

**Entwicklung eines Verfahrens zur
nichtinvasiven Ableitung des
monopolaren Aktionspotentials einzelner
motorischer Einheiten**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieurin Astrid Renate Trachterna geb. Schmeer
aus Winz-Niederwenigern, Hattingen

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Günter Rau
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juni 2006

D82 (Diss. RWTH Aachen)

Astrid Trachterna

**Entwicklung eines Verfahrens zur
nichtinvasiven Ableitung des monophasischen
Aktionspotentials einzelner motorischer
Einheiten**



Helmholtz-Institut
für Biomedizinische Technik
an der RWTH Aachen

Shaker Verlag
D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5497-8

ISBN-13: 978-3-8322-5497-1

ISSN 1430-7316

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Entwicklung eines Verfahrens zur nichtinvasiven Ableitung des monopolaren Aktionspotentials einzelner motorischer Einheiten

Das räumlich hochauflösende EMG (HSR-EMG) bietet aufgrund der Kombination aus nichtinvasiver monopolarer Aufzeichnung und hoher räumlicher Auflösung eine gute Ausgangsbasis für eine detaillierte Analyse der Aktivität der motorischen Einheiten im Muskel. Das aufgezeichnete Potential ist eine Überlagerung der Aktionspotentiale aller zum diesem Zeitpunkt aktiven motorischen Einheiten im Erfassungsbereich des Elektroden-Arrays. Da das monopolare Aktionspotential einer einzelnen motorischen Einheit unverfälschte Informationen über den Aufbau und die Funktion dieser kleinsten separat aktivierbaren Teile eines Muskels beinhaltet, ist eine automatische Extraktion aus dem Summenpotential im Sinne einer vereinfachten, objektivierten Analyse der Signale wünschenswert.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren für die iterative Dekomposition der HSR-EMG-Daten entwickelt. Dazu werden aus dem Signalverlauf Phasen von Aktivität extrahiert, in denen Aktionspotentiale einzelner motorischer Einheiten sind. Diese werden auf ihr Verhalten bzgl. einer konstanten Feuerrate, d. h. ihrem Erscheinen im Signalverlauf mit einer nahezu konstanten und damit einer motorischen Einheit entsprechenden Periodizität untersucht. Außerdem wird die Morphologie der Signalform der Phasen von Aktivität durch aus einer Wavelet-Zerlegung gewonnene Merkmalsvektoren zur Bestimmung der Ähnlichkeit beschrieben. Aus der Kombination der Informationen über die Periodizität und den Grad der Ähnlichkeit der Phasen von Aktivität wird über die Zugehörigkeit der Signalabschnitte zu einzelnen motorischen Einheiten entschieden. Zur Eliminierung von Überlagerungseffekten durch gleichzeitig auftretende Aktionspotentiale wird das Verfahren iterativ ausgelegt.

Auf der Basis simulierter Daten wird das Dekompositions-Verfahren mit Hilfe eines genetischen Algorithmus an die Problemstellung angepaßt. Reale und simulierte Daten werden zerlegt, um die Zeitpunkte der Aktionspotentiale einzelner motorischer Einheiten zu bestimmen. Ausgehend von diesem Ergebnis werden die charakteristischen monopolaren Aktionspotentiale einzelner motorischer Einheiten durch getriggerte Mittelwertbildung extrahiert.

Abstract

Design of a procedure for the non-invasive detection of the monopolar single motor unit action potential

The combination of non-invasive monopolar detection and high spatial resolution in the high spatial resolution EMG (HSR-EMG) offers a good starting point for the detailed analysis of the motor unit activity in the muscle. The detected surface-potential is a superposition of the action potentials of all active motor units within the field of view of the electrode array. As the monopolar motor unit action potential contains unaltered information about composition and function of these smallest separately excitable parts of the muscle, an automatic extraction from the superposed potential for a simplified objective analysis of the signals is desirable.

This paper discloses a procedure for the iterative decomposition of the HSR-EMG-data. Phases of activity comprising motor unit action potentials are extracted from the signal. Their characteristics concerning a constant firing rate, i.e. their appearance with an almost constant periodicity corresponding to a motor unit, are examined. Furthermore, the morphology of the signal in the phases of activity is described by a feature vector based on a wavelet-transformation in order to quantify their similarity. The combination of the information on the periodicity and the level of similarity of the phases of activity provides the basis for the decision about the affiliation of the signals to single motor units. An iterative procedure eliminates effects due to superposition of action potentials occurring simultaneously.

The setting parameters of the iterative decomposition procedure are optimized by means of a genetic algorithm using simulated EMG-data. Real and simulated EMG-data are decomposed to determine the occurrence of single motor unit action potentials. Based on these results the characteristic monopolar single motor unit action potentials are extracted from the real data by a triggered average calculation.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik an der RWTH Aachen.

Mein Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Rau (ehemaliger Direktor des Helmholtz-Institutes) für die Betreuung und aktive Unterstützung und Förderung der Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. S. Leonhardt (Inhaber des Philips Lehrstuhls für Medizinische Informationstechnik) danke ich für das Interesse an meiner Dissertation und für die Übernahme des Korreferats.

Frau Dr. rer. nat. C. Dißelhorst-Klug, der Leiterin der Forschungsgruppe Biophysikalische Messtechnik des Helmholtz-Institutes, danke ich für die wertvollen Anregungen und intensiven Diskussionen.

Für die konstruktive Zusammenarbeit bei der Durchführung klinischer Studien und die daraus resultierenden Anregungen möchte ich mich bei Dr. med. Jörg Bahm (St. Franziskus Krankenhaus Aachen) bedanken.

Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe, insbesondere Herrn Elmar Junker für den technischen Support sowie dem medizinischen Doktoranden Volker Brandenbusch für die Unterstützung bei der Durchführung der klinischen Studien. Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Helmholtz-Institutes und ehemaligen Studenten bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, ohne die diese Promotion nicht möglich gewesen wäre. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Mann Morten, der mich während der gesamten Dauer der Promotion sowohl fachlich als auch persönlich unterstützt und motiviert hat.

Kleinmachnow, im Juni 2006

Astrid Trachterna

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Grundlagen | 5 |
| 2.1 | Die Physiologie des Muskels | 5 |
| 2.1.1 | Die Erregung von Zellen | 5 |
| 2.1.2 | Der Skelettmuskel | 7 |
| 2.1.3 | Feuerrate und Rekrutierung | 8 |
| 2.2 | Die Elektromyographie | 9 |
| 2.2.1 | Messverfahren der Elektromyographie | 9 |
| 2.2.2 | Das räumlich hochauflösende EMG | 12 |
| 2.2.3 | Diagnostik, Anwendung des EMG | 17 |
| 2.2.4 | Dekomposition | 20 |
| 2.3 | Modelle zur Simulation des Elektromyogramms | 23 |
| 2.3.1 | Muskelzelle und motorische Einheit | 23 |
| 2.3.2 | Potentiale auf der Hautoberfläche | 25 |
| 3 | Konzept | 29 |
| 3.1 | Zielsetzung | 29 |
| 3.2 | Lösungsansatz | 29 |
| 3.2.1 | Bestimmung von Phasen von Aktivität | 32 |
| 3.2.2 | Zuordnung der Aktionspotentiale zu motorischen Einheiten | 33 |
| 3.2.3 | Subtraktion und Iteration | 35 |
| 3.2.4 | Verifikation und Optimierung des Dekompositions-Verfahrens | 35 |
| 3.2.5 | Getriggerte Mittelwertbildung | 37 |
| 3.3 | Das "inverse" Problem | 37 |
| 4 | Dekomposition | 41 |
| 4.1 | Methoden | 41 |
| 4.1.1 | Zeit-Frequenz-Analyse | 41 |
| 4.1.2 | Distanzmaße | 47 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.3 | Optimierung | 49 |
| 4.2 | Verfahren der Dekomposition | 56 |
| 4.3 | Bestimmung der Phasen von Aktivität | 58 |
| 4.3.1 | Die Form des Aktionspotentials | 59 |
| 4.3.2 | Zeitabhängige Eigenschaften | 60 |
| 4.3.3 | Ortsabhängige Eigenschaften | 60 |
| 4.3.4 | Detektion von Potentialpeaks | 61 |
| 4.4 | Periodizität | 64 |
| 4.4.1 | Betrachtung der Feuerrate | 64 |
| 4.4.2 | Auslassungen | 64 |
| 4.4.3 | Bildung von Folgen von Aktionspotentialen | 65 |
| 4.4.4 | Qualitätsmaß für die Periodizität | 66 |
| 4.5 | Formanalyse der Potentialpeaks | 67 |
| 4.5.1 | Signalverhalten in den Nachbarkanälen | 67 |
| 4.5.2 | Auswahl der Signale | 71 |
| 4.5.3 | Wavelet-Analyse | 72 |
| 4.5.4 | Qualitätsmaß für die Ähnlichkeit der Form | 75 |
| 4.6 | Zuordnung zu motorischen Einheiten | 76 |
| 4.7 | Subtraktionsverfahren | 76 |
| 4.7.1 | Bildung eines Templates | 76 |
| 4.7.2 | Iteration | 77 |
| 4.8 | Anwendung des genetischen Algorithmus | 78 |
| 4.8.1 | Anpassen der Freiheitsgrade | 78 |
| 4.8.2 | Optimierung mit simulierten HSR-EMG-Signalen | 80 |
| 4.8.3 | Bestimmung der Zielfunktion der Optimierung | 82 |
| 5 | Ergebnisse | 85 |
| 5.1 | Ergebnisse der Optimierung | 85 |
| 5.1.1 | Ergebnis der Optimierung auf Basis der Trainingsdaten | 85 |
| 5.1.2 | Analyse der Optimierung | 86 |
| 5.1.3 | Berücksichtigung der Testdaten | 92 |
| 5.2 | Ergebnisse der Dekomposition | 92 |
| 5.2.1 | Ergebnisse der Dekomposition der Trainingsdaten | 92 |
| 5.2.2 | Verifikation des Ergebnisses auf Basis der Testdaten | 94 |
| 5.2.3 | Betrachtung realer Daten | 100 |
| 5.3 | Ergebnisse der Mittelwertbildung | 102 |
| 5.4 | Diskussion | 105 |
| 6 | Anwendungsbeispiele der Identifikation der Aktionspotentiale | 111 |
| 6.1 | Effekte an den Muskelfasernenden | 111 |
| 6.1.1 | Entstehen und Erlöschen des Aktionspotentials | 111 |
| 6.1.2 | Ergebnis | 112 |
| 6.1.3 | Diskussion | 113 |
| 6.2 | Die Läsion eines motorischen Nervis | 114 |
| 6.2.1 | Die Läsion des Plexus Brachialis | 114 |
| 6.2.2 | Ergebnis und Diskussion | 116 |
| 7 | Zusammenfassung | 117 |
| | Literaturverzeichnis | 125 |