

氏名(本籍)	齋藤健治(愛媛県)
学位の種類	博士(体育科学)
学位記番号	博乙第1,320号
学位授与年月日	平成9年7月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	体育科学研究科
学位論文題目	表面筋電図逆解析による活動電流源の推定
主査	筑波大学教授 理学博士 岡田守彦
副査	筑波大学教授 医学博士 勝田茂
副査	筑波大学助教授 学術博士 西平賀昭
副査	生命工学工業技術研究所室長 工学博士 増田正
副査	筑波大学助教授 中田英雄

論文の内容の要旨

脳電図や心電図のように体表で測定した電位からその活動電流源の位置や強度をもとめる逆解析の研究は、1960年代から、計算機の発展と並行して進められてきた。筋電図の分野においては針電極が使用可能であることから、必ずしもその必要性は高くなく、研究はほとんど行われていなかった。しかし、表面筋電図法により非侵襲的に骨格筋の活動度や疲労などの機能的特性、および筋線維組成や神経筋接合部分分布などの形態的特性の情報抽出に関する研究が進むにつれて、より詳細な解析をおこなうために、非侵襲的に活動電流源に関する情報を抽出する逆解析の重要性が高まってきた。そこで本研究は、表面筋電位からその活動電流源である運動単位的位置、強度を推定する逆解析法を確立・検証することを目的とし、5つの研究課題を設定した。

方法と結果

一般的に、逆解析は順解析を反復し、測定値と順解析による計算値の差の二乗和を最小化することにより実行される。したがって、表面筋電図逆解析のためには、表面筋電図順解析法(表面筋電位計算法)が定式化されている必要がある。このために研究課題1では、静電場を記述する微分方程式である、ポアソン方程式の境界値問題を有限要素法により定式化した。また、解析的手法として、ポアソン方程式の解を与える影像法を定式化した。有限要素法は任意の境界形状、材料定数に対応することができるという融通性を持ち、影像法は、電位を求める空間が半無限、等質・等方性であると仮定する簡便性をもつ。そこで、逆解析において反復が必要な順解析法として計算時間の短い影像法を採用した。一方、影像法による表面電位計算の妥当性を検討するために、境界、不均質性および異方性を考慮できる有限要素法による表面電位を比較対象とした。

実際の表面筋電位は、導電率不均質性(皮下組織など)および導電率異方性(筋組織)をもつ閉ざされた媒質中に存在する筋線維の電気的活動を皮膚表面で記録したものである。したがって、半無限領域、等質・等方性空間を仮定した影像法による順解析結果は、現実に符合しないと考えられる。そこで、研究課題2では、皮膚境界、皮下組織などによる導電不均質性および筋組織の導電率異方性を考慮した有限要素法による計算結果と、半無限領域、等質・等方性媒質を仮定した影像法による表面電位計算結果を比較した。その結果、1)電流源が深いほど、また、表面の曲率が大きいほど境界の影響は大きくなり、影像法による表面電位より高くなった、2)領域

の表層にある導電率の低い層が厚くなるにしたがい、映像法による表面電位より高くなった、3) 導電率異方性(長軸方向:横断面方向=10:1)をもつ領域の表面電位波形は、長軸方向に引き伸ばされ滑らかになった。4) 電流源分布の広がり半径が大きいほど、表面電位は大きくなった。

研究課題3では上記の4条件の逆解析への影響を調べるため、研究課題2で有限要素法および分布電流源を用いて計算した表面電位を、映像法逆解析の観測データとして電流源の深さ・強度を推定した。そして、表面筋電位逆解析への映像法逆解析の適用可能性を検討した。その結果、1) 電流源が深くなるにつれて推定誤差が大きくなった。2) 低導電率層の厚さが増すにつれて、推定誤差は大きくなった。3) 導電率異方性により大きな推定誤差が生じた。4) 電流源の広がり半径が大きくなるほど、電流源は浅く、強度は弱く推定された。総じて、電流源の深さが浅ければ(10mm以内)、映像法逆解析による推定誤差は小さいと考えられた。

研究課題4では、研究課題3までに確立した映像法逆解析を、ヒト表面筋電位データに適用し、電流源の深さと強度を推定した。成人男性3名を被験者とし、上腕二頭筋から筋周囲方向にならべた16チャンネル電極列を用いて筋電位を導出した。被験者は、肘関節角度約140度で活動運動単位電位スパイク列が確認できる程度の弱い等尺性収縮を3秒間おこなった。増幅した信号をA/D変換した後、加算平均することで単一運動単位波形を抽出した。求めた単一運動単位電位に、映像法逆解析を適用して電流源の深さと強度を推定した。抽出した単一運動単位電位は40個で、推定された電流源の深さは1~7mm、強度は1~90nAmであった。推定された電流源の深さは10mm以内であり、研究課題3の結果から、推定値の信頼性は比較的高いものと思われた。

研究課題5では、映像法逆解析の妥当性を検証するため動物実験を行った。ラットの脊髄前根をL4あるいはL5レベルで電気刺激したときの表面筋電位を腓腹筋表面で導出し、逆解析の観測データとした。また、電気刺激された単一運動単位に属する筋線維のグリコーゲンを枯渇させ、その切片をPAS染色することにより電流源である筋線維の筋横断面上での分布を同定した。そして、逆解析により推定された電流源の位置とPAS染色により同定した筋線維分布の位置を比較した。逆解析の際に仮定した電流源の数は1~3個であった。推定された電流源の深さは0~6mmで、その位置はPAS染色により同定された筋線維分布の中心かあるいはやや浅めとなり、計算結果と染色結果はほぼ一致した。これらの結果から映像法逆解析による電流源の位置の推定の妥当性が検証された。しかし、強度については検証することができず、今後SQUIDなどによる計測・推定結果と比較検討していく必要がある。

結論

以上の結果より、1) 半無限、等質・等方性を仮定した映像法による逆解析は、実際の電流源(運動単位あるいは筋線維)の深さが10mm程度以内であれば十分適用可能であった、2) ヒトの表面筋電図から推定された電流源の深さは7mmまでで、その信頼性は高いと思われた、3) ラットを用いた電気刺激実験に、逆解析および組織化学的処理を適用し比較した結果、映像法逆解析により推定された値の妥当性が検証できた。

審査の結果の要旨

筋の働きを把握することは身体運動の理解にとって基本的に重要であるが、その際、筋の活動をリアルタイムに検出する方法として、筋電図法はきわめて有用である。とくに皮膚上から簡単に活動電位を記録できる表面筋電図法は体育科学やリハビリテーションの分野において不可欠なものとなっている。

このようにして生体の表面から記録される電位から生体内の電流源についての情報を抽出することを逆解析という。逆解析は心電図、脳波について、すでに多くの研究がある。しかし、筋電位についてはほとんど行われていない。これは、筋電位の場合、針電極により筋内の情報が直接モニターできることも一因であるが、針電極は侵襲的であり、また得られる情報は多くない。したがって、表面筋電位の逆解析により、筋内電流源に関する情報が抽出できれば、表面筋電図法の有用性がいっそう増大すると思われる。

本研究は、上記のような観点から、有限要素法、映像法などの数理的手法を駆使して、まず表面筋電位の順解析法を構築するとともに、その限界について明らかにした。これは表面筋電図逆解析への道を開いた新知見といえることができる。さらに、ヒトの表面筋電位に逆解析法を適用して電流源の推定を行うとともに、動物による生理学的実験と組み合わせることにより、推定の妥当性を検証したことは、初めての試みとしてその独創性は高く評価できる。

他方、実用化をはかる上で誤差が無視できないレベルにあること、収縮の強さが軽度以下に限られること、動物実験による実証の例数がやや少ないことなどの問題点が指摘されるが、これはいずれも本研究の本質的な弱点ではなく、今後に残された課題と位置づけることができよう。

よって、著者は博士（体育科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。