

学位論文概要

題目 A Scale Mixture-based Stochastic Model of Surface EMG Signals and Related Applications
(表面筋電位信号の尺度混合確率モデルの提案とその応用)

氏名 古居 彬

表面筋電位信号は筋収縮時に発生する生体電気信号であり、皮膚表面から非侵襲に計測可能である。この筋電位信号は筋収縮時の内的状態や人の運動意図を反映しており、これまで様々な分野で応用されてきた。筋電位信号は個々の筋線維におけるランダムな発火活動の総和として計測されるため、多くの場合、確率分布によってその特徴がモデル化される。特に、ガウス分布に基づくモデルは古くから特徴抽出のための基礎理論として幅広く利用されてきた。一方、近年になり、筋電位信号が筋活動に応じて非ガウスな性質を示す場合があることが実験的に報告されるようになった。しかしながら、このようなガウスと非ガウスの両性質を統一的に説明可能な確率モデルは存在しなかった。

本研究では、筋活動に応じた非ガウス性の変化を表現可能な、尺度混合分布に基づく筋電位信号モデルを提案する。また、このモデルの構造を利用した人工筋電位信号生成モデルを提案するとともに、筋電義手の制御を目的とした筋電パターン識別器へと応用する。以下、本論文の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた後、従来研究と本研究の位置付けを明確にする。

第2章では、尺度混合分布に基づく筋電位信号モデルの定式化を行う。従来、一般的に用いられてきたガウス分布に基づく筋電位信号モデルにおいて、その分散は一定の発揮筋力に対して一意に決まると考えられていた。本章では、筋電位信号の非ガウス性が分散のランダムな変動によって生じると仮定し、この構造を尺度混合分布の枠組みでモデル化する。本モデルにおいて分散は潜在的な確率変数として扱われるため、観測データから分散の確率分布の形状を推定することで、分散の変動性を定量的に評価することが可能である。この分散分布の推定は、Expectation-maximization (EM) アルゴリズムに基づく周辺尤度最大化によって実現可能である。実験では、計測した筋電位信号に対する適合度を従来の確率モデルと比較することで、提案モデルの有効性を示す。また、筋力に応じた分散分布パラメータの変化を解析することで、分散分布と筋活動との関係を調査する。

第3章では、人工筋電位信号生成モデルを提案する。本生成モデルでは、筋電位信号から推定した分散分布に対して調整ゲインを適用し、第2章で構築した尺度混合モデルの逆モデルの入力に用いることで、所望の筋発揮力時の筋電位信号を統計的に予測し生成することが可能である。ここで、第2章で導入したEMアルゴリズムに基づく分散分布推定では、反復計算によって最適化を行う必要があるためリアルタイムな生成は困難である。そこで、整流平滑化筋電位信号を利用した近似推定法を新たに導入し、効率的な生成を実現する。実験では、まず近似推定法の推定精度をシミュレーションにより検証する。また、計測した筋電位信号から近似推定した分散分布を用いて人工筋電位信号を生成し、両信号を比較することで提案モデルの生成精度を調査する。さらに、提案モデルによって生成した信号をニューラルネットワークに対するデータ拡張として利用することで、動作識別への応用可能性を確認する。

第4章では、尺度混合モデルに基づく筋電位パターン識別法を提案する。第2章で構築した尺度混合モデルは、一对の電極から計測された生の筋電位信号に対する確率モデルであった。しかしながら、一般に筋電義手への応用を目的としたパターン識別では多チャンネルかつ特徴抽出後の処理信号が用いられる。そこで本章では、尺度混合モデルを多次元へと展開し、さらにその線形和によって有限混合モデルへと拡張することで処理波形の柔軟な分布形状を表現可能とする。そして、この拡張モデルを内包する筋電位パターン識別法を新たに提案する。これにより、分散の不確実性を考慮した高精度な識別が可能である。実験では、まず分散がランダムにばらつくような人工データを用い、提案法が分散の不確実性を考慮可能であることを検証する。また、筋電位信号に対する識別能力を他手法と比較することで、提案法の有効性を示す。

第5章では、本論文の要約と今後の研究課題について述べる。