

手内在筋への電気刺激による指関節運動特性の調査

渡邊 恭佑[†] 岡 誠[‡] 森 博彦[†]

[†]東京都市大学総合理工学研究科 [‡]東京都市大学情報工学部

1. はじめに

スポーツや日常生活など、器用な指の使い方の学習が必要な場面は多い。表面電極を介して筋肉に電気刺激を与え身体動作を誘発する筋電気刺激は運動学習効果が証明されていることから[1]、筋電気刺激により指の複数関節を高精度に制御可能となれば様々な場面で効果的な運動学習が可能となる。

人間の器用な指運動に欠かせない筋肉として、背側骨間筋、掌側骨間筋、虫様筋からなる手内在筋がある。しかし、これまで手内在筋への刺激により生じる指関節運動を詳細に調査した研究は存在しない。筋電気刺激により指の複数関節を同時に任意の角度へ制御するには手内在筋の特性を明らかにした上で制御方法を検討する必要がある。本研究では、手内在筋の内手の甲から刺激可能な第二・第三背側骨間筋と、第二・第三背側骨間筋の収縮により生じる中指第二・第三関節運動に調査対象を絞り、その特性を調査した(筋肉と関節の位置は図1参照)。

2. 仮説

本研究の調査対象である中指第二・第三関節を筋電気刺激により任意の角度へ同時に制御することを考えた場合、各関節の屈曲動作・伸展動作の組み合わせで表1に示す4つの指動作を連続的に制御可能にする必要がある。著者らの先行研究[2]によって、指屈筋への刺激を強くすると指動作①が、指伸筋への刺激を強くすると指動作④が生じることが分かっている(筋肉の位置は図1参照)。第二・第三背側骨



図1 筋肉と関節の位置

表1 指動作種類

| | | 中指第三関節 | |
|--------|----|--------|------|
| | | 屈曲 | 伸展 |
| 中指第二関節 | 屈曲 | 指動作① | 指動作② |
| | 伸展 | 指動作③ | 指動作④ |

間筋は中指第二関節を伸展, 中指第三関節を屈曲させる作用を持つため, 第二・第三背側骨間筋へ刺激を強くすることで指動作③が生起する. そして第二・第三背側骨間筋へ刺激を弱くすると, 刺激前の角度に戻ろうとして指動作②が生起すると予想される.

一方で, 人間の随意運動では指角度によって各指関節運動を主導する筋肉が異なり[3], 指屈筋・指伸筋を共に強く収縮することで指動作②を行っていることが分かっている[4]. よって, 単に第二・第三背側骨間筋への刺激強弱を調整するのみで指動作②と③を連続的に制御できるとは限らない. そこで本研究では, 以下の2つの仮説を検証することで指の複数関節制御方法検討のための重要な知見を得る.

仮説1. 第二・第三背側骨間筋への刺激による指関節運動の生じやすさは刺激前の指角度(以下, 事前角度)に依存する

仮説2. 第二・第三背側骨間筋への刺激を弱めるのみでは指動作②が十分に生じない

3. 仮説検証実験

始めに指屈筋・指伸筋・第二背側骨間筋・第三背側骨間筋の最小・最大刺激強度を設定した. 各筋肉について指が動き始める強度の半分を最小刺激強度, 角度変化飽和強度と痛みを感じ始める強度の midpoint を最大刺激強度とした. そして第二・第三背側骨間筋への刺激強度を統一的に扱う変数として骨間筋レベルを定義した. 骨間筋レベルが最小値(0.0)の時には第二・第三背側骨間筋への刺激強度は最小, 骨間筋レベルが最大値(1.0)の時には第二・第三背側骨間筋への刺激強度は最大となるように定義した.

続いて2章の2つの仮説を検証するためのデータ収集を行った. 図2下図のように, 指屈筋と指伸筋への刺激比率を表すFE比を一定にした状態で, 第二・第三背側骨間筋への刺激を階段状に増大させた後に減少させた. 指屈筋と指伸筋への刺激比率を一定にした理由は, 仮説1で述べた事前角度を統制するためである. 事前角度を伸展状態から屈曲状態まで表現するため, 指屈筋と指伸筋への刺激比率を表すFE比(値域[0,1])を式(1)のように定義した.

$$FE \text{ 比} = \frac{S_{f,\text{norm}}}{S_{f,\text{norm}} + S_{e,\text{norm}}} \quad (1)$$

式(1)において, $S_{f,\text{norm}}$ と $S_{e,\text{norm}}$ はそれぞれ指屈筋・指伸筋への正規化済み刺激強度である(それぞれ値域[0,1]). FE比の分母は1.0で一定という制約を課すことでFE比の値が決まると指屈筋・指伸筋への

「Investigation of the Characteristics of Finger Joint Movement by Electrical Stimulation to the Intrinsic Muscles」

[†]Kyosuke Watanabe, Hirohiko Mori

Tokyo City University Graduate School of Integrative Science and Engineering

[‡]Makoto Oka

Tokyo City University Faculty of Information Technology

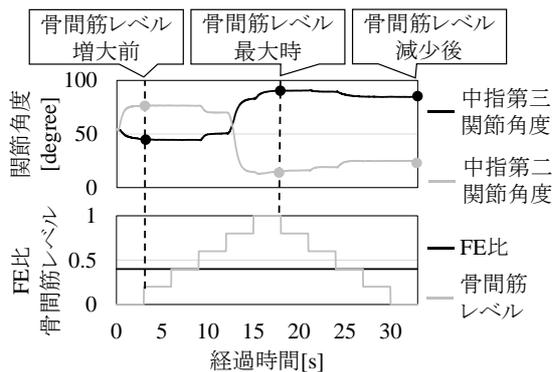


図2 データ収集時系列データの例

刺激強度が一意に決まる. 一定にしたFE比のパターンについては, FE比の値を0.0(最小値, 指伸筋刺激優位)から1.0(最大値, 指屈筋刺激優位)まで0.2ずつ刻み, 6パターン用意した. よって1名の実験参加者につき6つの時系列データ(図2上図)を収集した.

本研究で扱う電気刺激は単相性矩形波, 刺激周波数は20Hz, 刺激強度はパルス高(電流)と定義した. 実験参加者は20代の男女7名とした.

4. 実験結果・考察

仮説1を検証するため, 計42の時系列データ(実験参加者7人×時系列6パターン)のそれぞれで図2の骨間筋レベル増大前の和角度(第三関節角度+第二関節角度)と, 骨間筋レベル増大前から骨間筋レベル最大時までの差角度(第三関節角度-第二関節角度)変化量を算出し, それぞれ実験参加者ごとに正規化した. 骨間筋レベル増大前での和角度は第二・第三背側骨間筋刺激前の中指全体の屈曲度合を表すことから, 仮説1の事前角度として扱う. 2章で述べたように第二・第三背側骨間筋へ刺激すると第三関節は屈曲, 第二関節は伸展し, 差角度が大きくなるはずであるため, 差角度を第二・第三背側骨間筋への刺激による指関節運動の評価指標として扱う. 第二・第三背側骨間筋への刺激を増大させている骨間筋レベル増大前から骨間筋レベル最大時までの差角度変化量を算出することで, 第二・第三背側骨間筋への刺激増大による指関節運動を評価できる. また, 関節可動域は実験参加者により異なるため正規化した. 事前角度が小さい方から均等にデータを三群(事前角度伸展群, 中間群, 屈曲群)に分け, 差角度変化量が群ごとに異なるか検証すべく, 対応のない一元配置分散分析を行った(図3). 事前角度中間群はその他の群に比べて有意に差角度変化量が大きく($p < 0.001$), その他の群間に有意差は認められなかった($p > 0.3$). 以上より, 事前角度が中間的なほど第二・第三背側骨間筋刺激による指関節運動が生じやすいことが分かった. よって, 指の複数関節制御時には指角度によって手内在筋の作用が変化することを考慮する必要がある.

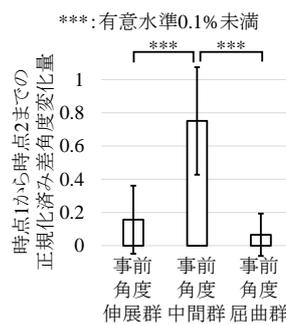


図3 仮説1検証結果

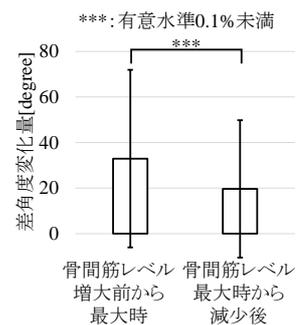


図4 仮説2検証結果

仮説2を検証するため, 骨間筋レベル増大前から骨間筋レベル最大時までの差角度変化量と, 骨間筋レベル最大時から骨間筋レベル減少後までの差角度変化量を, 対応のあるt検定により比較した. t検定の結果(図4), 骨間筋レベル増大前から骨間筋レベル最大時までの差角度変化量の方が有意に大きかった($p < 0.001$). 以上より, 第二・第三背側骨間筋刺激を弱めるのみでは指動作②が十分に生起しないことが分かった. よって, 指の複数関節制御時に指動作②を十分に生起させるには, 第二・第三背側骨間筋の刺激を弱めるのみではなく, 指屈筋・指伸筋共に刺激を強くする必要がある.

5. 結論

本研究は, 筋電気刺激による第二・第三背側骨間筋の特性を明らかにすることを目的とした. 実験の結果, 事前角度が中間的であるほど第二・第三背側骨間筋への刺激により指関節運動が生じやすかった. 更に第二・第三背側骨間筋への刺激を弱めるだけでは事前角度に戻り切らなかった. 本研究によって手内在筋の特性が明らかとなり, 指の複数関節を同時制御する方法を検討する上で重要な知見が得られた.

謝辞 本研究は昭特科学振興財団の助成を受けて実施されたものである.

参考文献

- [1] Tatsuno, S. Hayakawa, T. and Ishikawa, M.: Supportive Training System for Sports Skill Acquisition Based on Electrical Stimulation, 2017 IEEE World Haptics Conference, pp.466-471 (2017)
- [2] 渡邊恭佑, 岡誠, 森博彦, 機能的電気刺激を用いた中指MP関節の動的目標角度への制御, 情報処理学会論文誌, Vol.63, No.4, pp.1170-1185 (2022)
- [3] Neumann, D. 有馬慶美, 日高正巳: 筋骨格系のキネシオロジー 原著第三版, 医歯薬出版株式会社 (2018)
- [4] 浅見豊子, 上肢・手の機能と上肢装具, 日本技師装具学会誌, Vol.28, No.1, pp.13-17 (2012)