

# 論文和文概要

(2000字程度)

報告番号	甲 第 41 号	氏名	岩井 隼人
------	----------	----	-------

本研究は、電動義手制御の信頼性向上と装着負担の軽減を目的として、前腕表面の触覚性状に基づく新しい動作判別手法を提案し、実時間識別系およびオンライン環境での実装を通じてその有効性を示したものである。現在広く用いられている筋電義手は、表面筋電位 (sEMG) を制御入力としているが、発汗や筋疲労などの生理的要因の影響を受けやすく、信号特性が変動することが知られている。誤動作や再調整の必要性が生じ、長期安定使用の妨げとなる場合がある。本研究では、筋収縮に伴って前腕表面に生じる皮膚の微小変形や張力変化といった機械的变化に着目し、これを触覚性状信号として計測することで義手制御に応用した。本研究では実用的な義手制御システムを、(1)誤識別が少ないこと、(2)装着負担が小さいこと、(3)実時間で動作識別が可能であること、(4)限られた計算資源で学習・識別が可能であること、の4条件を満たすものと定義した。

第2章では、義手の制御構造と社会的背景を整理し、筋電義手の普及率の低さが信号安定性、訓練負担、制度的課題などに起因することを指摘した。これを踏まえ、触覚センサによる制御系の技術的意義と研究位置づけを明確にした。

第3章では、PVDF フィルムを用いた触覚性状信号の計測システムを構築した。前腕筋上に配置した触覚センサから皮膚表面の微小変形を電荷信号として取得し、チャージアンプおよびアナログフィルタを介して電圧信号に変換した。時間一周波数解析の結果、0~10 Hz の筋隆起信号成分のほかに、10~30 Hz 帯の高周波成分 (筋音的成分) が含まれることを確認した。複数の実験参加者による6種類の手動作の計測から、動作間で高い波形再現性が得られ、触覚性状信号が動作意図推定に有効な情報を含むことを示した。

第4章では、識別精度に影響する要素としてセンサ位置の最適化に焦点を当てた。前腕部の複数位置に触覚センサを配置し、位置ごとの識別性能を比較した結果、センサ数は2箇所で十分であることを示し、橈側手根屈筋 (FCR) および長橈側手根伸筋 (ECRL) 上で最も高い精度を示した。これにより、筋電義手より少ないセンサ数で動作識別可能であることを示した。

第5章では、オフライン動作識別系を設計し、識別性能および実時間応答性の観点から信号処理および識別器を評価した。識別部では誤差逆伝播法ニューラルネットワーク (BPNN)、k近傍法 (k-NN)、サポートベクターマシン (SVM) を比較し、0.1秒以内の応答、9試行以内の学習という実用条件のもとで、SVM が有意に高い識別精度を示した。さらに、識別精度の時間的変化および訓練データ数に伴う変化を1次遅れ系モデルで近似できることを示し、学習試行数および信号取得時間の設計に関する実時間義手制御システムの定量的指針を与えた。

第6章では、Raspberry Pi および Arduino を用いたオンライン環境実験を実施した。触覚センサから取得した信号を Arduino で変換し、Raspberry Pi 上で動作検出・識別を実時間処理する構成を開発した。その結果、訓練試行および評価試行のいずれでも高い識別精度を維持し、動画解析により300ms以下の遅延で動作出力が可能であることを確認した。外部PCを必要としない軽量な実時間義手制御システムの実現可能性を示した。

第7章では、実用化に重要な誤動作抑制機構を検討した。義手制御では識別率を100%にすることは難しく、事故を起こさないよう失敗を防ぐことが重要である。本研究では誤動作の主な要因を、(i)曖昧動作、(ii)未知動作、(iii)体動動作の3種類に整理し、識別結果の信頼度に基づいて動作出力を保留する動作保留機構 (Reject Option) を導入した。One-Class SVM、Reject Option 付き One-vs-Rest SVM、およびクロスエントロピーに基づく手法を比較した結果、Reject Option 付き One-vs-Rest SVM が最も優れた性能を示した。

第8章では、識別性能向上を目的として触覚性状信号の新たな利用方法を検討した。触覚性状信号の位相情報を利用する複素数空間 SVM (Complex-valued SVM: CV-SVM) を提案し、全実験参加者で従来の SVM と同等以上の識別率を示した。さらに高周波成分を分離して併用した結果、特に低精度な参加者で識別率の改善が見られ、高周波成分の活用が識別性能向上に寄与することを示した。

以上より、本研究は筋電信号に依存しない新たな制御信号源として触覚性状信号を提案し、オフラインからオンラインまで一貫した動作判別システムを構築した。提案システムは少数センサで高精度識別を実現し、ロバストネス、リアルタイム応答性、低負荷運用を両立するものであり、義手制御の信頼性向上と社会実装に向けた有効な技術基盤を提供する。

