

前腕筋群の個別筋活動計測のための 多点型表面筋電システムに関する研究

学位論文内容の要旨

筋電計は生体計測装置の一種で、筋活動にともなう筋線維の活動電位 (筋電位) を計測する。筋電位を解析すれば運動時の身体負荷を筋レベルで詳細に測定できるため、医学分野のみならず人間工学や労働衛生分野にも広く応用されている。筋電計にはいくつかの種類があるが、その中でも最もよく使われるものは表面筋電計で、非侵襲、計測の簡便さなど多くの特長を有し、筋の解剖学的配置や、皮膚の前処理方法、電極の配置方法などいくつかのノウハウを身につければ誰でも筋活動を測定できる。

しかし、表面筋電計には電極周辺のあらゆる筋の筋電位が全て重畳してしまう、いわゆるクロストーク問題があるため、目標の筋の筋活動のみを独立に測定することが難しい。特に、手指や手関節の筋が集中する前腕のような筋活動を計測する場合、多数の筋が狭い領域に密集しているためクロストークが大きく複雑になり、表面筋電計で各筋の筋活動を独立に計測するのは著しく困難である。クロストーク問題は古くから知られているが、これを解決する技術は未だ決定的なものがなく、強力かつ簡易な表面筋電計による筋活動の個別計測技術が求められている。そこで本研究では、手指筋が多く配置される前腕筋群の筋活動を、多点型表面筋電計と前腕筋活動モデルを用いて筋ごとに個別推定する多点型表面筋電システムを研究し開発した。

そのため、まず前腕を筋と橈尺骨の円柱状導電体としてモデル化し、有限要素解析により橈尺骨を含む前腕内における筋電位の伝導特性を明らかにした。筋電位は電極-筋電位発生源間距離の増加に対して累乗的に減少し、減衰乗数はおおよそ2.2~1.6乗の間となった。減衰乗数はバイポーラ表面電極の電極間隔に対して単調増加し、間隔が広いほど減衰は緩やかとなった。この表面筋電位の伝導特性を用いて、多点表面筋電位から筋電位発生源を逆推定する手法を開発し、シミュレーションから得られた減衰特性を用いて筋電位発生源位置を逆推定した。その結果、筋電位発生源の推定誤差は骨近傍で大きくなり最大8.4mmとなったがその他の部位で誤差は小さく、良好な逆推定結果が得られた。

次に、牛大腿筋の粉碎肉片を円筒に充填した前腕ファントムモデルを用いて筋電位伝導試験を行い、シミュレーションを基に開発した筋電位発生源位置逆推定手法の妥当性について検証した。筋電位の減衰乗数をソース周波数ごとに求め、その周波数依存性について検討した。その結果、20Hz~160Hzの周波数帯では周波数ごとの減衰乗数に有意差はなく、一定と見なせた。求めた減衰特性を

用いて筋電位発生源位置を逆推定した結果、推定値は深さ 30mm まで平均約 2mm の推定誤差となり、測定には十分な推定精度となった。また、減衰乗数に 10% 程度の誤差が生じたと仮定して逆推定を行った場合でも、最大で 3mm の推定誤差を生じるにとどまり、本推定手法の堅固さを明らかにした。

さらに、以上の結果を基に逆推定手法を拡張して、多点表面筋電位と前腕の電気伝導モデルによる前腕筋群の筋活動個別推定システムを開発した。2 重間隔電極プレートによる多点表面筋電計測装置を開発して、被験者の前腕全周の多点表面筋電位を計測した。また、屍体の前腕断面画像を基に前腕筋活動モデルを構築する手法を開発し、被験者の前腕筋活動モデルを構築した。これらにより、最適化手法を用いて前腕筋活動の個別推定を行い、4 名の被験者について中指中節屈曲負荷時の前腕諸筋の筋活動を個別推定した結果、主動筋である浅指屈筋の筋活動について、負荷量に追従した筋活動を個別推定できた。全ての被験者について 0.5kg と 1kg 負荷の間の浅指屈筋活動に 1% 有意な差が得られ、本システムの妥当性を明らかにできた。

本論文は全 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の総括的な序論として、研究の背景及び目的を述べた。

第 2 章では、前腕の解剖学および生理学的基礎について説明し、骨格筋の筋活動の発生原理について概要を述べた。

第 3 章では、前腕筋活動電位の伝導特性について述べた。橈尺骨と筋から構成される前腕の円柱状導電体モデルを構築して、有限要素解析により前腕内における筋電位の伝導特性を明らかにした。解析により得られた伝導特性と表面筋電分布を用いて筋活動部位を逆推定する手法を検討し、橈尺骨により生ずる筋活動部位の推定誤差を比較した。

第 4 章では、前腕ファントムモデルを用いた実験により、シミュレーションを基にした筋活動部位の逆推定手法の妥当性を検証した。牛大腿部の粉碎肉片を充填した前腕ファントムモデルを構築して、モデル内部に配置した擬似筋電位発生源により生ずる表面筋電位を計測し、筋活動電位の減衰度の周波数依存性について検討した。実験により求めた筋電位減衰度を用いて筋電位発生源位置を逆推定し、その推定精度を明らかにした。

第 5 章では、前腕の電気伝導モデルと多点表面筋電位測定値を用いた前腕筋群の筋活動個別計測システムを提案し開発した。2 重間隔電極プレートによる多点表面筋電位計測装置と、屍体の前腕断面画像および筋電位減衰特性から前腕筋活動モデルを構築する手法を開発し、これらを用いた最適化計算による前腕筋群の筋活動個別推定システムを開発した。本システムを被験者に適用して被験者の手指関節に負荷を加えたときの前腕筋活動を個別推定し、その妥当性について明らかにした。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題と展望についてまとめた。以上により、前腕の多点表面筋電位と電気伝導モデルによる前腕諸筋の筋活動個別推定システムの有効性を示した。本システムによれば、前腕筋群の筋活動を個別推定することが十分に可能となることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 但 野 茂

副 査 教 授 小 林 幸 徳

副 査 教 授 梶 原 逸 朗

副 査 教 授 清 水 孝 一 (情報科学研究科)

学 位 論 文 題 名

前腕筋群の個別筋活動計測のための 多点型表面筋電システムに関する研究

筋電計は生体計測装置の一種で、筋活動にともなう筋線維の活動電位(筋電位)を計測する。筋電位を解析すれば運動時の身体負荷を筋レベルで詳細に計測できるため、医学分野のみならず人間工学や産業衛生分野等にも広く応用されている。筋電計にはいくつかの種類があるが、非侵襲で測定操作の簡便な表面筋電計が広く利用されている。しかし、表面筋電計には電極周辺のあらゆる筋の筋電位が重畳して計測されてしまう欠点を有する。特に手指や手関節動作筋がある前腕部の計測においては、多数の筋が浅部や深部に複雑に走行しているため、表面筋電計で各筋の筋活動を独立に計測するのは困難であった。このクロストーク問題は古くから知られているが、これを解決する決定的な方法はまだ見当たらない。

そこで本研究では、表面筋電計のクロストーク問題を解決し、表面筋電位の計測解析により前腕筋群の活動を個別推定する多点型表面筋電システムの研究開発を行っている。多点型表面筋電計を用いて前腕の表面筋電位分布を詳細に計測し、筋電位伝導特性を組み込んだ前腕筋活動モデルを用いて最適化計算により筋活動を個別推定するシステムを開発している。まずシステム開発のため、前腕を筋および橈尺骨の円柱状導電体としてモデル化し、有限要素解析により前腕内における筋電位伝導特性を明らかにしている。解析の結果、筋電位は電極-筋電位発生源間距離の増加に対して累乗的に減少し、減衰乗数の値が $-2.2 \sim -1.6$ の範囲内にあること、バイポーラ表面電極の電極間隔に対して単調増加し、間隔が広いほど減衰は減少することを確認している。この表面筋電位の伝導特性を用いて、多点表面筋電位から筋電位発生源位置を逆推定する手法を開発している。その結果、筋電位発生源の推定誤差は骨近傍で大きくなり、最大 8.4mm であるが、その他の部位で誤差は小さく、良好な逆推定結果が得られている。

次に、有限要素解析結果の妥当性を検証するために、牛大腿筋の粉碎肉片を円筒に充填した前腕ファントムモデルを構築し、筋電位伝導実験および筋電位発生源位置逆推定実験を実施している。モデルに埋め込んだ擬似筋電位発生源に交流電流を印加し、筋電位伝導特性を周波数ごとに計測している。伝導特性の周波数依存性について検討した結果、20Hz $\sim$ 160Hzの周波数帯では周波数ごとの減衰乗数に有意差はないことを確認している。求めた伝導特性を用いて筋電位発生源位置を逆

推定した結果、筋電位発生源の深さ 30mm までは推定位置の誤差がおおよそ 2mm となり十分な推定精度が得られている。また、減衰乗数に 10 パーセント程度の変動が生じたと仮定して逆推定を行った結果、推定位置の変動は最大 3mm にとどまり、本推定手法の堅固さを明らかにしている。

以上から得られた結果を用いて逆推定手法を拡張し、表面筋電位分布と前腕筋活動モデルによる前腕筋群の筋活動個別推定システムを開発している。システムの一部として、二重間隔電極プレートによる多点表面筋電計測装置を開発し、被験者前腕の表面筋電位分布の詳細な計測が可能であることを示している。同時に、屍体の前腕断面画像を基に前腕筋活動モデルを構築する手法を開発し、筋電位伝導特性を組み込んだ被験者の前腕筋活動モデルを構築している。計測による表面筋電位分布とモデルから得られた筋電位計算結果を一致させるようモデル内筋活動量の最適化計算を行い、筋活動量を推定している。本システムを用いて、4 名の被験者について手指負荷実験を行い、前腕筋活動の個別推定を実施した結果、中指中節屈曲負荷時に、主動筋である浅指屈筋について負荷量に追従した筋活動量が推定されている。また、0.5kg～1kg 負荷間の浅指屈筋の筋活動量に 1 パーセント有意な差が得られ、本システムの妥当性が明らかにされている。

これを要するに、著者は、多点表面筋電位と電気伝導モデルによる前腕筋群の筋活動個別推定システムを提案したものであり、これらの成果は、医療福祉工学や人間機械システムデザイン学の発展に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。