

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

手関節 FES 制御における外乱抑制のための拮抗筋制御に関する基礎研究

吉野 大河

指導教員：渡邊 高志

A Basic study on antagonistic muscle control for disturbance suppression in FES control of wrist joint

Taiga YOSHINO

Supervisor: Takashi WATANABE

This study aimed to develop an antagonistic muscle control system for disturbance suppression using functional electrical stimulation (FES) for hemiplegic patients. This study investigated a method to simultaneously control the joint angle and stiffness of the wrist joint by using two muscles, the agonist and the antagonist, for a 1-DOF palmar-dorsiflexion movement of the wrist joint. After achieving an error within 5 % of the target angle for a certain period of time, the stiffness of the wrist joint was increased by increasing the stimulus intensity of the agonist muscle in a ramp-like manner, and at the same time, the angle was controlled by the antagonistic muscle using a PID controller. The control results showed that it would be possible to realize the angle control appropriately even when the stiffness was changed. Although the possibility of controlling the increasing or decreasing the stiffness was suggested, the method of controlling the stiffness to an arbitrary value and the method of dealing with the case where the muscle strength of the agonistic or the antagonistic muscle for angle control is insufficient are necessary in the future.

1. はじめに

以前に、機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation; FES) を用いて、主動筋と拮抗筋を同時刺激し、関節角度を制御しつつ関節剛性を高める研究がなされてきた¹⁾²⁾。しかし、剛性を直接制御するシステムの開発は進んでおらず、角度と剛性を同時に制御する方法についても十分な結果は得られていない。この原因の一つとして、主動筋と拮抗筋に対する適切な刺激強度を決定することができないことが考えられる。そのため本研究では、角度制御と剛性制御を同時に達成するために、主動筋の刺激強度を増加させて剛性を高め、同時に拮抗筋による角度制御をする方法について検討を行った。

2. 角度と剛性の同時制御方法

図 1 は、健常被験者 4 名 (22-23 歳) で、運動閾値から最大刺激強度までを 100% としたときの 40 %、60 %、80 % の刺激強度で、主動筋に電気刺激を印加し、筋による運動と逆方向の外乱を印加した際の手関節剛性を計測した結果である。剛性は(1)式により求め、荷重は掌に垂直な方向成分を計算して用いた。

$$k = \frac{W \cos \theta_s}{\theta_s - \theta_d} \quad (1)$$

k は剛性 [N/deg]、 W は荷重 [N]、 $\cos \theta_s$ は掌の垂直方向、 θ_s は外乱印加時の角度 [deg]、 θ_d は外乱印加後の最小角度 [deg] を表す。図 1 の結果から、主動筋の刺激強度が上昇するにつれて手関節剛性が増加す

る傾向がみられた。これは、筋の刺激強度が上昇することにより、筋の運動単位の動員数が増え、結果として剛性が大きくなったためと考えられる。この結果より、筋の刺激強度を増加させることで、剛性を高めることが可能になると考えられる。

次に、角度と剛性を同時に制御する方法として、主動筋で目標角度を達成したのち、主動筋の刺激強度を増加させて剛性を高め、同時に拮抗筋で目標角度を保持する方法を検討した。図 2、に使用した制御器を示す。手関節制御の始めに図 2 (a) の PID 制御器

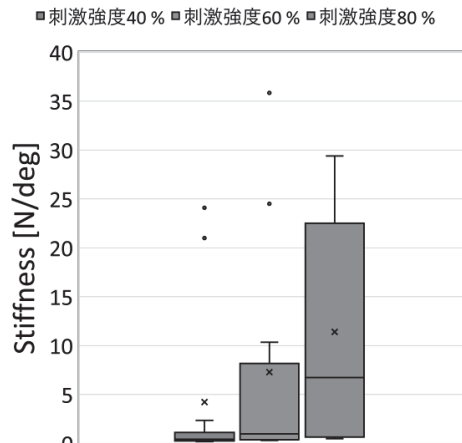


図 1 異なる刺激強度による剛性

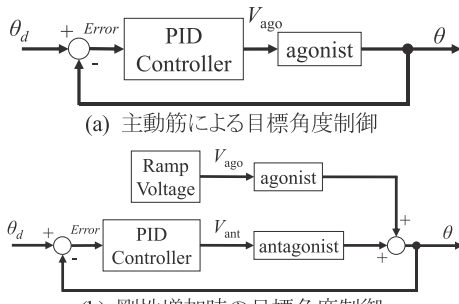


図2 剛性と角度の同時制御の検討で使用した制御法

によって主動筋のみ制御する。その後、目標角度の5%以内に1秒間手関節を維持できた後、図2(b)の制御器に切り替えて、主動筋の刺激強度をランプ状に上昇させ、同時に拮抗筋のPID制御器を用いて角度制御をする。なお、本実験では主動筋の刺激強度を3秒間でランプ上昇するように設定した。制御系への入力は目標角度 θ_d 、出力は計測角度 θ である。

3. 外乱印加を含む角度と剛性の同時制御実験

健常被験者4名(22-23歳)で、FES手関節制御中に外乱を印加する実験を行った。目標角度到達後に上昇させる主動筋の刺激強度を40%と80%の2条件で行った。図3は、外乱印加後の制御終了前の2秒間の偏差の平均である定常偏差を算出したものである。最終刺激強度80%まで増加の際には、定常偏差の値は0に近く、さらに被験者によっては目標角度の5%以内に収まっていることが確認できたため、おおむね適切に角度制御を達成することができたと考えられる。一部、定常偏差が大きくなった場合があったが、拮抗筋の刺激強度が最大に達し、角度を減少させることができなかったためである。一方、刺激強度40%まで増加の場合は、外乱印加後の角度の定常偏差のばらつきが大きくなった。これは、主動筋の発生筋力が小さく、外乱として印加した負荷の重さのために、目標角度に戻れなかったためであった。

図4は、外乱印加時の剛性を算出したものである。主動筋刺激強度40%と80%の場合を比較すると、主動筋の刺激強度を変えることで、異なる剛性を制御可能になることが示唆された。しかし80%の場合には、剛性のばらつきが大きかったことから、剛性の増減の制御可能性は高いが、剛性の値を制御するためには課題が残った。

本研究では、主動筋制御で剛性を変化させ、拮抗筋で角度を制御する方法を検討し、原理的な実現可能性を確認した。しかし、剛性の増減の制御可能性は示唆されたが、剛性を任意の値に制御する方法は課題となった。また、主動筋力の不足に

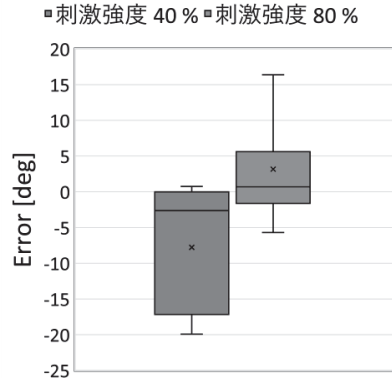


図3 外乱印加後の角度の定常偏差

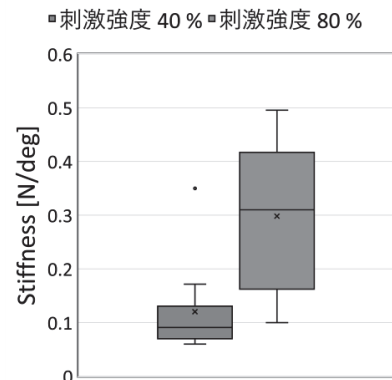


図4 主動筋刺激強度増加後の剛性

よる角度不足や、拮抗筋力不足による角度超過が生じた場合に、拮抗筋だけで角度を補正することができないので、それらへの対応方法の検討が今後必要であると考えます。

4. まとめ

手関節 FES 制御において関節角度を制御しつつ関節剛性を高めるための検討を行い、主動筋の刺激強度により剛性を増減させ、同時に拮抗筋により角度制御を行う方法の実現可能性を確認した。今後、剛性を任意の値に制御する方法、筋力不足時の対応が課題である。

文献

- 1) Antônio Padilha L.Bó, Lucas O.da Fonseca, Ana Carolina C.de Sousa, “FES-induced co-activation of antagonist muscles for upper limb control and disturbance rejection”, Medical Engineering & Physics, vol. 38, Issue 11, pp.1176-1184, 2016
- 2) 久保公人, 藤田欣也, 板倉直明, 井口弥寿彦, 南谷晴之, “FES二関節制御系における拮抗筋の硬さ制御を用いた外乱抑制”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J-74-D-II, No.2, pp.274-281, 1991