epfl.ch  
 vincent.gabaglio@epfl.ch

Wandeln Sie Ihr INTERLIS-Datenmodell in ein UML-Diagramm. Oder umgekehrt. Software herunterladen, testen.

**Ihr Datenmodell als Diagramm!**



**EISENHUT INFORMATIK**

Rosenweg 14 • CH-3303 Jegenstorf • Tel 031 762 06 62 • Fax 031 762 06 64 • <http://www.eisenhutinformatik.ch>