

Analyse du mouvement: des informations importantes pour la pratique sportive et les activités dans la vie de tous les jours

Beat Göpfert^a, Julien Frère^b, Cora Huber^a, Corina Nüesch^c, Jacqueline Romkes^d

^a Labor für Biomechanik & Biokalorimetrie (LOB²), CM & BE Universität Basel, Schweiz, ^b Centre d'Etude des Transformations des APS (CETAPS), Université de Rouen, Frankreich, ^c Orthopädische Universitätsklinik, Universitätsspital Basel, ^d Labor für Bewegungsuntersuchungen, CM & BE, Universitätskinderhospital beider Basel

Résumé

L'analyse du mouvement est une technique objective servant à examiner en détail le déroulement des mouvements de la vie de tous les jours. La combinaison de cette technique avec d'autres méthodes de mesures, telles que la mesure de la force et l'électromyographie, ainsi que différentes analyses mathématiques, nous permet de disposer d'un arsenal unique en son genre pour effectuer une analyse dynamique du corps en mouvement. Cet article a pour but de donner un aperçu des différentes méthodes utilisées et des formidables possibilités de l'analyse du mouvement dans des activités extrêmement variées.

Introduction

La technique appliquée aujourd'hui dans l'analyse du mouvement tire son origine des travaux d'Eadweard Muybridge, qui a réalisé pour la première fois à Palo Alto (Californie), en juin 1878, des photos en série d'un cheval de course. Il avait utilisé à l'époque déjà 12 caméras à haute résolution et cet équipement lui a permis de filmer le déroulement précis des mouvements des quatre pattes d'un cheval à la course [1]. De nos jours, il existe des caméras numériques haute vitesse, capables de produire jusqu'à 2000 images par seconde avec une résolution de 16 méga-pixels (VICON, Oxford, UK).

La technologie d'analyse du mouvement s'utilise aujourd'hui dans de très nombreux domaines, principalement dans l'industrie du film et des jeux vidéo. La recherche biomécanique s'attache quant à elle à comprendre les déroulements des mouvements chez les êtres vivants. L'analyse du mouvement trouve cependant aussi régulièrement des indications dans la pratique clinique quotidienne. Ce type d'analyses a pour but d'améliorer la qualité de vie des patients, par exemple dans le cadre de la planification de certaines opérations ou du contrôle de certains traitements complexes. Un autre domaine d'utilisation de l'analyse du mouvement est la recherche dans le domaine du sport. Elle vise alors principalement l'amélioration de la performance par une optimisation de l'équipement en fonction du schéma de mouvement et des besoins individuels. Pour que les applications mentionnées ci-dessus puissent fournir un maximum d'informations sur le mouvement, il faut pouvoir mesurer les forces s'exerçant par et sur le corps et appréhender l'activation des muscles mis en jeu au cours de ce mouvement. Diffé-

rentes méthodes mathématiques sont utilisées pour analyser les données, par exemple la transformation en ondelettes, qui permet de capter différents nouveaux éléments de l'activation musculaire.

Méthode

Le standard actuel pour enregistrer les mouvements de manière tridimensionnelle repose sur le recours à des caméras numériques haute vitesse. On utilise en général des marqueurs à réflexion passive, collés en des endroits bien définis du corps des sujets ou des patients. On filme ensuite les déplacements de ces marqueurs à l'aide de 6 à 12 voire davantage de caméras numériques haute vitesse fonctionnant de manière synchrone. Il faut un nombre aussi élevé de caméras parce que chaque marqueur doit être filmé par au moins deux caméras enregistreuses afin de déterminer avec précision sa position dans l'espace à chaque instant. Des données bidimensionnelles saisies par chacune des caméras, on déduit ensuite les positions dans l'espace tridimensionnel de chacun des marqueurs à l'aide d'une méthode de

Un autre domaine d'utilisation de l'analyse du mouvement est la recherche dans le domaine du sport. Elle vise alors principalement l'amélioration de la performance par une optimisation de l'équipement en fonction du schéma de mouvement et des besoins individuels

transformation linéaire [2]. L'étape suivante consiste à déterminer par une analyse cinématique les vitesses de mouvement et les accélérations du corps et de ses différents segments. Les données cinématiques, mais aussi les forces s'exerçant sur et par le corps, jouent éga-

lement un rôle très important pour la compréhension des mouvements. Ces forces sont mesurées à l'aide d'un grand nombre de capteurs de pression et de force. Pour mesurer les forces de réaction au sol, on utilise le plus souvent des plateformes de force à enregistrement tridimensionnel. A partir de la combinaison des données cinématiques et des forces en jeu, on peut calculer, par méthode de dynamique inverse [3], les contraintes qui s'exercent au niveau des articulations et ainsi réaliser une analyse cinétique du mouvement.

Au-delà des informations cinématiques et cinétiques relatives à un mouvement, l'activation musculaire fournit encore d'autres données très importantes, qui peuvent être mesurées le plus facilement par l'électromyogramme (EMG de surface) [4]. Le signal électrique dé-



Beat Göpfert

Les auteurs certifient qu'aucun conflit d'intérêt n'est lié à cet article.

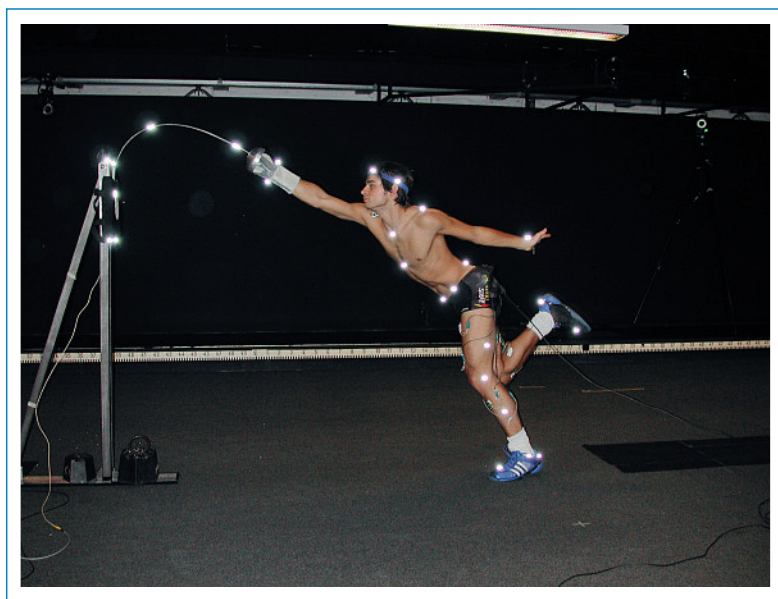


Figure 1
Escrimeur exécutant une flèche dans le laboratoire d'analyse du mouvement de Bâle.

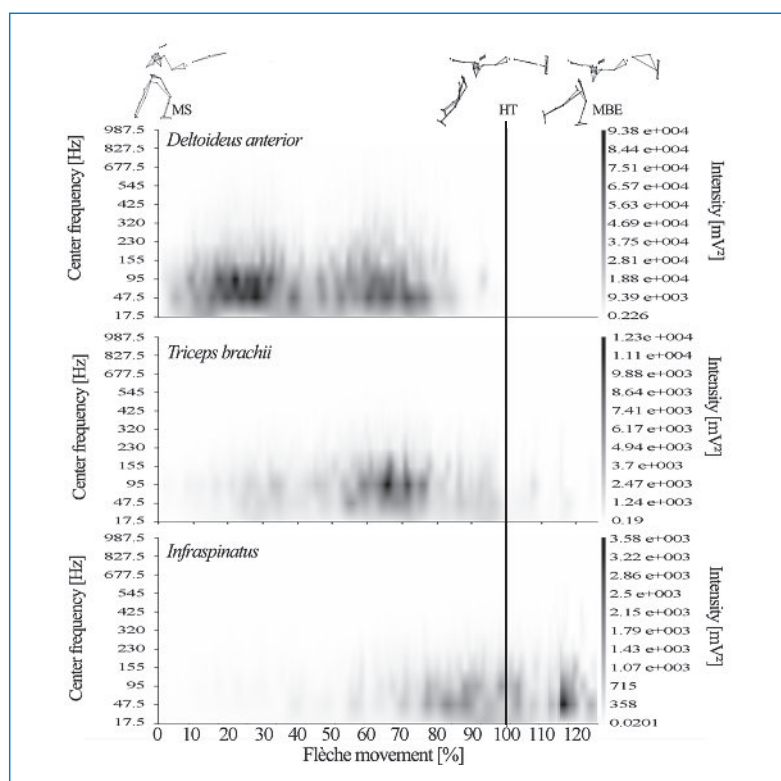



Figure 2
Valeur moyenne chez un sujet lors de dix flèches, représentée par un modèle d'intensité multimusculaire. Le calcul de Graus montre l'intensité de l'activité musculaire (basse: blanc; haute: noir).
MS = début du mouvement; HT = toucher de la cible; MBE = flexion maximale de l'arme.

tecté en regard du muscle, autrement dit le signal brut de l'EMG, donne des renseignements sur la qualité du signal, ainsi que sur le moment et la durée de l'activation du muscle considéré. Pour recueillir encore d'autres informations sur l'activité musculaire, il faut

recourir à des analyses approfondies. Certaines méthodes courantes permettent de mesurer les propriétés temps-amplitudes et la distribution des fréquences. La transformation en ondelettes des signaux EMG [5] autorise en revanche l'analyse simultanée des composantes temps-fréquence-intensité au cours des mouvements. Le modèle d'intensité qui en découle permet un examen détaillé des plages de hautes et de basses fréquences et de l'intensité relative pendant le déroulement d'un mouvement. Ceci donnera des informations sur l'adaptation de la musculature, en d'autres termes le tuning musculaire. La transformation en ondelettes permet aussi de calculer des valeurs moyennes de tests répétés, de sujets ou de groupes de sujets.

L'utilisation des techniques et des méthodes décrites ci-dessus offre la possibilité d'analyser toute une variété de mouvements très différents et d'intégrer ces variations dans certains problèmes orthopédiques (par ex. type de traitement orthopédique ou réhabilitation). Voici trois exemples illustrant bien le grand champ d'applications des techniques d'analyse du mouvement.

Escrime

L'objectif de cette étude sur l'escrime était de mieux comprendre le déroulement du mouvement et le modèle d'activation musculaire chez les escrimeurs d'élite dans le but d'améliorer la qualité de l'entraînement tout en réduisant le risque de blessures. Huit escrimeurs d'élite expérimentés ont participé à ce travail, qui a consisté en une analyse tridimensionnelle du mouvement d'attaque appelé «flèche», associée à un enregistrement EMG de l'activité de certains muscles choisis. Les résultats ont montré que l'escrimeur déclenche son attaque par une extension du bras portant l'arme tout en abaissant le centre de gravité de son corps, porté vers l'avant par l'activation des deux muscles tibiaux antérieurs. L'impulsion donnée par la jambe arrière pour produire le mouvement vers l'avant démarre par une activation des muscles vaste médian, droit antérieur et jumeau interne [6]. L'expérience des escrimeurs influence la coordination musculaire entre les bras et les jambes. Les tireurs les moins expérimentés exécutent le mouvement et déclenchent l'activation de ces différents muscles de manière séquentielle, alors que les tireurs plus expérimentés appliquent une stratégie synchrone. Cette seconde variante permet à ces escrimeurs de masquer plus longtemps leur stratégie d'attaque, ce qui constitue évidemment un grand avantage durant l'assaut. L'analyse EMG du mouvement de l'épaule durant l'attaque à flèche illustre l'interaction des muscles deltoïde antérieur et infraspinal. Une forte activité du muscle deltoïde antérieur atténue celle du muscle infraspinal et inversement [7]. L'activation du muscle infraspinal est par ailleurs plus marquée que celle des muscles deltoïde antérieur et triceps brachial lorsque l'arme se plie après avoir touché son but. Ce modèle d'activation musculaire garantit la stabilisation de l'épaule utilisant la contraction du muscle infraspinal [8] (fig. 1 et 2 .

Marche avec des chaussures MBT

Il s'agit d'un type de chaussures inspiré de la démarche à pieds nus des guerriers Masaï (MBT) et qui peut être portée durant les activités de la vie quotidienne. Ses

inventeurs pensent que les chaussures traditionnelles, avec leur semelle plate entrant en contact avec les surfaces dures sur lesquelles nous marchons dans nos pays, ont un impact négatif sur le corps humain. Le port de chaussures MBT vise à reproduire l'instabilité naturelle propre au sol mou de la savane d'Afrique orientale. D'un point de vue clinique et scientifique, l'intérêt de cette étude était de tester l'influence de la chaussure MBT sur le schéma de la marche chez des sujets sains et chez des patients. Le cas échéant, des recommandations pourraient éventuellement être faites concernant le choix des patients susceptibles de bénéficier des chaussures MBT et les personnes auxquelles le port de telles chaussures devrait au contraire être déconseillé en raison de risques pour leur santé.

Deux études scientifiques [9, 10] ont analysé la marche et mesuré l'activation musculaire au niveau des jambes, ainsi que les effets sur l'équilibre, lors du port de chaussures MBT. Douze sujets sains ayant porté ces chaussures durant un certain temps déjà ont participé à ce travail. L'influence des chaussures MBT sur l'équilibre a été examinée au cours de la première étude [9] de la façon suivante:

1. position debout en appui bipodal, yeux ouverts et fermés, sur une plateforme de force;
2. position debout en appui monopodal sur la jambe dominante et sur la jambe non-dominante sur une plateforme de force.

Les mesures ont porté sur les oscillations du point d'application de la force (centre of pressure) dans les axes antéropostérieur et médio-latéral avec aux pieds soit des chaussures MBT, soit des chaussures de ville normales. Les résultats ont montré que les oscillations dans les deux axes, antéropostérieur et médio-latéral, étaient significativement plus importantes avec les chaussures MBT qu'avec les chaussures traditionnelles. Il n'y avait en revanche pas de différence significative lors de l'appui monopodal. On peut en conclure que la chaussure MBT induit une instabilité qui pourra et devra être utilisée pour l'entraînement de l'équilibre. On remarquera cependant que les chaussures MBT pourraient constituer un danger pour la santé des personnes à haut risque de chutes (par ex. les personnes âgées) ou souffrant de certaines maladies neurologiques.

La seconde étude a examiné l'activation musculaire et le déroulement de la marche durant le port de chaussures à l'aide d'une analyse de la marche et avec enregistrement EMG simultané [9]. La figure 3 illustre le déroulement de la flexion plantaire dorsale du pied au cours du cycle de la marche. Avec la chaussure MBT, la flexion dorsale est plus importante lors du contact initial avec le sol qu'avec la chaussure de ville normale. On observe ensuite pendant la phase d'appui une flexion plantaire continue. La phase d'oscillation est aussi caractérisée par une flexion dorsale plus puissante, qui prépare le prochain contact avec le sol. La conséquence de ce schéma de mouvement est une plus grande activité des muscles gastrocnémien et tibial antérieur, ce qui renforce évidemment l'effet d'entraînement sur ces derniers. Pour tirer le plus grand bénéfice des chaussures MBT, le sujet qui les porte doit avoir une mobilité en dorsiflexion normale et être capable de marcher en

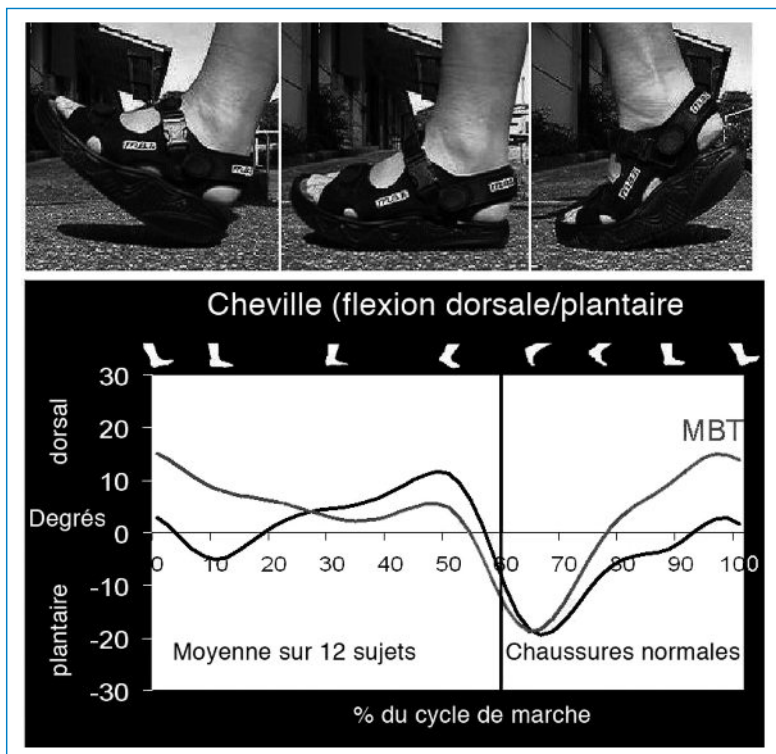


Figure 3
Mouvements de flexion dorsale et plantaire de la cheville au cours du cycle de la marche avec des chaussures de ville normales (noir) et des chaussures MBT (gris). Valeurs moyennes du schéma de mouvement de douze sujets en bonne santé habitués à courir avec des chaussures MBT.



Figure 4
Skieur acrobatique au Hasliberg (Oberland bernois).

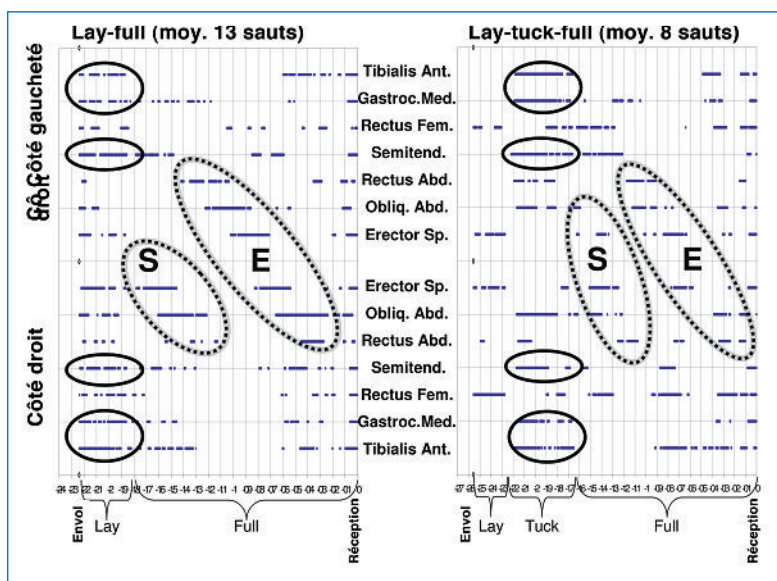


Figure 5

Modèle d'activation musculaire ON-OFF au cours de sauts lay-full et lay-tuck-full.

Cercles noirs: la préactivation des muscles du membre inférieur en vue de l'élément «full» survient déjà au cours de l'élément précédent.

Cercles en traitillés gris: Différences d'activation séquentielle de la musculature du tronc lors du déclenchement (S) et de la fin (E) du mouvement de rotation durant l'élément «full».

posant le talon. Ces limitations montrent que les chaussures MBT ne conviennent pas à certains groupes de patients, par exemple les hémiplegiques.

Ski acrobatique

Le but des tests effectués au cours de certains exercices de ski acrobatique était d'examiner le modèle d'activation musculaire des athlètes pendant les différents éléments du saut au tremplin pour contribuer à l'amélioration de l'entraînement et de la réception. Il s'agissait surtout d'améliorer les résultats en compétition et de réduire les risques de blessures dues à de mauvaises réceptions de sauts, en particulier au niveau des genoux. L'EMG a été enregistré par un système mobile portant sur 14 muscles, puis soumis à une transformation en ondelettes. Les sauts ont par ailleurs été entièrement enregistrés par vidéo.

Les deux sauts suivants ont été analysés:

1. lay-full: double saut périlleux arrière tendu avec une vrille dans la deuxième rotation;
2. lay-tuck-full: triple saut périlleux arrière, le premier tendu, le second carpé et le troisième tendu avec une vrille.

Les résultats montrent que chaque élément du saut possède son propre modèle d'activation musculaire et que la séquence des différents éléments du saut influence le mode d'activation musculaire entre les éléments (fig. 4 et 5). On a également pu démontrer que les modes d'activation de la musculature déclenchant et terminant le mouvement de rotation de la vrille dans l'élément «full» diffèrent en fonction des positions du corps. Ces informations peuvent aider les entraîneurs à améliorer les méthodes de l'entraînement de base et à entraîner de façon ciblée les phases de transition entre les différents éléments des sauts [11].

Discussion

L'analyse du mouvement et les différentes techniques qui la complètent ouvrent des possibilités extraordinaires pour la meilleure compréhension de la dynamique des mouvements des êtres vivants. L'interprétation des résultats nécessite toutefois une certaine expérience car les logiciels des systèmes de mesure ne savent que calculer le déroulement des mouvements des différents segments du corps dans l'espace, mais ne disent rien sur leur fonctionnalité. Un mouvement de varus du genou lors de la marche peut par exemple être la conséquence d'une rotation interne de la hanche. Pour réduire les risques d'erreur d'interprétation, il convient d'analyser le déroulement des mouvements du corps dans leur ensemble. La combinaison des mesures de forces et des enregistrements EMG améliore l'analyse du mouvement. Elle permet de mieux saisir la préparation musculaire et la réaction aux forces qui s'exercent durant le mouvement. Le jogging en est un très bon exemple. L'activation musculaire qui précède la phase de contact avec le sol varie ici en fonction de la dureté des chaussures et du sexe de l'athlète [12]. Ce genre d'informations peut contribuer à une adaptation des éléments de l'équipement aux besoins des utilisateurs, mais aussi à optimiser les schémas de mouvement individuels. Dans le meilleur des cas, cela

Pour réduire les risques d'erreur d'interprétation, il convient d'analyser le déroulement des mouvements du corps dans leur ensemble

mène même à une médaille d'or, comme cela a été le cas pour Eveline Leu, skieuse acrobatique lors des Jeux olympiques d'hiver de 2006 à Turin [13]. Mais la médaille d'or n'est évidemment pas une

obligation et l'analyse du mouvement peut parfois aussi apporter des informations précieuses dans une optique d'amélioration de la qualité de vie.

Correspondance:

Beat Göpfert
Labor für Biomechanik & Biokolorimétrie (LOB2)
CM & BE Universität Basel
c/o Bio-/Pharmazentrum
Klingelbergstr. 50-70
CH-4056 Basel
beat.goepfert@unibas.ch

Références recommandées

- Frère J, Huber C, Nüesch C, Fischer M, Göpfert B, Wirz D, et al. Electromyographic analysis of three shoulder muscles using wavelet transformation and spherical separation. *Archivos de Medicina del Deporte*. 2008;25:439.
- Romkes J. Statische Gleichgewichtskontrolle mit dem MBT-Schuh. *Schweiz Z Sportmedizin und Traumatologie*. 2008;56:61-5.
- Göpfert B, Huber C, Lüthi A, Wirz D. Analysis of muscular coordination in different jumping elements in aerial freestyle skiing. In *Proceedings of the World Congress of Performance Analysis of Sport VIII*: Magdeburg, Germany, Sept. 3-6. 2008.

Vous trouverez la liste complète et numérotée des références dans la version en ligne de cet article sous www.medicalforum.ch.

Bewegungsanalyse: Wichtige Informationen für Sport und Alltag / Analyse du mouvement: des informations importantes pour la pratique sportive et les activités dans la vie de tous les jours

Weiterführende Literatur (Online-Version) / Références complémentaires (online version)

- 1 Mitchell L. The man who stopped time. *Stanford Magazine*. 2001;May/June.
- 2 Abdel-Aziz YI, Karara HM. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *ASP Symposium on Close Range Photogrammetry*. Falls Church: American Society of Photogrammetry; 1971. p 1–18.
- 3 Nigg BM, Herzog W, editors. *Biomechanics of the musculo-skeletal system*. 3rd ed. West Sussex UK: Wiley; 2006.
- 4 Konrad P. *ABC of EMG – A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography*. Scottsdale: Noraxon Inc.; AZ USA, 2005.
- 5 von Tscharnner V. Intensity analysis in time-frequency space of surface myoelectric signals by wavelets of specified resolution. *J Electromyogr Kinesiol*. 2000;10(6):433–45.
- 6 Nüesch C, Göpfert B, Fischer M, Frère J, Wirz D, Friederich NF. Wavelet-EMG-analysis of the leg muscles in fencing during a flèche attack. In *Proceedings of the 17th Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology: Ontario, Canada, 2008*.
- 7 Frère J, Huber C, Nüesch C, Fischer M, Göpfert B, Wirz D, et al. Electromyographic analysis of three shoulder muscles using wavelet transformation and spherical separation. *Archivos de Medicina del Deporte*. 2008;25:439.
- 8 Frère J, Nüesch C, Fischer M, Göpfert B, Wirz D, Friederich NF. Shoulder muscles coordination of the weapon side during a fencing attack: The Flèche. *J Biomech*. 2008;41:58.
- 9 Romkes J, Rudmann C, Brunner R. Changes in gait and EMG when walking with the Masai Barefoot Technique. *Clin Biomech*. 2006;21:75–81.
- 10 Romkes J. Statische Gleichgewichtskontrolle mit dem MBT-Schuh. *Schweiz Z Sportmedizin und Traumatologie*. 2008;56:61–5.
- 11 Göpfert B, Huber C, Lüthi A, Wirz D. Analysis of muscular coordination in different jumping elements in aerial freestyle skiing. In *Proceedings of the World Congress of Performance Analysis of Sport VIII: Magdeburg, Germany, Sept. 3–6. 2008*.
- 12 von Tscharnner V, Goepfert B. Gender dependent EMGs of runners resolved by time/frequency and principal pattern analysis. *J Electromyogr Kinesiol*. 2003;13:253–72.
- 13 Lüthi A, Böttinger G, Theile T, Rhyner HU, Ammann W. Freestyle aerial skiing motion analysis and simulation. *J Biomech*. 2006;39:186.