

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12205

研究課題名(和文) 表面筋電の実時間冗長ウェーブレット解析に基づく精細な筋状態分析手法とその応用

研究課題名(英文) A Method for Detailed Muscle State Analysis Based on Real-Time Redundant Wavelet Analysis of Surface Electromyography and Its Applications

研究代表者

永井 秀利 (Nagai, Hidetoshi)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教

研究者番号：60237485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：運動単位は一つの神経が支配する筋繊維の束である。筋は多数の運動単位で構成されており、この運動単位の活動が筋活動の基本単位である。従って、本来なら運動単位活動の観点で筋活動を分析すべきだが、従来技術では運動中の運動単位の活動の様子を捉えることはできなかった。本研究では、個々の運動単位の同定まではできないものの、単チャンネルの表面筋電信号から運動単位活動の様子を捉えることに成功した。これにより、運動単位活動に基づく筋活動評価が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医学やスポーツ科学の他、筋電義手等の工学応用において筋の状態や活動を捉えることは重要である。従来は筋疲労や負荷の増大による筋活動の変化を表面筋電の振幅のような抽象的特徴で捉えるしかなかったが、本研究により筋活動の根幹たる運動単位活動を侵襲のない表面筋電でリアルタイムに捉えて分析できるようになったことで、筋疲労や負荷増大に対する運動単位活動の変化に基づいて筋の疲労や発揮力などをより精緻に分析、評価することを可能とした。

研究成果の概要(英文)：A motor unit is a bundle of muscle fibers innervated by a single nerve. Muscle is composed of many motor units, and the activity of these motor units is the basic unit of muscle activity. Therefore, muscle activity should be analyzed from the viewpoint of motor unit activity, but conventional techniques have not been able to capture motor unit activity during exercise. In this study, although it was not possible to identify individual motor units, we succeeded in capturing the motor unit activity from a single-channel surface EMG signal. This achievement enables the evaluation of muscle activity based on motor unit activity.

研究分野：表面筋電信号の解析とその応用

キーワード：表面筋電 運動単位 冗長離散ウェーブレット解析 ウェーブレット係数集合

1. 研究開始当初の背景

筋電義手などの工学分野に限らず、医療やスポーツといった広い分野において、筋の状態や活動は重要な生体情報である。筋を構成する筋繊維の活動は神経によって励起されるため、一つの神経に支配されて同時に活動する筋繊維の束を運動単位と呼び、これが筋活動の基本単位となる。運動単位の活動が励起された時に生じる電位変化を計測したものが筋電である。筋電は、大きく分けると針筋電と表面筋電とが存在するが、針筋電は電極針を筋に刺し込んで計測するものであるため、運動単位の活動電位波形を直接的に精度よく計測できるが、その情報は局所的であり、運動中に計測することは極めて困難である。それに対し、表面筋電は多数の運動単位活動電位が体表まで到達して重畳したものを体表に貼り付けた電極で計測するものであるため、運動中の計測でも支障はなく筋全体の活動を観測できるものの、得られる情報は信号の振幅などの抽象的なものにならざるを得ず、運動単位活動がどのようになされているかを具体的に得ることはできなかった。例えば負荷（発揮力）が上昇した際に表面筋電の振幅が増大することは良く知られているが、負荷変動が無くとも筋疲労が進行しても振幅増大が生じてしまうため、筋疲労が無視できない状況で表面筋電のみで発揮力を高精度に評価することは不可能に近い。

こうした問題は、運動中でも利用可能な非侵襲な計測で、筋全体の運動単位活動の様子を捉える手段がないことに起因する。筋活動が個々の運動単位の活動の集積として成り立っていることから、筋活動の分析や評価は運動単位活動の観点から行うのが本来あるべき姿であるため、それを実現する技術の確立が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、運動中の運動単位活動を捉え、それに基づいて筋の状態や活動を分析することを可能とする技術の確立とその応用である。筋活動を電氣的に捉える生体情報の内で運動中にも計測可能な情報としては、表面筋電がほとんど唯一と言えるものである。従来、表面筋電から運動単位活動電位波形を抽出することは不可能とされてきたが、本研究では、新たな解析手法の開発により、すべてではないにしても運動単位活動の動向を捉えるに十分なだけの運動単位活動電位波形の検出を実現する。その結果に基づき、筋活動評価の精緻化や応用を目指す。

3. 研究の方法

表面筋電は2,000~3,000Hzのサンプリング周波数で計測すれば十分であるというのが従来の常識とされてきた。しかし、筋活動における運動単位活動の頻度、それによって表面筋電信号に含まれる運動単位活動電位波形の密度を考えると、常識とされてきたサンプリング周波数では全く足りないことは明確である。そこで本研究では従来常識よりも遥かに高い周波数でのサンプリングを行う。具体的には20,000Hzのサンプリング周波数で計測した。

計測した表面筋電信号の解析には、時間解像度に優れるウェーブレット解析を用いる。ただし、離散ウェーブレット解析で一般的な手法である多重解像度解析には、解析起点のサンプル位置が1個ずれただけでも結果が大きく変化するという欠点が存在するため、すべてのサンプル位置において、その位置を起点とした解析結果のすべてのウェーブレット係数が得られるような冗長離散ウェーブレット解析を行う。この解析は、適切なアルゴリズムを用いることにより、リアルタイムで実行可能である。このアルゴリズムの時間計算量はFFTよりも小さい。代わりに領域計算量は大きなものになるが、現実的な解析での必要量は数百kbyteから数Mbyte程度であり、実装の支障となるようなものではない。

表面筋電信号の成分波形である運動単位活動電位波形は、複数の周波数成分を含む単発の波形である。波形を特徴付けているのは、周波数帯域ごとに値最大となっているウェーブレット係数の集合とも言えるが、それらのウェーブレット係数の時間位置は異なる。したがって、二つの運動単位活動電位波形が近接して部分的に重なり合っている場合、ある時刻のウェーブレット係数群を抽出すると、一方の波形の高周波数成分と他方の波形の低周波成分とが混在する形で得られてしまう。この点が、従来の表面筋電信号解析において運動単位活動電位波形を捉えられていない理由の一つであると考えられる。

この問題は、運動単位活動電位波形を特徴付けているウェーブレット係数群の時間位置関係に沿ってウェーブレット係数を抽出するようになれば避けられるはずである。時間幅がある運動単位活動電位波形に対し、その存在時刻として規定する時刻にそれらウェーブレット係数群を再配置するようになれば、時刻ごとのウェーブレット係数群を調べることで運動単位活動電位波形の存在を分析可能となることが期待できる。

本研究では、計測した表面筋電信号をこの方針に沿って解析することで運動単位活動の存在

を検出することを目指すと同時に、検出した運動単位活動の様子に基づいて筋の活動や状態を評価することを試みた。

4. 研究成果

冗長離散ウェーブレット解析は多重解像度解析に基づくものであるが、結果として得られたウェーブレット係数の間には、多重解像度解析の計算上の関係は必ずしも存在してはいない。よって、運動単位活動電位波形の特徴を示すウェーブレット係数群（これをウェーブレット係数集合と呼ぶ）を規定するにあたって、それらのウェーブレット係数の間に多重解像度解析の計算上の関係を求めないこととした。これにより、波形特徴をよりの確に捉えることができる。なお、解析で用いるウェーブレットは、非ゼロ区間が狭くコンパクトで、形状が運動単位活動電位波形に比較的近い Daubechies' N=2 を採用した。

ウェーブレット係数集合は、波形再現の詳細さの違いなどに依存して、同じ波形に対しても様々な定め方をすることが可能である。本研究では、シンプルなウェーブレット係数集合規定として、いくつかの実験で良好な結果を示した T+13/32 と呼ぶスタイルを採用した。これは、各周波数帯域のウェーブレット係数の時間領域の末端が揃った時間位置関係から、各時間領域幅の 13/32 だけを階段状にずらしたものである。図 1 にその概形を示す。波形存在時刻の規定も様々な定義することができるが、本研究では最も低い周波数帯域の時間領域末端（図の $t=0$ の位置）とし、各ウェーブレット係数をその時刻の値とした。

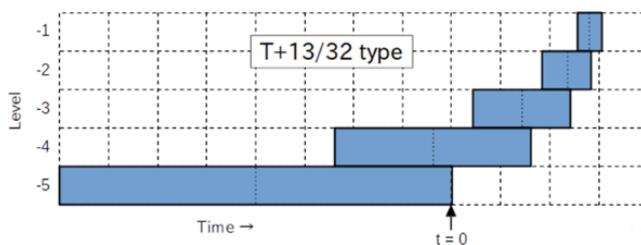


図 1 T+13/32 のウェーブレット係数集合の概念図

ウェーブレット係数集合に基づく再配置を行った場合、運動単位活動電位波形が存在する時刻の各周波数帯域のウェーブレット係数値は局所最大となることが期待できる。このことを利用してウェーブレット係数値が正の範囲で等高線を描くことにより、運動単位活動の可視化を行うことに成功した。20,000Hz でサンプリングした上腕二頭筋の表面筋電波形の例（時間幅は 200ms）を図 2 に、この波形に含まれる運動単位活動を可視化したものを図 3 に示す。

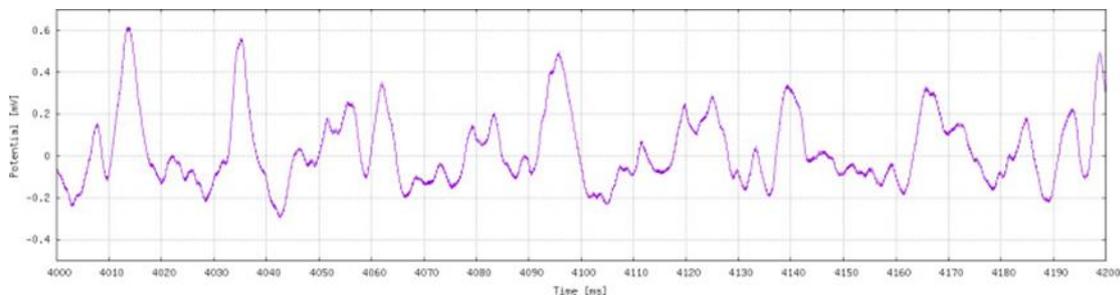


図 2 上腕二頭筋の表面筋電（サンプリング周波数 20,000Hz）

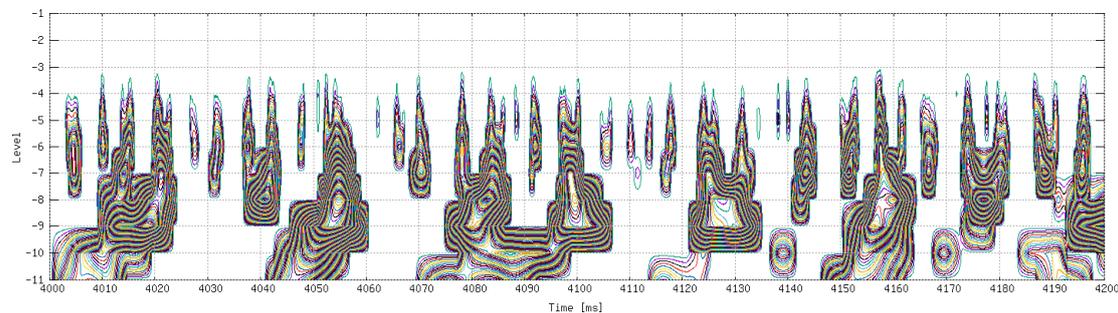


図 3 図 2 の表面筋電信号中の運動単位活動の可視化図

可視化図において、雨垂れ状の塊が運動単位活動の存在可能性を示唆する。塊には、高い周波数帯域に留まるものと、それと比較すると低い周波数帯域まで伸びているものが存在する。本研究では、前者を速筋運動単位、後者を遅筋運動単位の活動と捉えている。

運動単位活動は、基本的には雨垂れ状の塊の局所ピーク位置に存在すると考えることができる。しかしながら、すべての局所ピークが検出対象として適切であるとは限らない。そこで、各時刻のウェーブレット係数集合の係数群が運動単位活動電位波形らしいかどうかを評価する。この波形らしさ評価は速筋と遅筋とで別々に行う。運動単位活動電位波形が存在する時刻においては波形らしさの評価値が局所最大となると予想される。ただし、波形らしさ評価は形状とし

ての評価であるため、微弱な信号でも高い評価値となることがある。そこで絞り込みのために信号強度などによる重み付けを行い、その結果が閾値を超えた範囲での局所ピークで運動単位活動を検出する。図 2 の表面筋電信号に対し、信号強度で重み付けを行った運動単位活動電位波形としての適合強度を図 4 に示す。

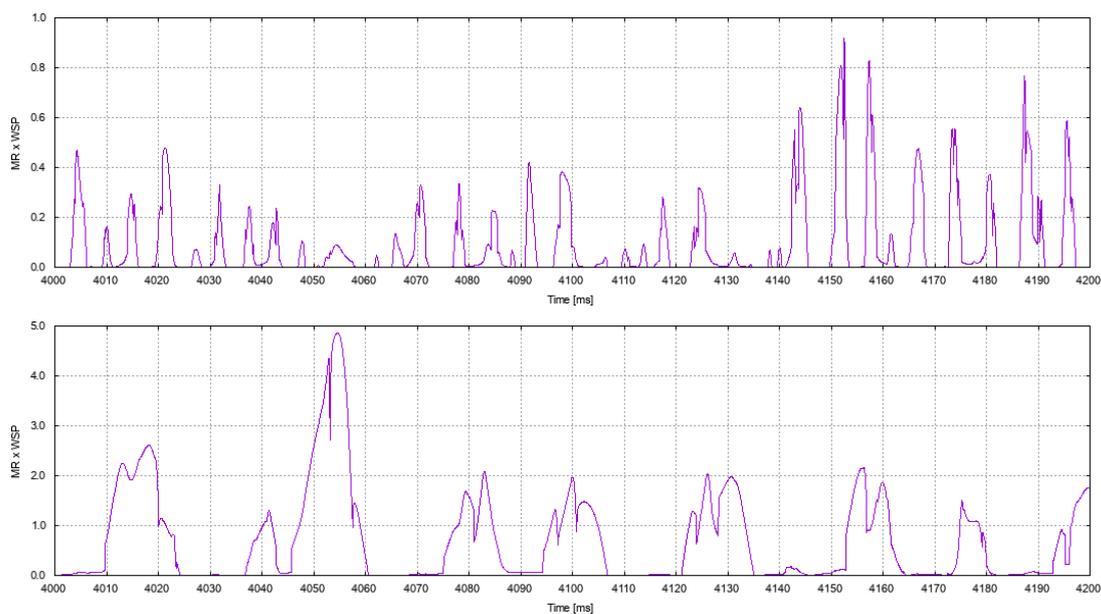


図 4 図 2 の表面筋電信号に対する運動単位活動電位波形としての適合強度（上：速筋，下：遅筋）

適合強度を基準として抽出した運動単位活動に基づき、筋疲労、筋発揮力、余力の評価を行った。上腕二頭筋での実験においては、筋疲労前後での運動単位の状態変化に依存した活動変化を観測することができ、それを反映した筋発揮力評価では筋疲労に関してロバストな評価を行うことができた。従来技術でよく用いられるような表面筋電の振幅に基づく発揮力評価では、筋疲労前後で全く異なる結果となってしまうが、本研究での評価は同じ負荷ならば疲労の有無によらずに同程度の評価結果を得ることができた。しかしながら、筋の種類による違いや協調動作評価における計測感度差の影響低減などの課題は残り、研究計画で挙げていた具体的な応用研究への適用までは達成できなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 2019
2. 論文標題 黙声認識における発声開始時刻同定時の曖昧さ低減手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 76-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11527/jceek.2019.0_76	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 vol.119, no.251
2. 論文標題 黙声孤立単音認識における表面筋電チャネルごとの活動開始位置推定時の曖昧さ低減	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 87-92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 vol.119, no.391
2. 論文標題 表面筋電の特徴抽出のためのウェーブレット係数集合のシフト選択法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 51-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 vol.123, no.82
2. 論文標題 ウェーブレット係数集合を用いた成分波形抽出手法に基づく単チャンネル表面筋電信号からの運動単位活動検出	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 4-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 vol.123,no128
2. 論文標題 ウェーブレット係数集合を用いた単チャンネル表面筋電信号中の運動単位活動の実時間検出	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 vol.1232,no.232
2. 論文標題 単チャンネル表面筋電信号から検出した運動単位活動の視点に基づく筋活性度評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 3-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 2023
2. 論文標題 Generalization of the Real-Time Extraction Method for Elemental Waveforms in a Signal Using a Wavelet Coefficient Set	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of Life Engineering Symposium 2023 (LE 2023)	6. 最初と最後の頁 58-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 永井秀利	4. 巻 22
2. 論文標題 筋発揮力や筋疲労度の変化による単チャンネル表面筋電信号中の運動単位活動変化の可視化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第22回情報科学技術フォーラム (FIT2023)	6. 最初と最後の頁 197-204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hidetoshi Nagai	4. 巻 vol.12, no.3
2. 論文標題 Visualization of Motor Unit Activities in a Single-channel Surface EMG Signal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Smart Convergence	6. 最初と最後の頁 211-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7236/IJASC.2023.12.3.211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 永井秀利, 左島綾乃, 中村貞吾
2. 発表標題 介護時会話を想定した少数語彙世界における黙声単語認識の一手法
3. 学会等名 第6回サイレント音声認識ワークショップ
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 成分波形抽出システム、成分波形抽出方法及びコンピュータを成分波形抽出システムとして動作させるプログラム、並びに信号解析システム、信号解析方法及びコンピュータを信号解析システムとして動(以下略)	発明者 永井 秀利	権利者 国立大学法人九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-105826	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 成分波形抽出システム、成分波形抽出方法及びコンピュータを成分波形抽出システムとして動作させるプログラム、並びに信号解析システム、信号解析方法及びコンピュータを信号解析システムとして動(以下略)	発明者 永井 秀利	権利者 九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-200605	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 信号波形解析システム及びそのプログラム	発明者 永井 秀利	権利者 九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-215284	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

九州工業大学 新技術説明会 2021：(5) 1チャンネルの信号中の不規則成分波形の実時間挙動分析,
https://shingi.jst.go.jp/list/list_2021/2021_kyutech.html#20211209X-005
九州工業大学 新技術説明会 2023：(6) 計測信号で不規則発生する有限長要素波形を実時間検出,
https://shingi.jst.go.jp/list/list_2023/2023_kyutech.html#20231205X-006
Detailed muscle state analysis method based on real-time wavelet analysis of surface myoelectric potential, Impact, Volume 2023, Number 3, September 2023, pp. 62-64

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------