

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:	97 (1999)
Heft:	6
Artikel:	Intégration de mesures satellitaires et barométriques pour la localisation 3D
Autor:	Perrin, O.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-235555

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: 18.01.2026

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

Intégration de mesures satellitaires et barométriques pour la localisation 3D

La navigation autonome par mesures de code GPS fournit des altitudes très peu précises. Dans le but d'atténuer ce point faible, une altitude plus exacte peut être déterminée par des mesures barométriques. La manière de combiner ces deux types d'informations différentes est expliquée dans cet article. Les résultats, par ailleurs très encourageants, sont discutés. La combinaison du GPS avec d'autres capteurs, barométriques ou inertIELS, bénéficie d'un avenir prometteur dans le domaine de la navigation. Bon nombre de recherches sont en cours dans le domaine.

Die Ortsbestimmung mit GPS-Codemessung ergibt sehr ungenaue Höhenkoordinaten. Um diesen Schwachpunkt zu mildern, kann eine genauere Höhe mittels barometrischer Messungen bestimmt werden. In diesem Artikel wird erklärt, wie die beiden Arten von Messungen kombiniert werden können. Resultate werden vorgestellt, die sehr ermutigend sind. Die Kombination von GPS mit anderen Sensoren, barometrischen oder inertielLEN, scheint eine vielversprechende Lösung für die Zukunft zu sein. Mehrere Forschungsaufträge sind zur Zeit auf diese Problematik ausgerichtet.

La navigazione satellitare grazie a delle semplici misure di codice GPS fornisce delle coordinate molto poco precise in altimetria. Con l'obiettivo di limitare questo inconveniente, un'altitudine più esatta può essere calcolata a partire da misure barometriche. La maniera di combinare questi due tipi di informazione differenti è spiegata in questo articolo e i risultati, fra parentesi molto incoraggianti, sono esaminati et discusi. La combinazione del GPS con altri sensori, barometrici o inerziali, lascia intravvedere un avvenire promettente nel campo della navigazione satellitare. Un buon numero di ricerche sono in corso di realizzazione in questo ambito.

O. Perrin

«Le comble de l'habileté: arriver à l'heure avec un cadran de baromètre.»

Alphonse Allais

Introduction

Le système américain de navigation par satellites GPS (Global Positioning System) est actuellement le moyen le plus utilisé pour déterminer sa position. Ses principales qualités par rapport aux autres méthodes traditionnelles sont un fonctionnement permanent n'importe où sur la Terre et indépendant des conditions météorologiques telles que le brouillard ou la neige. De par la distribution géométrique des satellites, l'altimétrie est la composante la plus faible de la localisation par GPS.

Le but de cette étude, réalisée dans le cadre d'un travail pratique de diplôme à l'Unité de Topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), est d'améliorer ce positionnement tri-dimensionnel en lui ajoutant des mesures barométriques. Cette méthode est développée dans le cadre d'un projet visant à établir une relation directe entre la dépense énergétique d'une personne et son activité physique quotidienne. Afin de s'affranchir des restrictions que présentent les essais en chambre calorifique hermétiquement close, la localisation des personnes dans leur milieu ordinaire, et principalement la connaissance de leur déplacement vertical, est une tâche indispensable. Dans ce but, une collaboration avec l'Institut de Physiologie de l'Université de Lausanne (UNIL) a vu le jour.

GPS

Le système GPS est utilisé dans une multitude d'applications pour lesquelles on désire connaître sa position. Ses principales qualités sont son fonctionnement continu, partout dans le monde et par tout temps, ainsi que l'encombrement et le coût réduits des récepteurs modernes. Le calcul de la position de la personne est réalisé à l'aide des pseudo-distances mesurées grâce au code émis par chaque satellite (voir encadré). L'utilisation des mesures de phase de l'onde porteuse requiert des appareils plus coûteux ainsi que des logiciels plus perfectionnés pour obtenir un résultat d'une précision inutilement élevée pour cette application. La disponibilité sélective, qui est un brouillage intentionnel des signaux introduit par le Département de la Défense des Etats-Unis (DoD), est le principal facteur limitant la précision. On peut chiffrer cette dernière à 100 m en planimétrie et 200 m en altimétrie (erreur moyenne correspondant à deux écart-types ou 95% des mesures). L'altimétrie se révèle donc la composante la plus faible pour la localisation par GPS. Cela est d'autant plus gênant pour l'application prévue que la dépense énergétique d'une personne dépend essentiellement, outre son poids, de la dénivellation parcourue. Il est par conséquent important de pouvoir déterminer cette dernière avec une précision de l'ordre de 1 à 2 m. Dans cette optique, la combinaison de mesures de code GPS avec des altitudes barométriques déterminées par une station météorologique portable a été réalisée. L'utilisation du GPS différentiel (DGPS) permet d'annuler un bon nombre d'erreurs systématiques en utilisant deux récepteurs. La précision des coordonnées ainsi obtenues varie de 1 à 10 m selon l'éloignement entre les deux appareils.

Barométrie

La barométrie est la partie de la physique traitant de la mesure de la pression atmosphérique. Le baromètre à mercure, premier appareil utilisé dans ce but, a été inventé par Torricelli en 1643. Le principe



Fig. 1: La station météorologique HM30 de Thommen.

de base du nivelllement barométrique est que la pression mesurée en un point donné dépend de l'altitude de ce dernier [1]. Afin d'obtenir des altitudes suffisamment précises, il est important de pouvoir s'affranchir des conditions météorologiques locales. Il est par exemple possible de stationner à intervalles réguliers sur des points connus afin de calibrer le baromètre. Pour obtenir la précision désirée, ceci devrait se faire plusieurs fois par heure; il est par conséquent préférable d'avoir recours à une station de base barométrique [2]. Cette dernière est située sur un point dont l'altitude est connue et permet, par des mesures de pression simultanées avec la station mobile, de calculer des différences d'altitude. Cette méthode est appelée barométrie différentielle, par analogie avec la technique DGPS. Les baromètres utilisés à cet effet sont des stations météorologiques HM30 de Thommen (cf. Figure 1). Ces dernières permettent également la lecture de la température et de l'humidité relative de l'air et disposent d'une mémoire interne permettant d'enregistrer les mesures qui seront traitées par ordinateur. L'utilisation

d'un seul altimètre classique permettrait également de calculer des altitudes, mais ces dernières seraient précises à quelques dizaines de mètres seulement. Un test effectué sur 15 des points du réseau de nivelllement de la ville de Lausanne a montré que la précision des différences d'altitude mesurées par barométrie différentielle dépend de l'éloignement à la station de base. La relation établie par les mesures est la suivante:

$$\sigma_H = 46 \text{ [cm]} + 42 \text{ [cm/km]}$$

La modélisation des températures est une

phase importante pour l'obtention de résultats de qualité. Pour une dénivellation de 300 m, une incertitude de 5 °C sur la température induit une erreur de 5.5 m sur l'altitude déterminée. Les déplacements d'air, causés par la vitesse de la personne ou par le vent, sont une source de perturbation importante. Des essais réalisés jusqu'à des vitesses de l'ordre de 60 km/h sur un skieur puis sur un bus ont mis en évidence l'ampleur de ce phénomène. Il est donc impératif de protéger physiquement les baromètres de ces effets afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Equation des pseudo-distances

$$P = p + dt - dT + \text{Ion} + \text{Trop}$$

- P pseudo-distance mesurée par le récepteur
 p distance géométrique entre le récepteur et le satellite
 dt correction d'horloge du satellite exprimée en mètres
 dT correction d'horloge du récepteur exprimée en mètres
 Ion correction ionosphérique
 Trop correction troposphérique

Modèle linéarisé des observations

$$\begin{bmatrix} P^1 - (\overset{\circ}{p}^1 + dt^1 - d\overset{\circ}{T} + \text{Ion}^1 + \text{Trop}^1) \\ \vdots \\ P^n - (\overset{\circ}{p}^n + dt^n - d\overset{\circ}{T} + \text{Ion}^n + \text{Trop}^n) \\ (\text{H}_\text{BARO} + N + \Delta_\text{ell}) - \overset{\circ}{h} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_p^1 \\ \vdots \\ v_p^n \\ v_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p^1}{\partial \phi} & \frac{\partial p^1}{\partial \lambda} & \frac{\partial p^1}{\partial h} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial p^n}{\partial \phi} & \frac{\partial p^n}{\partial \lambda} & \frac{\partial p^n}{\partial h} & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\phi \\ d\lambda \\ dh \\ dT \end{bmatrix}$$

- P^i pseudo-distance mesurée entre le récepteur et le satellite i
 $\overset{\circ}{p}^i$ valeur approchée de la distance géométrique entre le récepteur (coordonnées approchées) et le satellite i (coordonnées calculées à partir des éphémérides)
 dt^i correction d'horloge du satellite i , calculée à l'aide des paramètres transmis par les satellites
 $d\overset{\circ}{T}$ valeur approchée de l'inconnue d'horloge du récepteur
 Ion^i valeur modélisée de la correction ionosphérique pour le satellite i
 Trop^i valeur modélisée de la correction troposphérique pour le satellite i
 H_BARO altitude barométrique mesurée
 N cote du géoïde
 Δ_ell différence de hauteur entre les ellipsoïdes WGS84 et CH03
 $\overset{\circ}{h}$ valeur approchée de l'altitude ellipsoïdique
 v résidus qui seront minimisés par la compensation au sens des moindres carrés

Les coefficients composants la matrice de la partie droite de l'équation représentent les dérivées partielles de la distance géométrique par rapport aux trois coordonnées que sont ϕ (latitude), λ (longitude) et h (hauteur sur l'ellipsoïde). L'expression analytique de ces coefficients est fastidieuse. Il est préférable de les calculer par différenciation numérique.

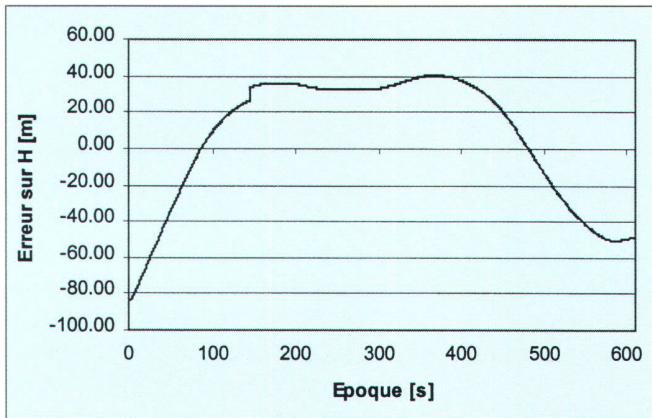


Fig. 2: Erreur altimétrique en mode GPS autonome.

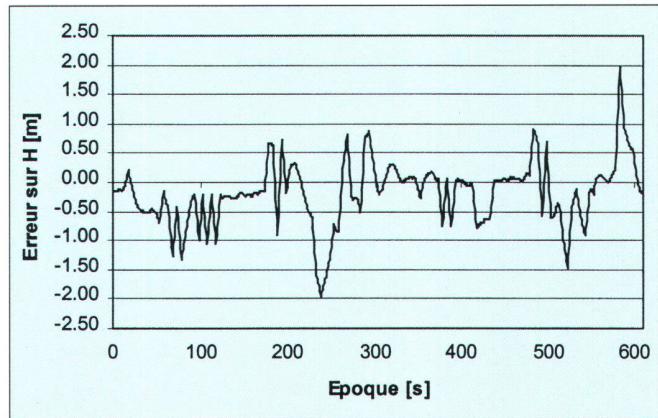


Fig. 3: Erreur altimétrique en mode combiné GPS et baromètre.

Combinaison des mesures

L'utilisation de l'altitude barométrique ajoute une équation à celles des satellites observés [3] (voir encadré). Les inconnues du problème sont les trois coordonnées et l'inconnue d'horloge du récepteur, dT . Il est indispensable de prendre en compte ce dernier paramètre qui représente l'erreur de synchronisation entre l'horloge à quartz du récepteur et les horloges atomiques très précises des satellites [4].

Comme les logiciels commerciaux n'offrent pas la possibilité d'ajouter des mesures barométriques aux mesures GPS, tous les algorithmes nécessaires ont été programmés dans l'environnement du logiciel Matlab. Le système de coordonnées utilisé dans les algorithmes de calcul est le système international WGS84 (World Geodetic System 84). Les positions sont exprimées par la latitude ϕ , la longitude λ et la hauteur h sur l'ellipsoïde de référence. Afin de convertir l'altitude barométrique, exprimée par rapport au champ de pesanteur, en une altitude ellipsoïdique, la connaissance des cotes du géoïde est nécessaire. Ces dernières représentent la différence d'altitude entre l'ellipsoïde de référence et le géoïde (surface équipotentielle passant par le niveau moyen des mers). Comme en Suisse les cotes du géoïde fournies par l'Office Fédéral de Topographie sont exprimées par rapport à l'ellipsoïde CH03, il faut encore tenir compte de la différence entre ce dernier et l'ellipsoïde WGS84.

Finalement, l'intégration des mesures est réalisée par la méthode des moindres carrés, en tenant compte des erreurs moyennes propres à chaque appareil (20 à 70 m pour les pseudo-distances selon l'élévation des satellites et environ 1 m pour l'altitude barométrique selon l'éloignement entre les deux stations). La combinaison des mesures satellitaires et barométriques introduit une surdétermination dans le système d'équations et permet ainsi le calcul d'une position avec un minimum de trois satellites observés, contre quatre en positionnement GPS standard. Ceci est particulièrement intéressant lors d'applications urbaines et forestières lorsque l'horizon est fortement obstrué. Un gain de fiabilité est également apporté, permettant une meilleure détection de fautes dans les mesures.

Résultats

Les tests destinés à quantifier le gain apporté par la combinaison des mesures satellitaires et barométriques ont montré que l'amélioration profite essentiellement à la composante altimétrique. Sa précision, dans des conditions atmosphériques favorables, est de l'ordre de 60 cm pour des vecteurs d'une longueur de quelques centaines de mètres (cf. Figure 3). Comparativement à la précision altimétrique des mesures GPS seules (cf. Figure 2), il s'agit d'un immense progrès. La précision des coordonnées planimétriques n'est

quant à elle pas améliorée significativement.

Il faut néanmoins mentionner que la qualité des altitudes barométriques est limitée par les conditions atmosphériques. Des mesures réalisées par fort vent ont montré une rapide dégradation de la précision des altitudes déterminées, principalement lors de déplacements dans la direction du vent. L'erreur moyenne altimétrique obtenue dans ces conditions atteignait une valeur de l'ordre de 7 m. L'accent a été mis sur l'utilisation d'un seul récepteur GPS dans ce travail. Dans une moindre mesure, les informations barométriques améliorent également la composante altimétrique d'un calcul en mode DGPS.

Conclusions et perspectives

Les résultats de l'intégration des mesures satellitaires et barométriques sont très encourageants. La précision altimétrique, principal point faible des systèmes satellitaires, a pu de cette manière être grandement améliorée. Il ne faut cependant pas perdre de vue que l'utilisation des baromètres requiert des conditions météorologiques favorables. Leur grande sensibilité aux variations de température [2] ainsi qu'au vent se révèlent leurs principaux points faibles. L'intégration de mesures GPS et barométriques est un premier pas vers un système de localisation de personnes utilisable

idéalement même en présence d'horizons fortement obstrués [5]. Dans le but de remplacer le signal GPS lorsque ce dernier est inaccessible, des systèmes inertIELS (INS) tels que gyroscopes et accéléromètres sont fréquemment utilisés en aviation et en navigation routière. L'extension de ces technologies à la localisation de personnes en est encore à ses débuts. L'intégration de mesures GPS avec des données provenant d'autres senseurs portables est actuellement l'un des domaines de recherche principaux de l'Unité de Topométrie (IGEO-TOPO) de l'EPFL.

Bibliographie:

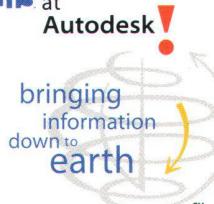
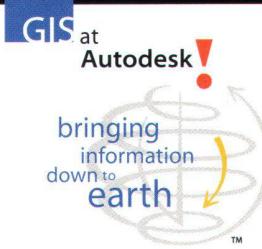
- [1] Kahmen H., Faig W. (1988). Surveying. Walther de Gruyter, Berlin, New York, 572 pp.
- [2] Sudau A. (1994). Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Druckaufnehmer für präzise barometrische Höhenmessungen. Deutsche Geodätische Kommission, Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 142 pp.
- [3] Glennie C. (1996). Combining Barometric Height with GPS Pseudoranges for Single Point Positioning. Independent Project Nr. 939688, Dept. of Geomatics Engineering, University of Calgary, 17 pp.
- [4] Leick A. (1995). Satellite Surveying, Second Edition. Dept. of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, 560 pp.
- [5] McLellan J. F. (1992). Design and Analysis of a Low Cost GPS Aided Navigation System. UCGE Reports Nr. 20097, Dept. of Geomatics Engineering, University of Calgary, 202 pp.

Olivier Perrin
EPFL Topométrie
GR-Ecublens
CH-1015 Lausanne
e-mail: Olivier.Perrin@epfl.ch

AutoCAD Map®

Copyright Scout-Systems GmbH

Unsere Kombination von CAD und GIS



CAD ist die Basis für Geodaten. AutoCAD Map ist das optimale Werkzeug für Anwender, die vollwertige CAD-Funktionalitäten innerhalb des GIS benötigen. Die Stärken von AutoCAD Map sind die Datenerfassung und Fortführung von Geodaten, die einfache Anbindung von Datenbanken, die Offenheit durch Unterstützung vieler Herstellerformate sowie die Bedienerfreundlichkeit.

Überzeugen Sie sich von der Leistungsfähigkeit der Software bei einem Fachhändler vor Ort.

Informationen zu AutoCAD Map und einem Fachhändler in Ihrer Nähe bekommen Sie über die Autodesk Infoline 0844 - 85 48 64. Besuchen Sie uns auch im World Wide Web unter <http://www.autodesk.de>

Autodesk.