

Estimation de la cinématique articulaire par optimisation numérique

Floren Colloud¹, Vincent Fohanno¹, Mickaël Begon^{2,3} et Patrick Lacouture¹

¹ Institut Pprime UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers – ENSMA, Poitiers, France

² Université de Montréal, Département de Kinésiologie, Montréal (Qc) Canada

³ Centre de Recherche de l'Hôpital Sainte-Justine, Montréal (Qc) Canada

floren.colloud@univ-poitiers.fr

La cinématique articulaire est l'une des données d'entrée de tout modèle musculo-squelettique. Son estimation à partir de données mesurées peut être améliorée par l'utilisation d'outils numériques avancés tel que l'optimisation globale ou filtre de Kalman. Des études se sont intéressées aux effets de contraintes cinématiques strictes pour des mouvements en boucle ouverte et de contraintes souples pour des mouvements en boucle fermées. Le but de cette étude est de formuler des recommandations sur le type d'algorithme et de contrainte afin de reconstruire la cinématique articulaire en présence de boucles fermées.

Mots-clés : chaîne cinématique, optimisation globale, filtre de Kalman, contrainte de fermeture de boucle.

INTRODUCTION

Optimisation globale (GO) et filtre de Kalman (KF) sont des outils numériques de plus en plus populaires pour estimer la cinématique articulaire à des fins de simulation ou pour introduire des contraintes cinématique. Si des études se sont intéressées aux contraintes articulaires (Duprey et coll., 2010) aucune ne s'est penché sur les fermetures de boucles présentent dans de nombreux sports (comme le pagayage en kayak), l'ergonomie ou des études cliniques. Pour assurer la fermeture de boucle, notre groupe de recherche a récemment proposé l'utilisation de contraintes souples (Fohanno et coll., 2010), méthode alternative aux contraintes strictes. Le but de cette étude est de formuler des recommandations sur le type d'algorithme et de contrainte afin de reconstruire la cinématique articulaire en présence de boucles fermées en évaluant (i) la précision de reconstruction, (ii) le respect de la fermeture de boucle, et (iii) la régularité de la cinématique articulaire.

MÉTHODES

Dix athlètes de haut niveau en kayak de course en ligne (âge : 20.1 ± 2.2 ans, taille : 1.81 ± 0.09 m, masse : 75.9 ± 9.1 kg), ont participé à cette étude. Ils ont été équipés de 95 marqueurs cutanés (M_{1-95}) afin de définir les 17 segments de la chaîne cinématique. Deux marqueurs additionnels (M_{96-97}) ont été placés sur la pagaie. Les trajectoires tridimensionnelles de ces marqueurs ont été enregistrées à 250 Hz par 10 caméras. Les centres articulaires ont été déterminés par une méthode fonctionnelle impliquant des mouvements selon tous les ddl. Une chaîne cinématique composée de 42 ddl a été définie pour chaque athlète dont les paramètres de la chaîne cinématique (longueur des segments, centre articulaire, coordonnées des marqueurs) ont été estimés à partir d'une position anatomique. Les participants ont réalisé un test de 45 s à 80 coups par minute sur un ergomètre de kayak. La cinématique articulaire a été reconstruite en utilisant 5 algorithmes: GO et KF sans contrainte de fermeture de boucle (G et K) et avec des contraintes souples introduites dans la fonction objectif sous forme de pénalités (G_p et K_p), et GO avec des contraintes strictes (G_c). L'analyse a été effectuée sur 10 cycles sélectionnés au milieu du test. Pour évaluer la précision de reconstruction de chaque algorithme, l'erreur globale de reconstruction a été calculée comme l'erreur quadratique moyenne entre les marqueurs mesurés et les marqueurs reconstruits par le modèle. Le respect de fermeture de boucle - pieds en contact avec le cale-pied et les deux demi-pagaies formant un segment - est défini par l'erreur observée entre marqueurs mesurés et marqueurs reconstruits au niveau des extrémités de la chaîne cinématique. La régularité de la cinématique a été estimée par la Mean Power Frequencies - fréquence à laquelle la puissance moyenne de la densité spectrale de puissance existe - des dérivées premières des coordonnées généralisées. Des analyses de variances, suivis de tests de comparaisons multiples si nécessaire, ont été réalisées sur ces trois critères.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Sans l'introduction de contraintes dans la reconstruction, les erreurs de fermeture de boucle étaient similaires aux erreurs de reconstruction, environ 10 mm, et ont été réduites à 2 mm avec l'introduction des contraintes. Pour GO sous contraintes strictes et KF avec contraintes souples, les erreurs de reconstruction ont été légèrement augmentées d'environ 2-3 mm. Par conséquent, les contraintes sont indispensables afin d'assurer la fermeture de boucle tout en gardant une bonne précision de reconstruction. Les algorithmes KF fournissent une cinématique articulaire plus lissée (plus faibles MPF) que les trois algorithmes GO. Contrairement aux contraintes souples, les contraintes strictes de fermeture de boucle conduisent à augmenter sensiblement les MPF. C'est une caractéristique importante à prendre en compte si l'on souhaite réaliser des simulations en présence de fermetures de boucle où le calcul des vitesses et accélérations articulaires est nécessaire.

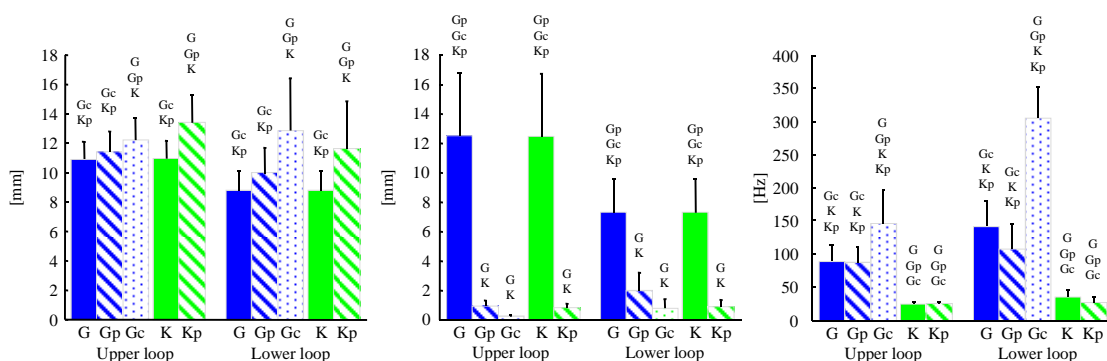


Figure 1 a) Erreur de reconstruction en mm (à gauche) ; b) Erreur de fermeture de boucle en mm (au milieu) et c) Mean Power Frequencies en Hz (à droite). Une différence significative est signalée par le nom de l'algorithme au dessus de la barre d'écart type.

CONCLUSION

Pour conclure, aucun algorithme ne fournit les meilleurs résultats pour l'ensemble des critères de performance. L'algorithme KF associé à des contraintes souples est le meilleur compromis entre la précision de la reconstruction, le respect de la fermeture de boucle et la régularité de la cinématique articulaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Duprey, S., Chèze, L., and Dumas, R., 2010, "Influence of Joint Constraints on Lower Limb Kinematics Estimation from Skin Markers Using Global Optimization," *Journal of Biomechanics*, 43(14), pp. 2858-2862.
- Fohanno, V., Colloud, F., Begon, M., and Lacouture, P., 2010, "Estimation of the 3d Kinematics in Kayak Using an Extended Kalman Filter Algorithm: A Pilot Study," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 13 (suppl.1), pp. 55-56.