

[研究助成 (A)]

EMS を用いた位置制御・力制御の統合アプローチと制御性能の評価

2241012



研究代表者

東京理科大学 創域理工学部
電気電子情報工学科

助 教 北 村 知 也

[研究の目的]

本研究は、筋電気刺激（Electrical muscle stimulation: EMS）を用いた身体制御において、位置制御と力制御を統合的に扱う制御手法を構築し、その妥当性と有効性を検証することを目的とする。EMS は筋に電気刺激を加えることで筋収縮を誘発する技術であり（図 1）、軽量・小型かつ関節近傍に直接作用できる点から、従来のアクチュエータに比して優れた制御特性を持つ^[1]。また、動作とは位置制御と力制御の重ね合わせであり、モータを用いて人間の動作を再現する場合には位置制御と力制御の両方が性能を向上させることが報告されている^{[2][3]}。しかし、既存の EMS 研究では位置制御と力制御を明確に区別せず、筋刺激の設計が経験則に頼ってきた。

たとえば、上腕の屈曲動作では主動筋と拮抗筋が協調して動作を制御している^[4]。こうした生理的な機構を再現するには、位置制御には拮抗筋の同時刺激を、力制御には単一筋の刺激を適用するなど、制御目的に応じた刺激設計が必

要である。本研究ではこの視点に基づき、EMS による刺激対象筋の使い分けにより、動作の特性がどう変化するかを検証する。

手首関節の単自由度動作を対象とした実験により、位置制御と力制御で再現される動作や感覚の違いを評価し、さらに 3 軸リニアステージを用いた上腕の多自由度運動の抽出と再現を試みる。これにより、制御対象の性質に応じた刺激方法の選択という新たな設計原則を提示する。

[研究の内容、成果]

・研究の内容

本研究では、EMS による位置制御および力制御の統合的な手法を確立することを目的とし、複数の技術的要素を組み合わせたシステムの構築と、2 段階の被験者実験を通じた評価を行った。具体的には、電気刺激回路と 3 軸リニアステージの製作、ならびに 2 種の被験者実験（単自由度・多自由度）を実施した。

まず、EMS 信号の高精度かつ安全な印加を可能とするための電気刺激回路の製作を行った。刺激出力の安定性と双方向性を確保するため、双方向電流供給が可能な H ブリッジ構成と、一定の電流を維持するための定電流回路を組み合わせた設計を採用した。さらに、誤作動や異常動作が発生した際に備えた出力制限機構を回路に実装することで、安全性にも配慮した。回路は電極配置や刺激パラメータの調整を柔軟に行えるように設計した。

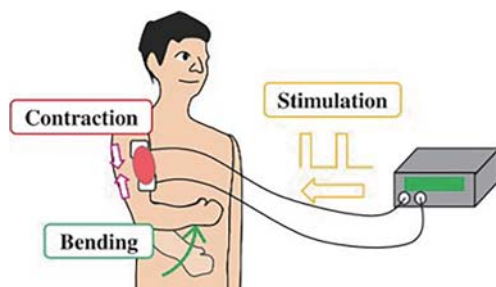


図 1 筋電気刺激の概要

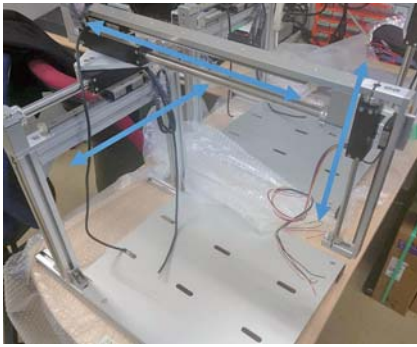


図2 製作した3自由度リニアステージ

次に、人の動作情報を高精度に計測し、かつ力制御によるフィードバックを可能とするために、3軸のリニアステージを製作した（図2）。本ステージは3台のリニアモータを組み合わせて構成され、各軸に独立した制御系を構築した。また、反力推定オブザーバ^[5]を各軸に実装することで、力センサを用いることなく反力を高精度に推定可能とした。これにより、ステージ全体としての力制御が可能となり、被験者の運動中に生じる力の計測および制御への反映をリアルタイムで行える環境を整備した。

その後、位置制御と力制御の違いによって筋刺激のあり方が変化するかどうかを検証するため、実験Ⅰを実施した。対象とした動作は、手関節の屈曲運動であり、被験者に対してEMSを用いて該当動作を誘発させた。実験では、単一の筋（主動筋）のみを刺激する条件と、主動筋と拮抗筋の両方を同時に刺激する条件を設定し、それぞれを位置制御および力制御の枠組みで比較する形式とした。これにより、刺激方法の違いが運動制御や感覚に与える影響を系統的に分析する体制を構築した（図3）。

さらに、より複雑な運動を対象とした実験Ⅱ

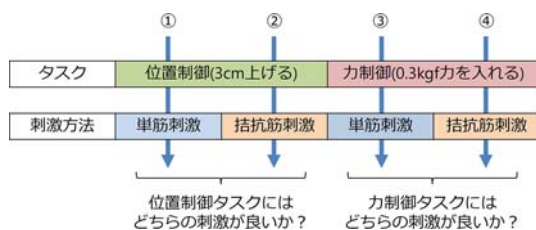


図3 実験Ⅰの検証内容

を実施し、多自由度運動におけるEMS制御の可能性を検討した。実験Ⅱでは、3軸リニアステージを用いて人の上腕における運動軌跡を記録し、そこから抽出された動作情報を基にEMS刺激指令値を生成した。これにより、単一関節ではなく複数関節の連動を伴う運動を、EMSによってどの程度まで再現できるかを評価するための条件を整えた。しかし、後述するようにリニアステージで記録した多自由度の動作をEMSで再現することが困難であったため検証を行うことはできなかった。

・研究の成果

本研究では、EMSによる位置制御および力制御の特性を明確に比較するため、被験者実験（実験Ⅰ）を実施した。被験者は健常な20代男性6名であり、すべての実験は東京理科大学の倫理審査委員会による承認を得た上で実施され、事前にインフォームドコンセントを取得した。

実験では、リニアモータを用いて疑似的にバネを再現し、そのバネを電気刺激によって駆動された筋力によって押し込むことで動作を誘発した。被験者には、運動中に筋の随意収縮を行わず、できるだけ脱力した状態を保つよう指示した。運動の種類は、刺激方法（単筋刺激または拮抗筋刺激）とタスクの種類（位置制御タスクまたは力制御タスク）の2×2、計4条件で構成された。

位置制御タスクとは、バネの剛性にかかわらず、関節を常に同じ位置（3cm）まで曲げることを目的とした運動である。一方、力制御タスクでは、常に同じ力（約3N、0.3kgf相当）を出力することで関節を押し込む運動を行う。各条件において、被験者は異なる5種類のバネ剛性に対してEMSにより誘発された運動を体験し、6回目の試行ではEMSを停止した状態で、被験者に自らの意思で同じ動作を再現するよう求めた。この6回目のバネ剛性はすべての被験者で100N/mに統一されており、再現性を評価する基準とした。

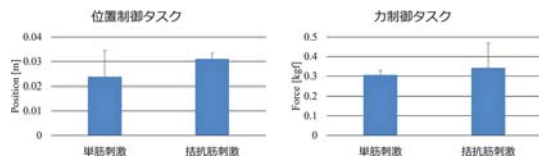


図4 実験Ⅰの実験結果

評価指標としては、6回目の動作と1～5回目における制御目標との乖離を測定し、再現精度を比較した。具体的には、位置制御タスクでは最終的な関節位置と目標位置の誤差を、力制御タスクでは押し込み時の接触力と目標力の誤差を評価指標とした。

実験の結果、位置制御タスクでは拮抗筋を同時に刺激する条件のほうが、単筋刺激に比べて関節位置の再現精度が高いことが確認された(図4)。一方、力制御タスクでは、主動筋のみを刺激する単筋刺激条件のほうが、目標とする力をより正確に再現できる傾向が見られた。すなわち、制御目的に応じて刺激方法を選択することで、EMSによる運動誘発の再現性を高めることができることが示された。

これらの結果は、従来のEMS研究において十分に検討されてこなかった「位置制御と力制御の概念的区別」および「刺激設計の適応的切り替え」の重要性を裏付けるものであり、EMSによる触覚フィードバックの高精度化に向けた技術的基盤を提供するものである。特に、拮抗筋を活用した拮抗駆動による安定した位置制御と、単筋による直感的な力の伝達という二つの特徴は、今後のEMS応用設計において極めて重要な設計指針となる可能性を持つ。

・考察

本研究では、EMSによる制御において刺激方法と制御目標の対応関係を検証した。実験Ⅰの結果から、位置制御には拮抗筋刺激、力制御には単筋刺激が有効であることが示された。拮抗筋刺激による関節位置の再現精度の向上は、関節両側からの制動によって動作が安定するという生理的制御戦略と一致しており、EMSによってその再現が可能である点は極めて意義深

い。一方、力制御では単筋刺激の方が良好な結果を示した。

また、被験者がEMSで誘発された動作を模倣するという課題において、刺激方法が運動の記憶形成や再現性に影響したことから、EMSが力覚フィードバックとしても有効に機能し得ることが示された。これは、VRや遠隔操作における触覚提示への応用にとって重要な知見である。

一方、実験Ⅱでは、EMSによる多自由度運動の再現を試みたが、計画通りの遂行には至らなかった。単自由度制御で得られた知見を拡張するには、上腕全体の複数関節運動を3軸の空間運動に変換する逆運動学的処理が必要であり、加えて各軸の干渉(他軸干渉)も確認された。これらの課題に対処するには、単関節単独の制御を前提としたモデルでは不十分であり、システム全体としてのモデル化と制御系の再設計が必要であることが明らかとなった。多自由度運動への展開は今後の重要な課題である。

[参考文献]

- [1] Lopes, P., Baudisch, P.: Immense power in a tiny package: Wearables based on electrical muscle stimulation, *IEEE Pervasive Comput.*, 16, 3, 12-16, 2017.
- [2] Sasagawa, A., Sakaino, S., Tsuji, T.: Motion generation using bilateral control-based imitation learning with autoregressive learning, *IEEE Access*, 9, 20508-20520, 2021.
- [3] Kitamura, T., Saito, Y., Asai, H., Ohnishi, K.: An Environment-Adaptive Position/Force Control Based on Physical Property Estimation, *IEEE Access*, 2025.
- [4] Bazzucchi, I., Sbriccoli, P., Marzattinocci, G., Felici, F.: Coactivation of the elbow antagonist muscles is not affected by the speed of movement in isokinetic exercise, *Muscle Nerve*, 33, 2, 191-199, 2006.

[成果の発表, 論文など]

実験Ⅰの成果について、the 12th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2026) @ 韓国に投稿予定。