

氏 名	なか むら ひで お 夫
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	人 博 第 267 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 文 化 ・ 地 域 環 境 学 専 攻
学位論文題目	Development of a measurement system for motor unit activity by surface EMG signal decomposition (表面筋電図デコンポジションによる運動単位活動計測システムの開発)
論文調査委員	(主 査) 教 授 森 谷 敏 夫 教 授 田 口 貞 善 助教授 小 田 伸 午

論 文 内 容 の 要 旨

脊髄中には α 運動ニューロンと呼ばれる神経細胞があり、神経線維を介して単一筋内の複数の筋線維を支配している。 α 運動ニューロン、その支配下の神経線維、筋線維を含めて運動単位(MU)と呼ぶ。単一筋にはMUが複数存在しており、それらが互いに協調して活動することによって筋の発生張力を制御している。つまり、MUは筋運動制御機構における機能単位とみなせる。よって、ヒトの筋運動制御機構を解明するためには、MU活動を計測することが必要不可欠であるといえる。

筋活動電位は筋電図(EMG)によって測定できる。EMGは、複数のMUが興奮することで発生するMU活動電位(MUAP)が干渉したものとして記録される。EMG中では、同一MUから発生したMUAPは類似して観測されるが、異なるMUのMUAP波形同士にはそれぞれ相違がある。その波形の相違を利用して、いずれのMUから発生したMUAPかを分類する手法をEMGデコンポジションと呼ぶ。EMGデコンポジションでは針電極などに代表される侵襲的測定法が用いられることが多い。それに対し、皮膚表面に電極を貼りつけ筋活動電位を計測する非侵襲的測定法がある。侵襲的測定法ではMUAP波形の特徴が明確で、雑音も少なく測定できるため、EMGデコンポジションに適している。一方、表面EMGは、電極と筋との間に皮膚や皮下組織があるため、MUAPの振幅の低減や外部雑音の影響を受け、EMGデコンポジションには不向きである。ただし、侵襲的測定法では、感染症対策や測定対象筋に電極を配置するのに技能を要する。それに対して、表面EMGは測定が簡便であり、より多くの人がMU活動計測を利用するためには、表面EMGの方が都合がよいといえる。

そこで本研究は、表面EMGからEMGデコンポジションするシステムを開発することを目指したものである。また、その応用として、筋-神経系活動を定量的に評価するためには「基準」となるべき評価尺度が望まれる。なぜなら、筋-神経系活動に関するいずれの指標においても実験条件の相違(例、筋の種類、疲労度など)に依存せず一意に活動の度合を理解できる精度をもつ「基準」が必要となるからである。そこで単一MU活動を絶対的に評価できる尺度の確立を目指し、そのための検討も行った。

まず、近年注目を浴びている独立成分分析(ICA)と呼ばれる統計的信号処理法を多チャンネルで測定した表面EMGへ適用した。ICAとは、ブラインド分離問題(BSS)と呼ばれる問題の解を得るための統計学的手法のことである。BSSは複数のセンサによって測定される観測信号に含まれる信号源から発生する源信号をそれらの信号の振幅分布がもつ統計学的性質を利用して推定する問題を指す。また、ICAをBSSに適用する際、いくつか条件が設定されている。1)源信号は互いに統計的独立な関係にある。2)観測信号で観測される源信号は、各観測信号間で時間遅れがない。3)源信号数は、観測信号数を超えない。4)観測信号の振幅分布は正規分布でない。本研究では、EMGデコンポジションを一種のBSSとみなし、多チャンネル表面EMGに対してICAを適用した。本手法により各MUから発生したMUAP群をICAによって推定される独立成分へ分離できるかを検討した。

試作電極は、8チャンネルの双極誘導 EMG の測定が可能であり、チャンネル間隔を 2.5mm として、各チャンネルを対象筋の筋線維走行方向に対して垂直に配置した。これにより、各チャンネルで測定される MUAP 波形の時間遅れがほぼ消失した。若年健常男子 8 名における右足前脛骨筋で、5, 10, 15, 20%MVC の等尺性背屈をさせ、試作した電極により EMG を測定した。本手法により、異なる MUAP 群が独立成分へ分離されることが確認できた。また、EMG 中において異なる MUAP 波形の干渉が、独立成分では軽減されることが確認できた。従来手動で分類していた EMG デコンポジション処理を軽減することが期待できた。また、EMG の振幅分布の尖度は有意に高い値 ($p < 0.05$; > 3.1) を示しており、非正規分布であることが示された。さらに、ICA により推定された独立成分は有意に尖度を増大させた (t -test, $p < 0.05$)。また、%MVC の増大にともない、EMG、独立成分の振幅分布の尖度はいずれも低減する傾向を示した。この結果は、筋に与える負荷の増大によって EMG の振幅分布が非正規性を弱め、ICA による MUAP 群の分離が困難になることを示唆している。

次に、本手法の ICA の適用限界を示すためにシミュレーションにより得られた結果と上述の実測での結果とを比較・検討することで、本手法の妥当性を検証した。まず、映像法を用いた EMG モデルから、模擬的に表面 EMG を作成した。模擬 EMG は、チャンネル配置を筋線維走行方向に対して垂直、および並行に配置する 2 種類を用意した。垂直配置では、実測同様に MUAP が EMG において時間遅れなく観測されるが、並行配置では同一 MU からの MUAP が各チャンネル間で時間遅れをもつことが知られている。模擬 EMG に対し、ICA を適用した結果、垂直配置した EMG では実測での実験と同様に MUAP 群が分離された。それに対し、並行配置での模擬 EMG に ICA を適用すると、MUAP 群の分離ができないことを確認した。これは時間遅れによって本来同一 MU から発生した MUAP であるにも関わらず、ICA は各チャンネルで観測される MUAP が異なる源信号とみなすためと考えられる。また、EMG において活動している MU 数を増大させることで、EMG の振幅分布の尖度が低減することを確認した。このことは、筋張力の増大によって MU 動員数が増し、EMG の振幅分布の非正規性が弱まってしまうことの証明である。つまり、本手法はより低い筋張力レベルで測定した EMG に対して適用することが望ましいといえる。

次に 8 名の被験者に対して右足前脛骨筋を 5, 10, 15, 20%MVC で背屈させたときの EMG を測定した。開発した EMG デコンポジション・システムにより、各 EMG から個々の MU 発火時刻系列を同定した。そして、同定した MU 発火時刻系列からトーンとエントロピーと呼ばれる変数をそれぞれ算出し、各 MU から得られたトーン・エントロピー値を平面空間上に点描した。開発した表面 EMG デコンポジション・システムにより、同定された MU 数は 5%MVC で 197 個、10%MVC で 179 個、15%MVC で 153 個、20%MVC で 115 個であった。また、5, 10, 15, 20%MVC での MU の発火間隔はそれぞれ 96.1 ± 0.7 ms, 85.9 ± 0.9 ms, 83.5 ± 1.1 ms, 83.0 ± 1.4 ms となり、負荷の増大によって発火間隔の有意な減少 (one-way ANOVA, $p < 0.05$) がみられた。また、トーンは、 -0.93 ± 0.44 , -0.87 ± 0.36 , -0.99 ± 0.55 , -1.26 ± 0.59 , エントロピーは 5.30 ± 0.27 , 5.29 ± 0.29 , 5.38 ± 0.33 , 5.56 ± 0.29 bit といずれも有意な変化 (one-way ANOVA, $p < 0.05$) をみせた。また、同定した MU 発火時刻系列から得られたトーンとエントロピーの関係をトーン・エントロピー空間上に点描するとエントロピーが低いところではトーンが高く、エントロピーが増大するにつれトーンがその変化率を減少させつつ、減少するような曲線が形成された。5, 10%MVC では有意な差はみられなかったものの、15, 20%MVC と変化するに従い、トーンとエントロピーの平均値は形成された曲線上を沿ってトーンは低く、エントロピーが高くなる傾向が示された。この結果は心臓自律神経活動でのトーン・エントロピー法によって報告された結果と類似するものである。そのような従来の研究との比較から鑑み、MU 発火間隔変動により定義される筋-神経系活動をトーン・エントロピー空間上で絶対的に評価できる可能性が示唆された。

論文審査の結果の要旨

我々は日常気に止めていないことであるが、筋による生体の運動は、神経-筋系の活動により精緻に制御されているのである。神経細胞は、単純な電気伝達系の最小機能単位として神経回路ネットワークを構成している。単一の神経細胞のメカニズムは生理学的によく理解されており、かつ単純な系である。しかし、膨大な神経細胞によって構成される神経回路ネットワークがなす筋運動制御はきわめて複雑なものである。昔から多くの研究者たちがこの謎に挑んでいるものの、今に至るまでそのメカニズムを解明できたとはいえない。今後も継続的に研究され続けるだろう。

神経-筋系に関する研究は数多くの研究者によって日夜取り組まれている。しかしながら、神経-筋系活動を絶対的な尺度でもって定量的に評価するための「基準」はいまだ提案されていない。申請者はその研究状況を鑑み、神経活動、とりわけ神経-筋系の活動指標となる「基準」の作成を目指し、その萌芽的な研究に取り組んでいる。

従来、EMGによる神経-筋系活動評価には、生体に対して侵襲的EMG測定法によるEMGデコンポジションが用いられてきた。しかし、医師など限られた人物しか利用できないことや、感染症などの問題、また、観血的な手法であるため被験者に苦痛を与えるなど、多くの研究者に利用してもらうには制限が大きいのが難点であった。本学位論文は、その問題を克服すべく非侵襲的測定法である表面EMGによってEMGデコンポジションするためのシステム開発に関する研究が主となっている。

EMGデコンポジションは異なるMUから発生したMUAP波形の相違にもとづいて、操作者が手動でテンプレートマッチングすることでMUAP群を分類する。そのため、EMG中のMUAP波形の特徴が明確であれば分類が容易になる。しかし、侵襲的EMGとくらべ、表面EMGではS/N比が低いこと、また、表面EMGは侵襲的EMGより広範囲に測定できるため、より多くのMUAP波形の干渉がある。そのため、侵襲的EMGからのEMGデコンポジションに比べ、操作者による分類作業が非常に煩瑣になり、その処理作業の操作者への負担は大きくなる。

そこで申請者は、近年注目を浴びている独立成分分析(ICA)を多チャンネルで測定した表面EMGに対して適用することで、表面EMGデコンポジション処理における操作者の負担を軽減できるか実験・検討した。そのための表面電極を試作し、筋線維走行方向に対し、8チャンネルを垂直に配置した。若年健常男子8名の被験者に等尺性背屈させたときの前脛骨筋の8チャンネルのEMGを5, 10, 15, 20%MVCで測定した。測定したEMGに対し、ICAを適用した結果、異なるMUAP群が独立成分へ分離することが確認された。ただし、単一MUAP群が単一独立成分へ分離されるとは限らず、ICAの適用がEMGデコンポジションそのものであるといえない。また、%MVCの増加にともない、EMGとICAによって推定された独立成分の振幅分布の尖度が減少する傾向を示した。よって、ICAは低筋張力発生時でのEMGに対して適用する方がよいと結論付けた。

次に、本手法が、理論的に正当であるかを検証するためにEMGモデルを用いて模擬EMGを作成し、実測で得られた結果と同様であるかを比較・検討した。EMGモデルは筋線維上に電流源が流れると考え、そのときの皮膚表面上での電位を映像法と呼ばれる電磁気学的手法により算出するものを用いた。まず、源信号が観測信号で時間遅れをもたないというICAの適用条件について検討するため、電極配置は試作電極同様に筋線維走行方向に対して垂直に配置したものと、並行に配置したものの2種類で比較した。垂直配置では、同一MUから発生したMUAPに時間遅れがなく、並行配置では時間遅れをもつことが知られている。ICAを適用した結果、垂直配置では実測での結果と同様の傾向を示したが、並行配置では、同一MUAP群を分離できなかった。よって、本手法は、各チャンネルを筋線維走行方向に垂直に配置して用いるのが適当であると結論づけられる。また、EMG中のMU数を変化させたときのEMG振幅分布の尖度がどのように変化するかを調べた。MU数を1~8個まで変化させたときのEMGとその独立成分の振幅分布の尖度を計測した。MU数が増加するに従い、EMG、独立成分の振幅分布は減少する傾向を示した。つまり、筋発生張力の増大とともにMUが新たに動員され、EMGの振幅分布は非正規性を弱める結果となる。よって、実測とシミュレーションとの結果から、実測での実験結果の結論と同様、低筋張力時におけるEMGに対して使用すべきである。これらの結果は国際電気生理運動学会の機関誌である、*Journal of Electromyography and Kinesiology*に2編の論文として掲載され、高い評価を受けている。

また、開発したシステムを用いEMGデコンポジション処理によって分類して得られたMU発火時刻からMU活動を評価するための指標なる「基準」を開発するために、すでに心臓自律神経活動の評価指標として報告されているトーン・エントロピー法を用いた。心臓自律神経系とは、交感神経と副交感神経からなり、交感神経は心拍数を増加させる働きをし、副交感神経は心拍数を減少させるように働くことが知られている。心拍数は交感・副交感神経の協調的な活動によって制御されているのである。それに対し、神経-筋系もまた、MUのような遠心性の神経活動電位を与える器官だけでなく、筋紡錘やゴルジ腱器官による求心性の神経系のように複雑な系を構成している。しかし、興奮性・抑制性の神経系活動としての機能は等価であると申請者は考え、トーン・エントロピー法が神経-筋系の活動評価にも適用できると考えた。

そこで、申請者は実際に開発した表面EMGデコンポジション・システムより、MU発火時刻を同定した。健常男子8

名に対し、5、10、15、20%MVCで等尺性背屈をさせ、そのときの前脛骨筋の8チャンネル表面EMGを測定し、ICAを適用した後、EMGデコンポジションした。MU発火間隔変動からトーンとエントロピーを算出し、トーン・エントロピー空間上に点描した。結果、心臓自律神経活動におけるトーン・エントロピー空間上に形成される曲線と類似したものがあらわれた。また、%MVCが増大するにつれ、形成された曲線上を沿いつつ各%MVCでのトーン・エントロピー値の分布はトーンが減少し、エントロピーが増大する傾向を示した。これは形成された曲線を「基準」として、MU活動を絶対的に評価できる可能性を示唆する結果である。

以上、本研究は人間の身体と環境との関係の究明を目指す文化・地域環境学専攻、環境保全発展論講座の目的にふさわしい内容を備えたものと言える。

よって、本学位申請論文は、博士（人間・環境学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成16年11月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。