

ANALYSE DE COURSES DE SKI GRACE A L'UTILISATION DE MESURES ACCELEROMETRIQUES ET DE GPS

Résumé

L'Unité de Topométrie de l'EPFL a développé récemment, en collaboration avec l'Institut de Physiologie de l'université de Lausanne, une nouvelle méthode permettant d'analyser tout le parcours d'une course de ski. Grâce à l'utilisation combinée de la technologie satellitaire et de l'accélérométrie tri-dimensionnelle. La première permet d'obtenir la trajectoire exacte du coureur ainsi que son profil de vitesse de manière quasi-continue. En couplant les signaux GPS-GLONASS avec l'accélérométrie, on peut définir des informations bio-mécaniques importantes. Les accélérations latérales et verticales lors des passages de portes sont de précieuses informations quant au style des différents coureurs. Cet article présente le principe ainsi que les avantages et inconvénients de cette nouvelle méthode.

Zusammenfassung

Das Institut für Topometrie der EPFL hat kürzlich eine neue Methode entwickelt, die eine kontinuierliche Rennanalyse im Skisport ermöglicht. Sie beruht auf dem gemeinsamen Gebrauch der GPS-Technologie und der 3 dimensional Beschleunigungsmessung. Erstere erlaubt es, die Linie sowie ein Geschwindigkeitsprofil des Fahrers zu rekonstruieren. Werden die GPS-GLONASS Empfänger mit einem Beschleunigungsmesser kombiniert, so können verschiedene biomechanische Informationen gewonnen werden. Die Querschleunigung und die senkrechte Beschleunigung während des Tordurchgangs geben Aufschluss über den Stil eines Fahrers. Der vorliegende Artikel beschreibt das Prinzip sowie die Vor- und Nachteile dieser neuen Methode.

Contexte

Quelle trajectoire choisit donc Hermann Maier, leader incontesté de la saison de ski 1999-2000, en comparaison de ses adversaires ? Quelle est sa vitesse et son accélération latérale lors des passages des portes ? C'est à ce genre de questions que le présent article essaie de répondre.

Jusqu'à présent, les seules informations disponibles pour l'analyse de courses de ski se limitent aux temps intermédiaires et aux images vidéo. Dans un souci de fournir des informations couvrant l'intégralité de la course, l'Unité de Topométrie de l'EPFL, en collaboration avec l'Institut de Physiologie de l'université de Lausanne, a développé récemment une méthode qui intègre la technologie GPS avec l'accélérométrie tri-dimensionnelle. Les signaux GPS permettent d'obtenir la trajectoire ainsi que le profil de vitesse du skieur en quasi-continu. Si l'on adjoint un accéléromètre tri-axial, on peut envisager l'analyse de certaines caractéristiques telles que le mouvement ascendant et descendant du skieur lors des virages ainsi que la technique de passage des portes grâce à l'accélération latérale.

L'entreprise 'InMotion Technologies Ltd.' a récemment développé une autre technologie d'analyse, en superposant deux séquences vidéo de courses différentes. Il est ainsi possible de comparer le style et l'évolution des deux skieurs directement sur un écran, mais uniquement de manière qualitative. La méthode basée sur l'utilisation du GPS et de l'accélérométrie ne doit pas être considérée comme un produit concurrent, mais comme un outil fournissant des paramètres quantitatifs complémentaires.

Choix techniques

Il existe plusieurs modes et méthodes de mesures en matière de GPS (Leick 1995). Il convient de distinguer la mesure de la phase et du code. La mesure de la phase est plus précise que la mesure du code, mais son utilisation se révèle nettement plus délicate (détermination du nombre initial de cycles entiers, l'ambiguïté). Son utilisation dans le cadre de courses de ski où les pertes de signal

instantanées peuvent être fréquentes (passage en forêt, pont etc.), ne garantit pas à elle seule des résultats fiables. Tenant compte de cette remarque, les deux modèles suivants ont été retenus.

- Les mesures des pseudo-distances (code) pour déterminer la position
- Les moyennes de vitesse de phase pour déterminer la vitesse

En travaillant en mode différentiel il est possible d'obtenir des précisions supérieures à 0.5 mètres sur la position. En lissant les mesures de code à partir de deux mesures de phase successives, on peut encore augmenter cette précision pour atteindre un niveau de 0.2 - 0.1 m (Hatch 1982) :

$$\hat{P}_k = \frac{1}{2}P_k + \frac{1}{2}\left\{\hat{P}_{k-1} + (\Phi_k - \Phi_{k-1})\right\} \quad (1)$$

où

P_k : pseudo-distance observée au temps t_k

\hat{P}_k, \hat{P}_{k-1} : pseudo-distance lissée au temps t_k et t_{k-1} respectivement

$\Phi_k - \Phi_{k-1}$: variation de distance calculée avec deux mesures de phase successives

Le concept du lissage réside dans le fait que la variation de distance, dérivée de la mesure de phase, peut être évaluée avec une très grande précision. En ajoutant celle-ci à la pseudo-distance lissée de l'époque précédente t_{k-1} , on obtient une prédiction de la pseudo-distance à l'époque t_k (terme entre parenthèses de (1)). Le terme prédit est ensuite combiné avec la pseudo-distance observée à l'époque t_k pour obtenir la pseudo-distance lissée. On peut remarquer que les deux termes ont des poids égaux dans (1). En ajoutant des observations, le terme prédit va gagner en importance. Il convient de mentionner que la présentation du lissage telle quelle suppose qu'il n'y ait pas de sauts de cycle entre deux mesures successives de la phase.

L'utilisation du code lissé donne des informations sur la position. Cependant, on s'intéresse également à la vitesse d'un coureur. Dans cette optique, le modèle de vitesse de phase a été utilisé. Il donne non seulement des informations sur la position, mais aussi sur la vitesse avec une précision très élevée de 0.05-0.1 m/s. Ce type d'observation peut être déterminé à l'aide des fréquences Doppler. Il peut aussi être reconstruit à partir de deux mesures de phase successives (McLellan 1992) :

$$d\dot{\Phi} = \frac{\Phi_k - \Phi_{k-1}}{\Delta t_{k,k-1}} \quad (2)$$

où

$d\dot{\Phi}$: observation de vitesse de phase reconstruite

Φ_k, Φ_{k-1} : observation de phase à l'époque t_k et t_{k-1} respectivement

$\Delta t_{k,k-1} = t_k - t_{k-1}$: différence de temps entre les époques t_k et t_{k-1}

Concernant les accéléromètres, le choix a porté sur un capteur tri-axial où les trois senseurs sont montés orthogonalement. Il est donc possible de mesurer de manière qualitative l'intégralité du mouvement d'un skieur. L'accélération verticale nous informe sur le mouvement ascendant-descendant, l'accélération latérale indique dans quelle mesure le skieur se penche dans les virages et l'accélération antéro-postérieure donne l'information dans la direction de la course. L'avantage principal de ce système réside dans son poids et son encombrement réduits. Il est de ce fait bien adapté à des applications sportives.

Cependant, les signaux accélérométriques sont très bruités. Afin d'éliminer les vibrations parasites, on a appliqué un filtrage numérique passe-bas [2].

Expérimentation pratique

Pour obtenir des conditions réalistes, des essais ont eu lieu sur les pistes de ski de Crans-Montana. A cet effet, nous avons piqueté un slalom. L'antenne GPS était montée sur un casque, et le capteur accélérométrique fixé au niveau des hanches. Le calcul est effectué en post-traitement de deux manières différentes afin de pouvoir comparer les résultats :

- avec un logiciel commercial utilisant la phase;
- à l'aide d'algorithmes écrits dans le cadre de ce travail et utilisant les deux modèles discutés auparavant.

Les différences constatées entre les deux jeux de résultats sont de l'ordre de 0.1-0.3 m. Elles s'expliquent principalement par l'utilisation de modèles différents dans les deux programmes.

La meilleure représentation des différents paramètres (trajectoire, vitesse, abscisse curviligne, accélération) est atteinte en comparant directement deux skieurs. Une information nouvelle et particulièrement intéressante est la création de profils de différences de temps et de vitesse en quasi-continu (à la fréquence de mesure de 10 Hz). Actuellement, les entraîneurs et coureurs ne disposent que de deux à trois temps intermédiaires et n'ont aucune information chiffrée entre ceux-ci. Afin de pouvoir réaliser ces profils, la courbe du skieur 1 est projetée orthogonalement sur celle du skieur 2. La projection orthogonale correspond à la distance minimale entre le point de mesure du skieur 1 et la trajectoire du deuxième skieur. A partir des points projetés, il est possible de calculer la différence de temps entre deux skieurs. Le résultat est représenté à la *Figure 1*. Les profils de différences de vitesse et de temps correspondants sont également dessinés. L'analyse démontre que le skieur 1 a mené la course pratiquement durant toute sa durée, mais, suite à un détour à l'avant-dernière porte, il est dépassé par le skieur 2. La différence de temps finale est de presque une seconde. La différence de vitesse est proche de zéro jusqu'à 20 secondes de parcours pour augmenter brusquement durant les 5 dernières secondes en faveur du skieur 2 qui choisit une trajectoire beaucoup plus directe.

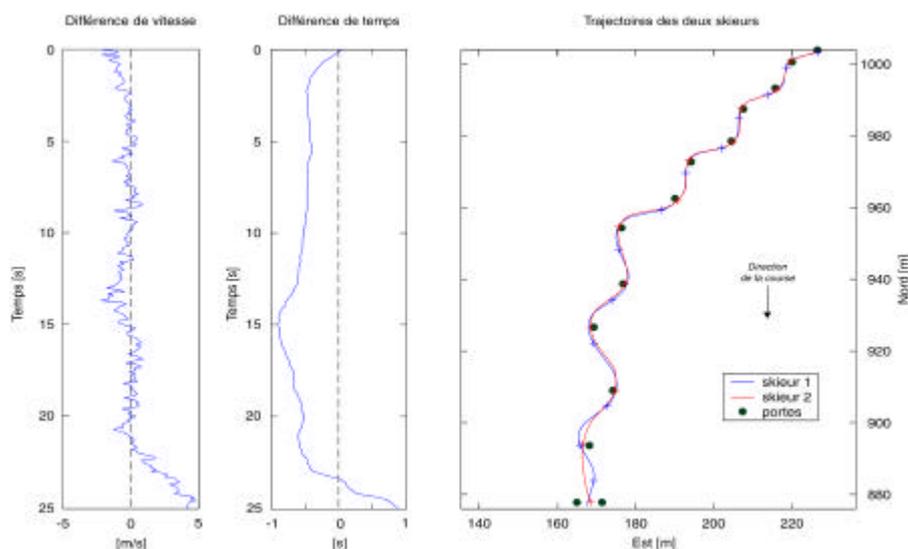


Figure 1 : Différents paramètres obtenus par mesures satellitaires servant à l'analyse détaillée d'une course.

Les accélérations ne sont a priori pas synchronisées avec les données GPS puisqu'elles sont enregistrées indépendamment. Il convient donc de les synchroniser avec les données GPS. Pour ce faire, on procède au calcul de la corrélation croisée entre l'accélération filtrée et le temps de passage du skieur à chaque porte évalué par GPS. La valeur maximale de corrélation indique le décalage temporel entre ces deux fichiers de mesure. En appliquant ce décalage aux mesures accélérométriques ceci permet d'obtenir les résultats synchronisés présentés à la *Figure 2*. L'accélération verticale est intéressante pour déterminer à quel moment un skieur se baisse pour passer une porte et quand il se relève.

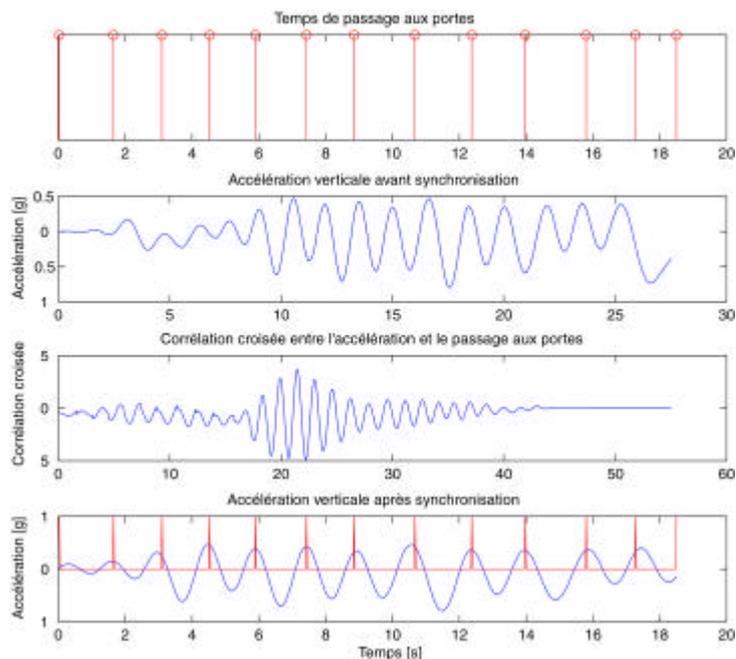


Figure 2 : Principe de synchronisation des mesures accélérométriques permettant de déterminer le mouvement du skieur lors de chaque passage de porte.

Perspectives

Les résultats des essais réalisés à Crans-Montana ont montré la faisabilité d'un tel projet. Il convient cependant de mentionner les limites de ce système à l'heure actuelle. Le poids et l'encombrement des antennes présentent le plus grand problème, aussi bien quant à l'ergonomie qu'à la sécurité. Les récepteurs utilisés mesurent à une fréquence allant jusqu'à 20 Hz et donnent des résultats précis. Par contre, il ne faut pas perdre de vue qu'elles ont été développées pour des travaux géodésiques et non pour des applications sportives où le poids et l'encombrement sont des facteurs essentiels. La miniaturisation de l'équipement est en cours.

De plus, les conditions de réception des signaux GPS étaient idéales lors des tests, ce qui n'est pas toujours le cas dans une descente réelle. En effet, certains tracés de compétition comptent des passages en forêt ou même en tunnel, comme la descente du Lauberhorn à Wengen.

Une fois la miniaturisation achevée, on peut envisager d'intégrer la méthode développée dans ce travail avec celle de l'entreprise InMotion Technologies Ltd., ainsi chaque mouvement du skieur pourrait être mis en relation directe avec son effet. Ceci emmènera l'analyse des courses de ski, espérons-le, vers de nouveaux sommets.

Bibliographie

- Hatch, R. (1982) The Synergism of GPS Code and Carrier Doppler Measurements, Proceeding of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, NM.
- Kunt M. (1980) Traitement Numérique des Signaux. Département d'Electricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Leick A. (1995) GPS, Satellite Surveying, second edition. Department of Surveying Engineering, University of Maine.
- 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.

Auteurs

Simon Grünig
Ingénieur diplômé EPF
Office Fédéral de Topographie
Division photogrammétrie numérique
3084 Wabern

Quentin Ladetto
Géomatique-Topométrie
EPFL-DGR
CH-1015 Lausanne
e-mail: quentin.ladetto@epfl.ch