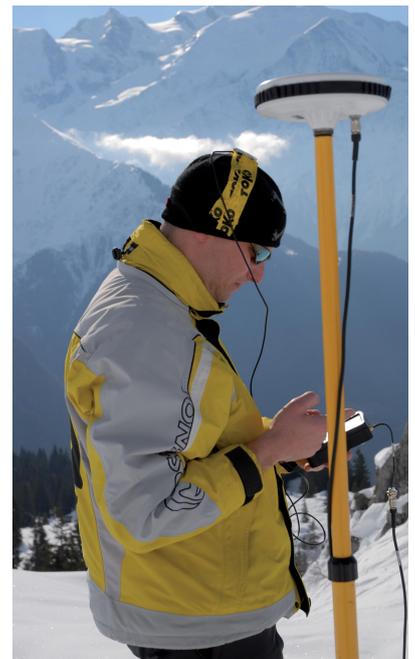


L'analyse de performance sportive à l'aide d'un système GPS/INS low-cost : évaluation de capteurs inertiels de type MEMS

■ Adrian WAEGLI - Jean-Marie BONNAZ - Jan SKALOUD

Les skieurs s'intéressent au GPS (Global Positioning System) pour évaluer leurs performances. Les positions enregistrées durant les entraînements et les courses permettent d'analyser les trajectoires et de comparer vitesses, accélérations et autres paramètres liés à la performance sportive (p.ex. la fréquence cardiaque). Malheureusement, l'environnement montagneux, la dynamique relativement élevée du skieur et les restrictions ergonomiques dépassent souvent les limites technologiques actuelles. Des centrales inertiels de type MEMS (Micro-Electronic-Mechanical Systems) couplées à des récepteurs GPS offrent une certaine autonomie lorsque le signal GPS est défectueux. Malheureusement, les capteurs MEMS-IMU (Inertial Measurement Unit) ont des erreurs systématiques importantes et de comportement peu connu. Cet article présente une expérience durant laquelle un skieur a été équipé avec des récepteurs GPS, des capteurs MEMS-IMU et une centrale inertielle haut-de-gamme servant de référence. Cette expérience a permis d'analyser le comportement d'erreur des MEMS-IMU et d'investiguer la performance de l'intégration GPS/MEMS-IMU en termes de position, vitesse et orientation.



■ mots-clés

performance sportive,
GPS, MEMS-IMU,
trajectoire

Dans beaucoup de sports, la différence de niveau entre athlètes devient de plus en plus faible. Très souvent, la victoire d'un athlète repose sur un "détail" qui permet de faire la différence. Cependant, les méthodes d'analyse de performance des athlètes usuelles se basent sur des chronométrages ou des enregistrements vidéo [1]. Elles semblent limitées par certains facteurs tels que les conditions météorologiques ou la difficulté de reproduire les mêmes postures et mouvements d'une descente à l'autre. De plus, elles ne fournissent que peu de variables quantitatives permettant de juger la performance sportive de manière objective. GPS (Global Positioning System) est une technologie permettant de calculer des positions et des vitesses qui a déjà

fait ses preuves dans le domaine des sports motorisés [2] et aquatiques [3, 4]. Dans le ski Alpin, les changements de constellation, les multi-trajets ainsi que la haute dynamique rendent la résolution des ambiguïtés difficile voire impossible [5]. La mise au point d'un système autonome permettant de combler les carences du GPS s'impose. Des centrales inertiels couplées à des GPS augmentent l'autonomie de positionnement lorsque des obstacles bloquent le signal GPS et offrent en plus du GPS la possibilité de déterminer l'orientation du mobile. Malheureusement, le coût et la taille des centrales inertiels et des récepteurs GPS haut-de-gamme ne permettent pas d'envisager une telle intégration pour des applications sportives.

■ ■ ■ Ces limites ergonomiques et financières nous restreignent à utiliser des récepteurs GPS mono-fréquence et des centrales inertielles de type MEMS (Micro-Electronic-Mechanical Systems) [5, 6]. Depuis quelques années, la société TracEdge (Grenoble, France) et le laboratoire de topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) mettent au point un système miniaturisé et abordable visant le marché des sportifs confirmés. Cette intégration de capteurs bons marchés pose de nouveaux défis tels que la modélisation d'erreur des capteurs MEMS-IMU. En effet, leurs propriétés d'erreur ne semblent pas permettre de décorréler efficacement biais, facteurs d'échelle, dérives et défauts d'alignement.

Dans cette perspective, une comparaison des mesures MEMS-IMU à des données d'une centrale inertielle haut-de-gamme (LN 200) sera présentée dans cet article. Elle se base sur des essais à ski et permet d'isoler certains paramètres d'erreur des capteurs inertiels. Ensuite, un filtre de Kalman étendu (EKF) permet d'intégrer les données satellitaires et inertielles. Il se limite à estimer des biais sur les accéléromètres et gyroscopes en appliquant un procédé de Gauss-Markov du 1er ordre pour modéliser leurs erreurs. Ces biais sont comparés aux biais issus de la comparaison des signaux bruts afin d'analyser le modèle d'erreur choisi.

Intégration des mesures GPS avec des mesures MEMS-IMU

L'intégration GPS/MEMS-IMU présentée se base sur un filtre de Kalman étendu (EKF) en couplage lâche ; les mesures GPS sont post-traitées indépendamment avant d'être intégrées aux données inertielles [7, 8]. Les équations différentielles suivantes doivent être résolues [9] :

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^n \\ \dot{\mathbf{v}}^n \\ \dot{\mathbf{R}}_b^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{v}^n \\ \mathbf{R}_b^n \mathbf{f}^b - (\boldsymbol{\omega}_{in}^n + \boldsymbol{\omega}_{ie}^n) \times \mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n \\ \mathbf{R}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \boldsymbol{\omega}_{in}^b) \end{bmatrix}$$

avec \mathbf{r}^n le vecteur de position, \mathbf{v}^n le vecteur vitesse, \mathbf{R}_b^n l'orientation du capteur inertielle (repère b pour "body") par rapport au repère de navigation (n), \mathbf{f}^b les mesures accélérométriques et $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ les mesures gyroscopiques.

En ce qui concerne le modèle d'erreur des capteurs MEMS-IMU, nous faisons l'hypothèse que leurs diverses sources d'erreurs (défauts d'alignement, des biais, des facteurs d'échelle ou des dérives) ne peuvent pas être décorrélées efficacement. Leurs propriétés d'erreurs est en effet peu connue et il est important de rappeler que l'erreur associée à un capteur inertielle MEMS détériore très rapidement la solution de navigation si elle n'est pas corrigée [10]. Pour les mesures inertielles, un modèle d'erreur simplifié a été choisi. Seuls des biais ont été modélisés par un procédé de Gauss-Markov du 1er ordre :

$$\hat{\ell}^b = \ell^b + \mathbf{b}_{\ell^b} + \mathbf{w}_{\ell^b}$$

$$\dot{\mathbf{b}}_{\ell^b} = -\boldsymbol{\beta}_{\ell^b} \cdot \mathbf{b}_{\ell^b} + \sqrt{2\sigma^2 \boldsymbol{\beta}_{\ell^b}} \cdot \mathbf{w}_{\ell^b}$$

avec $\hat{\ell}^b$ la mesure MEMS-IMU compensée (force spécifique, mesure angulaire), ℓ^b l'observation, \mathbf{b}_{ℓ^b} le biais de la mesure inertielle, \mathbf{w}_{ℓ^b} le bruit de mesure, σ^2 l'amplitude de la densité spectrale et $\boldsymbol{\beta}_{\ell^b}$ l'inverse du temps de corrélation.

L'utilisation de capteurs MEMS-IMU et du modèle d'erreur simplifié utilisé dans l'EKF soulève plusieurs questions :

- Quel est le comportement d'erreur des capteurs MEMS-IMU ?
- Est-ce que le modèle simplifié est approprié pour modéliser les erreurs inertielles ?
- Peut-on améliorer le modèle d'erreur en estimant d'autres termes d'erreur (p.ex. facteurs d'échelles, défauts d'alignement) ?
- Comment les paramètres d'erreur évoluent dans le temps ? Serait-il possible d'en calibrer certains ?
- Quelle est l'influence de divers modèles d'erreur sur la solution de navigation ?

Essais à ski

Afin de pouvoir répondre à ces différentes interrogations, l'EPFL et TracEdge ont réalisé plusieurs tests. L'objectif principal est de comparer la solution EKF intégrant des capteurs MEMS-IMU à une solution intégrant une centrale inertielle haut-de-gamme considérée comme référence. De plus, les signaux MEMS-IMU sont comparés à ceux de la centrale inertielle de référence afin d'étudier ses caractéristiques d'erreur. Pour ce faire, nous avons monté conjointement une centrale inertielle haut-de-gamme (LN 200) et plusieurs capteurs MEMS-IMU (xsens MTx). Les mesures GPS ont été faites par des récepteurs Javad Legacy bi-fréquence et ublox mono-fréquence. Le tout a été fixé solidement sur le dos d'un skieur (figure 1). L'expérience a été réalisée dans la station de Passy Plaine-Joux (Haute-Savoie, France) sur une piste bien

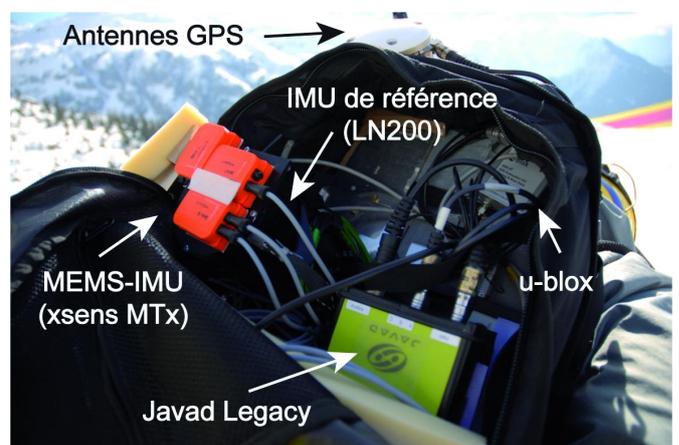


Figure 1 : L'équipement de l'expérimentation.

dégagée. Un athlète a réalisé une dizaine de slaloms géants d'une durée de 90s environ. Une descente se décompose en deux périodes statiques (une au départ, l'autre à l'arrivée) et d'une période dynamique (figure 2).

Les données de la LN 200 (400Hz) couplées avec les données GPS bi-fréquence (1Hz) permettent le calcul d'une solution de référence avec un logiciel commercial (PosProc, partie verte de la figure 3). Comme les facteurs d'échelle se sont avérés non-significatifs par rapport à leur écart-type estimé, uniquement des biais ont été estimés.

De la même manière, une solution inertielle a été calculée avec l'EKF en utilisant des mesures GPS bi-fréquence (1Hz) et des données MEMS-IMU (100Hz, partie rouge de la figure 3). Nous avons préféré utiliser pour ce travail les données GPS bi-fréquence aux données GPS mono-fréquence pour étudier véritablement l'influence des MEMS-IMU sur la solution de navigation, sans introduire des incertitudes liés à la précision GPS mono-fréquence. La performance du système L1 GPS/MEMS-IMU a été présentée dans [7, 11].

Comparaison des données inertielles brutes

Dans un premier temps, nous avons comparé les signaux

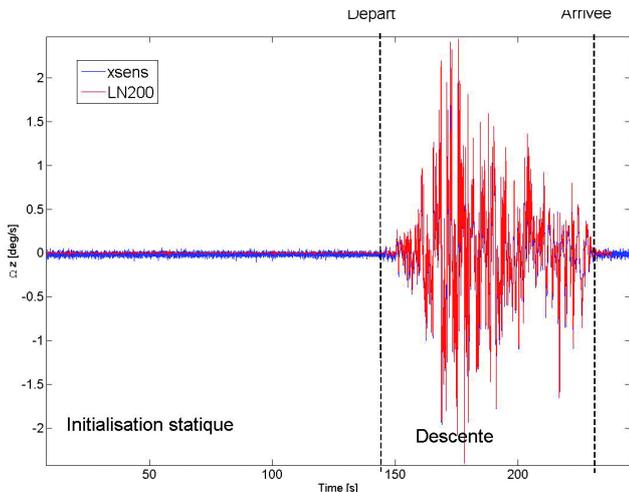


Figure 2 : Définition des périodes de calcul.

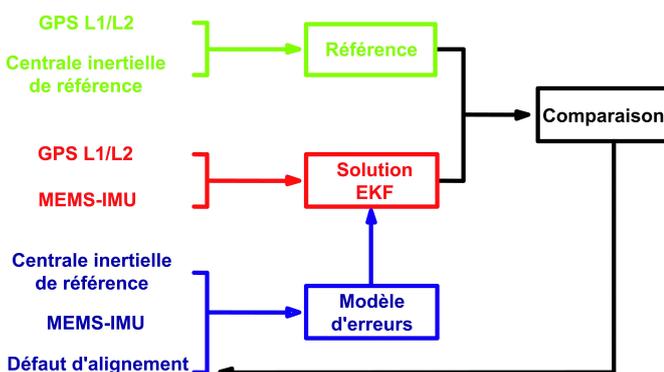


Figure 3 : Méthodologie d'analyse.

des MEMS-IMU aux signaux de référence afin de déterminer les erreurs qui affectent ces derniers. Pour ce faire, nous avons filtré les données LN 200 et MEMS-IMU avec un filtre passe-bas pour éliminer un maximum de bruit. Il a fallu également corriger le défaut d'alignement entre les axes de la centrale inertielle LN 200 et ceux des MEMS-IMU (partie bleue de la figure 3). L'estimation de ces angles de boresight (angles entre les repères liés à la LN 200 et aux MEMS-IMU) s'est faite en injectant les angles d'orientation donnés par la solution de référence dans l'EKF comme observations [7] :

$$h(\hat{\mathbf{x}}^-) = (\mathbf{I}_3 + \mathbf{B}) \boldsymbol{\varepsilon}_{LN200} + \mathbf{w}_\varphi$$

$$\dot{\mathbf{B}} = -\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{B} + \sqrt{2\sigma_B^2 \boldsymbol{\beta}_B} \cdot \mathbf{w}_\varphi$$

avec \mathbf{B} la matrice symétrique gauche des angles de boresight, $\boldsymbol{\varepsilon}_{LN200}$ les orientations de référence, \mathbf{w}_φ le bruit de mesure, $\boldsymbol{\beta}_B$ l'inverse du temps de corrélation fixé à l'infini. Ces défauts d'alignement ont été estimés avec une précision d'environ 0.5°.

Une fois le défaut d'alignement corrigé, nous avons pu comparer les signaux de la LN 200 et des MEMS-IMU [12]. Nous avons estimé un biais b et un facteur d'échelle s par moindres carrés à l'aide du modèle suivant :

$$\ell_{LN200} - v = (1 - s) \ell_{MEMS} + b$$

Il est à noter que durant les périodes statiques, aucun facteur d'échelle ne peut être estimé. En effet, le manque de dynamique ne permet pas de les décorréler des biais. Ainsi, en période statique, nous nous sommes limités à estimer un biais qui correspond alors à la moyenne de la différence entre les deux signaux. Relevons également, que les biais avant le départ sont statistiquement identiques à ceux à l'arrivée. Nous pouvons donc négliger l'estimation de dérives pendant ces descentes qui ne durent que 90s.

Le tableau 1 donne les résultats de l'analyse pour un jeu de données représentatif. En période statique, certains biais sont non-significatifs par rapport à l'écart-type estimé (cellules en rouge). Il s'agit avant tout des biais d'accéléromètres horizontaux. Le biais de l'axe y (qui pointe vers le bas) se décorréle plus facilement en raison de la gravité. En période dynamique, les biais sont estimés avec une plus grande précision et sont tous significatifs. Les facteurs d'échelle des gyroscopes s'avèrent négligeables alors que

Initialisation statique	fx [m/s ²]	fy [m/s ²]	fz [m/s ²]	wx [deg/s]	wy [deg/s]	wz [deg/s]
Biais	0.008	0.171	0.020	-0.11	0.51	1.38
Ecart-type	0.022	0.024	0.027	0.12	0.14	0.16

Descente	fx [m/s ²]	fy [m/s ²]	fz [m/s ²]	wx [deg/s]	wy [deg/s]	wz [deg/s]
Biais	-0.049	0.039	-0.145	-0.21	0.38	1.39
Ecart-type	0.003	0.003	0.009	0.01	0.01	0.01
Facteur d'échelle [-]	0.0046	-0.0533	-0.0223	-0.0051	-0.0118	0.0004
Ecart-type [-]	0.0006	0.0009	0.0011	0.0212	0.0357	0.0250
Corrélation [-]	0.93	0.32	0.98	0.31	0.43	0.14

Tableau 1 : Biais et facteurs d'échelle estimés pendant une l'initialisation et durant une descente.

■ ■ ■ ceux des accéléromètres sont statistiquement significatifs. En revanche, ils sont fortement corrélés avec les biais accélérométriques (cellules en vert, 0.9 pour les axes horizontaux, 0.3 pour l'axe verticale).

Les biais gyroscopiques calculés en périodes statiques et dynamiques ne diffèrent pas statistiquement, contrairement aux biais accélérométriques. Leur estimation donne des résultats plus homogènes en partie statique (figure 4 à figure 6), alors qu'ils varient plus fortement entre les descentes s'ils sont estimés conjointement avec les facteurs d'échelle (figure 7). On s'aperçoit que les biais et les facteurs d'échelle sont corrélés entre capteurs pendant la période dynamique. Ceci souligne la difficulté de décorréliser les facteurs d'échelle des biais des accéléromètres. Ainsi, les facteurs d'échelle des accéléromètres doivent être considérés avec prudence.

Les figure 4 à figure 7 montrent l'évolution des biais et des facteurs d'échelle pendant l'expérience. Contrairement aux accéléromètres, la série temporelle des biais gyroscopiques converge vers une valeur constante. Ceci peut s'expliquer par le fait que les biais gyroscopiques sont plus facilement estimés que ceux des accéléromètres. En effet, les angles d'orientation et les biais accélérométriques ne sont pas complètement observables [13].

Analyse du modèle d'erreur de l'EKF

Nous avons ensuite comparé les biais estimés lors de la comparaison de données brutes avec ceux modélisé par l'EKF. Les figure 8 et figure 9 montrent que la différence entre les deux estimations est non-significative. Cependant, les écarts-types des différences sont importants ce qui réduit l'interprétation des résultats.

En résumé, la comparaison des données MEMS-IMU et IMU de référence fournit des biais et des facteurs d'échelle. Nous avons vu également que les biais estimés par l'EKF sont équivalents à ceux déduits de la comparaison de données brutes. Mais on peut se demander quels paramètres sont meilleures pour estimer les paramètres de navigation (position, vitesse, orientation). Serait-il préférable d'utiliser des biais calibrés issus de la comparaison des données MEMS-IMU et LN 200 ?

Nous avons donc étudié la performance des biais et des facteurs d'échelle (des accéléromètres) estimés en calibrant les données inertielles avant de les introduire dans l'EKF. Ceci évite l'estimation de biais et augmente en même temps la surabondance du problème. Quatre intégrations ont été calculées avec

1. des biais estimés par l'EKF.
2. des biais estimés par l'EKF appliquant des facteurs d'échelle calibrés aux données MEMS-IMU.
3. des biais calibrés appliqués aux mesures MEMS-IMU.
4. des biais et des facteurs d'échelle calibrés appliqués aux mesures MEMS-IMU.

Le tableau 2 montre la différence entre la solution de référé-

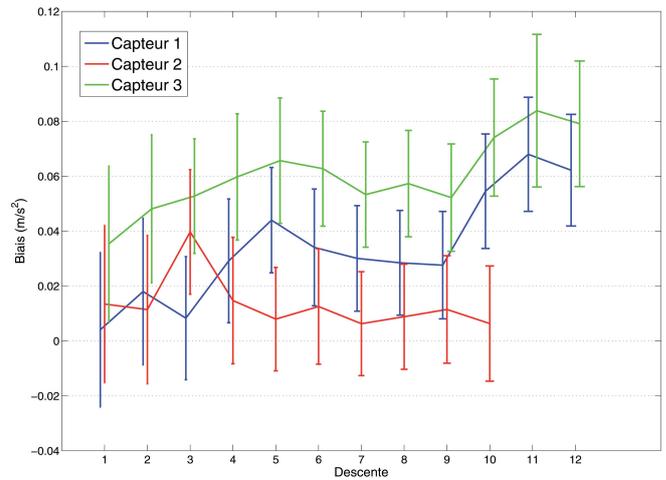


Figure 4 : Biais et écarts-types (1σ) de l'axe X de trois accéléromètres estimés durant la période d'initialisation.

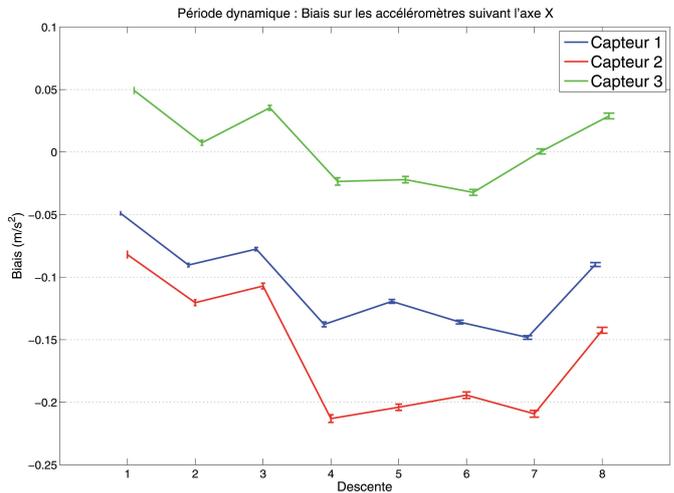


Figure 5 : Biais et écarts-types (1σ) de l'axe X de trois accéléromètres estimés durant les descentes de ski.

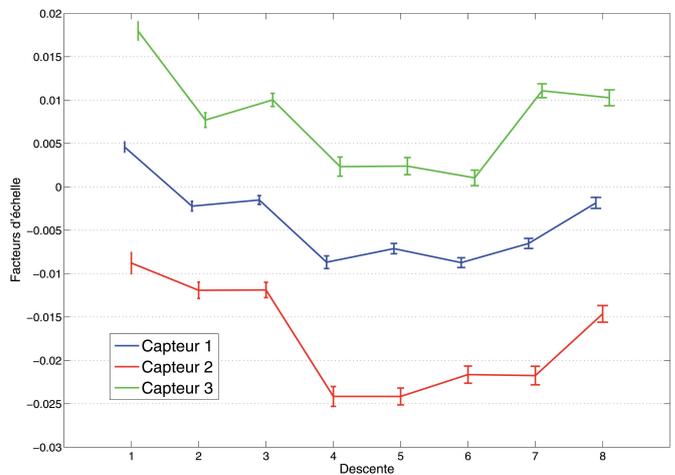


Figure 6 : Facteurs d'échelle et écarts-types (1σ) de l'axe Z de trois accéléromètres estimés durant les descentes de ski.

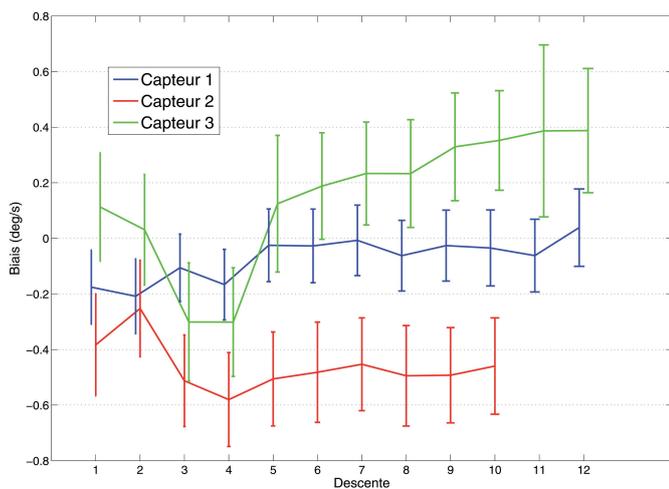


Figure 7 : Biases et écarts-types (1 σ) de l'axe X de trois gyroscopes estimés durant les descentes de ski...

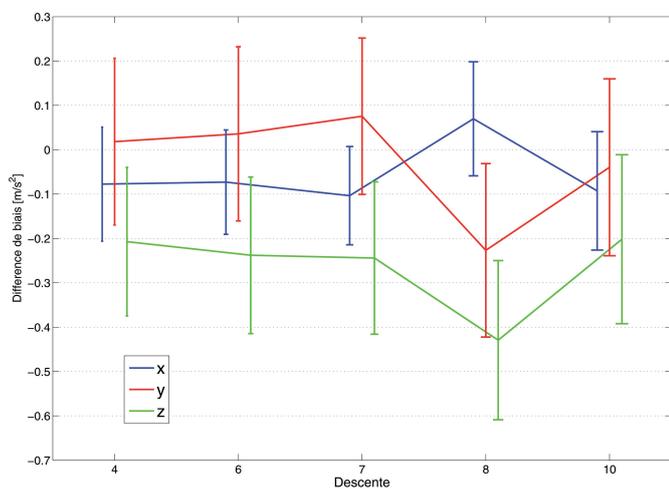


Figure 8 : Différence entre les biais accélérométriques estimés par EKF et ceux déduits de la comparaison de données brutes. L'intervalle d'erreur indique l'erreur moyenne de la différence (1 σ).

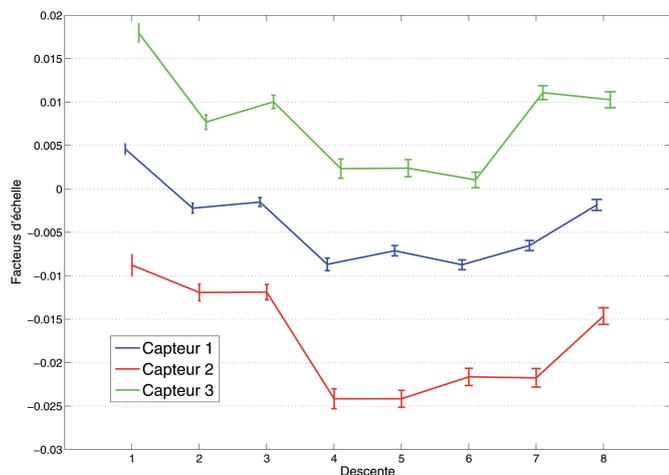


Figure 9 : Différence entre les biais gyroscopiques estimés par EKF et ceux déduits de la comparaison de données brutes. L'intervalle d'erreur indique l'erreur moyenne de la différence (1 σ).

Solution	1	2	3	4	
Biais estimés avec l'EKF	Oui	Oui	Non	Non	
Biais calibrés	Non	Non	Oui	Oui	
Facteurs d'échelles calibrés	Non	Oui	Non	Oui	
Erreurs moyennes	N [m]	0.18	0.19	0.21	0.19
	E [m]	0.40	0.40	0.49	0.49
	h [m]	0.43	0.43	0.44	0.44
	r [°]	1.10	1.20	2.27	2.81
	p [°]	1.10	1.30	3.39	2.78
	hd [°]	1.32	1.50	2.60	2.90

Tableau 2 : Précision des positions et orientations en fonction des biais et facteurs d'échelle appliqués.

rence et les quatre solutions calculées avec l'EKF.

En appliquant les facteurs d'échelles calibrés, les résultats ne sont influencés que de manière négligeable. Les différences sont de l'ordre de quelques centimètres et dixièmes de degrés. Ceci est probablement dû à la corrélation importante entre les biais et les facteurs d'échelle calibrés. Il s'avère donc inutile d'ajouter des termes supplémentaires au modèle d'erreur inertielle MEMS. En appliquant les biais calibrés, la qualité de la solution de navigation est dégradée considérablement, en particulier, la qualité de l'orientation. Le temps de corrélation du processus Gauss-Markov permet un léger ajustement des biais au cours du temps ce qui contrebalance efficacement la réduction de surabondance dans l'estimation de la solution de navigation. Ainsi, le modèle d'erreur choisi pour estimer les erreurs inertielles MEMS semble approprié.

Conclusions et perspectives

La comparaison des données MEMS-IMU avec des mesures faites par une centrale inertielle haut-de-gamme (LN 200) permet de mettre en avant l'existence de biais et de facteurs d'échelle sur les mesures MEMS-IMU. Pendant la période d'initialisation statique, seuls les biais ont pu être modélisés. Le dynamisme plus élevé au cours de la descente a permis de détecter des biais et des facteurs d'échelle qui restent cependant fortement corrélés.

Parallèlement, l'EKF estime les erreurs inertielles par un modèle simple considérant que les MEMS-IMU sont entachées uniquement de biais. La comparaison entre le modèle d'erreur de l'EKF et les erreurs calculées par analyse des signaux MEMS-IMU et LN 200 confirme la validité du modèle. En effet, les biais calculés par comparaison des signaux en position statique sont équivalents à ceux estimés par l'EKF. Ensuite, des biais et des facteurs d'échelle ont été calibrés sur l'ensemble des descentes. Leur application dans l'EKF permet de s'affranchir de l'estimation des biais, mais n'améliore pas la solution de navigation.

Ce travail est basé sur la comparaison de signaux MEMS-IMU et IMU de référence sur des durées expérimentales assez courtes. Seuls trois types d'erreurs ont été analysés à savoir biais, facteurs d'échelle et dérives. Des mesures de plus longue durée permettraient d'analyser le comportement d'erreur des



- MEMS-IMU plus profondément. En outre, les conditions météorologiques peuvent influencer de manière non négligeable les caractéristiques d'erreur des capteurs.

Remerciements

Cette recherche est soutenue par TracEdge Sàrl, basé à Grenoble (Isère, France). Les auteurs souhaitent remercier particulièrement Pierre Ribot pour l'organisation des tests sur ski et pour ses descentes courageuses.

Contacts

Adrian WAEGLI

adrian.waegli@epfl.ch

Jean-Marie BONNAZ

jmbonnaz@gmail.com

Jan SKALOUD

jan.skaloud@epfl.ch

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

Bibliographie

- [1] W. Nachbauer, P. Kaps, B. M. Nigg, F. Brunner, A. Lutz, G. Obkircher, and M. Mössner, "A video technique for obtaining 3-D coordinates in Alpine skiing", *Journal of Applied Biomechanics*, pp. 104-115, 1996.
- [2] J. How, N. Pohlman, and C.-W. Park, "GPS Estimation Algorithms for Precise Velocity, Slip and Race-track Position Measurements", in *SAE Motorsports Engineering Conference & Exhibition*, 2002.
- [3] K. Zhang, R. Deakin, R. Grenfell, Y. Li, J. Zhang, W. N. Cameron, and D. M. Silcock, "GNSS for sports – sailing and rowing perspectives", *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 3, pp. 280-289, 2004.

[4] K. Zhang, R. Grenfell, R. Deakin, Y. Li, Jason Zhang, A. Hahn, C. Gore, and T. Rice, "Towards a Low-Cost, High Output Rate, Real-Time GPS Rowing Coaching and Training System", in *16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Portland, 2003.

[5] J. Skaloud and P. Limpach, "Synergy of CP-DGPS, Accelerometry and Magnetic Sensors for Precise Trajectory in Ski Racing", in *ION GPS/GNSS 2003*, Portland, 2003.

[6] J. Skaloud and B. Merminod, "DGPS-Calibrated Accelerometric System for Dynamic Sports Events", in *ION GPS*, Salt Lake City, 2000.

[7] A. Waegli, "Assessment of GPS/MEMS-IMU Integration Performance in Ski Racing", in *ENC*, Geneva, Switzerland, 2007.

[8] A. Waegli and J. Skaloud, "Turning Point – Trajectory Analysis for Skiers", *InsideGNSS*, 2007.

[9] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown inertial navigation technology*: Peter Peregrinus Ltd, 1997.

[10] N. El-Sheimy and X. Niu, "The Promise of MEMS to the Navigation Community", *InsideGNSS*, 2007.

[11] A. Waegli, J. Skaloud, P. Tomé, and J.-M. Bonnaz, "Assessment of the Integration Strategy between GPS and Body-Worn MEMS Sensors with Application to Sports", in *ION GNSS*, Fort Worth, Texas, 2007.

[12] J.-M. Bonnaz, "Analyse du comportement de capteurs inertiels en trajectographie". vol. Travail de fin d'études : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 2007.

[13] S. Winkler and P. Vörsmann, "Multi-sensor data fusion for small autonomous unmanned aircraft", *European Journal of Navigation*, vol. 5, May 2007.

ABSTRACT

Skiers are interested in GPS (Global Positioning System) for performance evaluation. The positions registered during trainings or races allow analyzing trajectories and comparing speed, acceleration with other important parameters (e.g. heart rates). Unfortunately, the technological limits of today's satellite navigation are often reached if not exceeded by the quickly alternating environment, the relatively high dynamics of the skier and ergonomic constraints. Inertial measurement units (IMU) of MEMS (Micro-Electronic-Mechanical Systems) type coupled with GPS receivers provide certain autonomy when the GPS signal is imperfect or denied. However, these MEMS-IMUs are subject to large systematic errors. This article presents an experiment where a skier was equipped with GPS receivers, MEMS-IMU sensors as well as a tactical-grade IMU acting as reference. This experiment permits analyzing the error behavior of the MEMS-IMU and investigating the accuracy of the GPS/MEMS-IMU integration regarding position, velocity and orientation.