

VU Research Portal

EMG-based muscle force estimation

Staudenmann, D.

2007

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Staudenmann, D. (2007). *EMG-based muscle force estimation: Implications of measurement and analysis techniques*. Digital Printing Partners Utrecht B.V.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

SUMMARY

EMG-based muscle force estimation

Implications of measurement and analysis techniques

The aim of the present thesis was to assess the implications of several measurement- and analysis-techniques in EMG-based muscle force estimation. Three different measurement techniques were used: (1) conventional bipolar electrodes, (2) high-density EMG (HD-EMG) grids with closely spaced electrodes, and (3) multi-channel electrode configurations. With these techniques, muscle-joint-systems of varying complexity were studied: (1) the trunk (flexors and extensors), (2) arm extensor (triceps brachii), and (3) calf muscle (triceps surae). The signal analysis techniques used included high-pass filtering, “whitening”, as well as principal component analysis (PCA) and independent component analysis (ICA). The findings presented in this thesis provide evidence that these data acquisition methods and processing techniques can contribute to a substantial increase of the reliability of surface EMG as an estimator of muscle force.

In the first study (chapter 2), the lumbar spine was considered. The aim of this study was to investigate how EMG processing (i.e., high-pass filtering and whitening) affects outcomes of a biomechanical model of the lumbosacral muscle-joint-system. Conventional bipolar electrodes were attached over selected trunk muscles. The model output comprised (1) the net moment, (2) the joint contact force, and (3) the joint’s stability. Both, high-pass filtering and whitening improved muscle moment estimation and affected stability, whereas peak joint contact force was not affected. In addition, the electromechanical delay between EMG and force was affected. Based on these results and on model studies, we concluded that high-pass filtering and whitening enlarge the contribution of more distant motor units to the signal, resulting in a more balanced representation of deep and superficial motor units.

In the second study (chapter 3), the major elbow extensor muscle, the triceps brachii was considered. We used a two dimensional HD-EMG grid, which measures monopolar signals against a “far away” common reference electrode. The aim of this study was twofold: First the “raw” monopolar data were tested against a conventional bipolar electrode configuration with regard to the quality of EMG-based muscle force estimation.

Second, the relative importance of four aspects of the electrode configuration was tested: electrode size, inter-electrode distance, size of the area over which the electrodes are distributed, and the number of electrodes per unit of surface area. The results showed that HD-EMG in bipolar montage yields a 30% improvement in muscle force estimation quality as compared to conventional bipolar electrodes. Direct use of the "raw" monopolar EMG signals did not improve force estimation quality. Among the four sensor configuration aspects, the area over which the electrodes are distributed appeared to be responsible for the major part of the improvement (25% reduction of estimation error).

The third study (chapter 4) was based on the experiment described above. Since human skeletal muscles show a high diversity and heterogeneity in their fiber architecture, it is difficult to properly align the electrodes. Thus, our first aim was to analyze the effect of bipolar electrode configuration directions on the quality of EMG-based muscle force estimates. Second, we investigated whether principal component analysis (PCA), applied on monopolar HD-EMG signals, can improve this estimation. The bipolar electrode configuration direction optimally aligned with the muscle fibers caused a 13% improvement as compared to the worst alignment. PCA improved force estimates by about 40% compared to conventional bipolar electrodes and by about 12% compared to the optimally aligned multiple bipolar electrodes. Thus, the unbiased PCA-method results in a better overall representation of the muscle activity. Its independence of muscle architecture is a significant advantage in EMG-based muscle force estimation.

The fourth study (chapter 5) was also based on the experiment described in chapter 3, and explored whether independent component analysis (ICA), can further improve the quality of EMG-based force estimates. ICA is a method that, by using so-called blind source separation, extracts "independency". ICA yielded a significant improvement of up to 13% as compared to PCA. Thus, independency in the structure of surface EMG signals appears to contain relevant additional information for the prediction of muscle force from surface HD-EMG.

In the last and fifth study (chapter 6), the calf muscles were considered. Multi-channel surface EMG electrodes with larger interelectrode distances than used in HD-EMG, were attached over the entire surface of the triceps surae (TS). Muscles have been described to contain sub-modules, which are thought to be controlled independently and have distinct biomechanical functions. The first aim of this study was to investigate whether distinguishable muscle activation patterns can be detected in the TS by means of surface

EMG. The second aim was to determine whether, during voluntary contraction, patterns of muscle activation in different parts of the muscle could be related to forces generated into specific directions. Applying PCA, to extract the relevant portion of the signals, resulted in estimates of muscle activity that quite accurately tracked even fine fluctuations in force in an isotonic contraction. Furthermore, cluster analysis revealed a topographical organization of co-activated parts of the muscle that was different between subjects and did not evidently follow anatomical borders within the TS-muscles. Correlating cluster time series with forces at the foot in different directions showed that differentially activated parts of the TS had specific biomechanical functions.

It can be concluded that the applied measurement- and analysis- techniques substantially contribute to improvement of the quality of EMG-based muscle force estimation. Physical and physiological mechanisms explaining our results are discussed in the different chapters, but need substantiation in further research. Two key issues are (1) reliability and (2) representativeness of force estimates. High-pass filtering and whitening of single channel bipolar EMG were shown to lead to improvements with respect to both issues. A further step could be made with the use of multiple monopolar channels over the muscle, which allows application of post-hoc signal extraction techniques (e.g., spatial derivatives or PCA). Extraction of the maximal amount of independent information from a monopolar EMG data set by multivariate techniques (PCA, ICA) yielded substantial improvements of force estimates. Furthermore, coverage of the entire muscle surface with multiple electrodes was used to guarantee that representative samples of muscle activity could be obtained in spite of substantial heterogeneity over the muscle. These techniques can be used to study muscle activation at a much more detailed level than previously possible with surface EMG. It was shown that even the fine fluctuations in force in an isotonic contraction (unsteadiness) or the distribution of activity within the muscle related to prediction of specifically directed forces can be estimated.

SAMENVATTING

EMG-gebaseerde schatting van spierkracht

Implicaties van meet- en analysetechnieken

Het doel van dit proefschrift was de implicaties van verschillende meet- en analysetechnieken bij het schatten van spierkracht op basis van EMG-metingen te onderzoeken. Er werden drie verschillende meettechnieken onderzocht: (1) conventionele bipolaire elektroden, (2) een raster van dicht bij elkaar liggende elektroden (HD-EMG = high-density EMG) en (3) een multi-kanaals elektrode configuratie. Spier-gewrichtssystemen van variërende complexiteit werden daarmee onderzocht: (1) de romp (flexoren en extensoren), (2) arm extensor (m. triceps brachii), en (3) de kuitspier (m. triceps surae). Er werden een aantal analysetechnieken gebruikt, namelijk hoog-doorlaat filtering, “whitening”, principale componenten analyse (PCA) en onafhankelijke (independent) componenten analyse (ICA). De bevindingen die in dit proefschrift worden gepresenteerd laten zien dat deze meet- en analysetechnieken de betrouwbaarheid van oppervlakte EMG als schatter van spierkracht substantieel kunnen verbeteren.

De eerste studie (hoofdstuk 2) betrof de lumbale wervelkolom. Er werden conventionele bipolaire elektroden aangebracht op een selectie van rompspieren. Het doel van deze studie was om te onderzoeken wat de invloed is van bewerking van het EMG signaal (in dit geval hoog-doorlaat filtering en whitening) op de uitkomsten van een biomechanisch model van het lumbo-sacrale spier-gewrichtsysteem. De uitkomst van het model bestond uit (1) het netto moment, (2) de contact-kracht in het gewricht en (3) de stabiliteit van het gewricht. Zowel hoog-doorlaat filtering als whitening verbeterde de schatting van het netto moment, had invloed op de berekende stabiliteit, maar had geen invloed op de berekende contact-kracht in het gewricht. Verder werd het faseverschil tussen het EMG signaal en de kracht beïnvloed. Op basis van deze resultaten en op basis van door anderen uitgevoerde modelstudies concludeerden we dat hoog-doorlaat filtering en whitening de bijdrage van verder afgelegen motorische eenheden aan het signaal vergroten, waardoor er sprake is van een meer evenwichtige representatie van diepe en oppervlakkige motorische eenheden, de bouwstenen van de spier.

In de tweede studie (hoofdstuk 3) werd de belangrijkste strekker van de elleboog, de m. triceps brachii, onderzocht. We gebruikten een HD-EMG elektrode raster om monopolaire signalen te meten met een “ver” van de spier geplaatste elektrode als referentie. Het doel van deze studie was tweeledig: ten eerste werd een monopolaire versus een conventionele bipolaire elektrode configuratie getest met betrekking tot de kwaliteit van op EMG-gebaseerde schatting van spierkracht. Ten tweede werd het relatieve belang getest van vier aspecten van de elektrodeconfiguratie: grootte van de elektrode, afstand tussen elektroden, de grootte van het oppervlak waarover de elektroden verspreid zijn en het aantal elektroden per oppervlakte eenheid. De resultaten lieten zien dat, in vergelijking met conventionele bipolaire elektroden, HD-EMG een verbetering van 30% oplevert in de schatting van spierkracht. Dit was echter niet het geval wanneer de “ruwe” monopolaire signalen werden gebruikt. Van de vier aspecten van sensor configuratie bleek het oppervlak waarover de elektroden verspreid zijn verantwoordelijk voor een belangrijk deel van de verbetering (25% reductie van schattingsfout).

De derde studie (hoofdstuk 4) was gebaseerd op het hiervoor beschreven experiment. Aangezien menselijke skeletspieren een grote diversiteit en heterogeniteit vertonen in hun vezel architectuur is het moeilijk om elektrodes goed uit te lijnen. Daarom was het eerste doel om het effect te onderzoeken van bipolaire elektrode configuratie richting op de kwaliteit van EMG-gebaseerde schatting van spierkracht. Het tweede doel was te onderzoeken of deze schatting verbeterd kan worden met behulp van principale componenten analyse (PCA), toegepast op de monopolaire HD-EMG signalen. In vergelijking met de slechtste uitlijning bleek een optimaal uitgelijnde bipolaire elektrode configuratie een verbetering van 13% op te leveren. PCA verbeterde de schatting van spierkracht met 40% in vergelijking met conventionele bipolaire elektroden en met 12% in vergelijking met optimaal uitgelijnde multipele bipolaire elektroden. Dus de PCA methode resulteert in een betere op EMG-gebaseerde schatting van spierkracht. Bovendien is die schatting niet afhankelijk van vezelrichting, hetgeen eveneens een belangrijke verbetering is.

Het doel van de vierde studie (hoofdstuk 5), ook gebaseerd op het in hoofdstuk 3 beschreven experiment, was te onderzoeken of onafhankelijke componenten analyse (ICA) de kwaliteit van de schatting van spierkracht verder kan verbeteren. ICA is een methode die onafhankelijke informatie extraheert door gebruik te maken van zogenaamde “blind source separation”. In vergelijking met PCA leverde ICA een significante verbetering van 13% op. Extractie van de onafhankelijkheid in de structuur van de EMG

signalen blijkt dus relevante aanvullende informatie op te leveren voor de schatting van spierkracht uit oppervlakte EMG.

In de laatste en vijfde studie (hoofdstuk 6) werd de kuitspier onderzocht door het toepassen van multi-kanaals EMG op het gehele spieroppervlak van de m. triceps surae (TS). Er zijn aanwijzingen dat spieren sub-modules bevatten die te onderscheiden functies hebben en die onafhankelijk aangestuurd worden. Het eerste doel van deze studie was om te onderzoeken of er in de TS met behulp van oppervlakte EMG onderscheidbare activatie-patronen te vinden zijn. Het tweede doel was om vast te stellen of tijdens vrijwillige contracties activatie-patronen in verschillende delen van de spier gerelateerd zijn aan kracht generatie in een specifieke richting. Toepassing van PCA als beschreven in hoofdstuk 4 ter extrahering van het relevante deel van de EMG signalen, leidde tot een schatting van spieractivatie, die zelfs de kleine fluctuaties in kracht tijdens een isotone contractie nauwkeurig volgde. Cluster analyse liet een topografisch patroon van co-activatie van delen van de spier zien. Dit patroon verschilde tussen proefpersonen en volgde niet evident de anatomische grenzen van de delen van de spier. Correlaties tussen de tijdsignalen behorend bij de elektrode clusters en de onder de voet gemeten krachten toonden aan dat de onderscheidbare activatiepatronen in verschillende delen van de TS gerelateerd waren aan specifieke biomechanische functies.

Er kan geconcludeerd worden dat de toegepaste meet- en analysetechnieken leiden tot een substantiële verbetering van de kwaliteit van EMG-gebaseerde schatting van spierkracht. De fysische en fysiologische mechanismen die voor de beschreven resultaten verantwoordelijk kunnen zijn worden in de afzonderlijke hoofdstukken besproken, maar vragen om nadere studie. Twee sleutelbegrippen zijn (1) betrouwbaarheid en (2) representativiteit van krachtschatting. Met betrekking tot beide aspecten bleken hoog-doorlaat filtering en “whitening” van enkel-kanaals bipolair EMG tot verbetering te leiden. Een volgende stap kon worden genomen door het toepassen van multi-epole monopolaire kanalen over het spieroppervlak. Dit maakte de toepassing van post-hoc signaal-extractie technieken (zoals ruimtelijke afgeleiden of PCA) mogelijk. Extractie van de maximale hoeveelheid onafhankelijke informatie uit een monopolaire EMG dataset door toepassing van multivariate technieken (PCA, ICA) leverde substantiële verbetering op van kracht schatting. Door het bedekken van het gehele spieroppervlak met een groot aantal elektroden werd gezorgd dat er, ondanks de heterogeniteit over de spier,

representatieve samples van spieractiviteit werden verkregen. Deze technieken kunnen gebruikt worden om spieractivatie te bestuderen op een meer gedetailleerd niveau dan tot op heden gebruikelijk. Er werd aangetoond dat zelfs kleine fluctuaties in kracht tijdens een isotone contractie, of de verdeling van activiteit binnen een spier in relatie tot de voorspelling van kracht in een specifieke richting, kan worden geschat.