

干渉電流による母指以外の手指動作筋の選択的刺激法の検討

Examination of selective stimulation method by interferential current of maniphalanx motion muscle of fingers other than the thumb

栗野祐介, 高橋隆行

Yusuke Awano, Takayuki Takahashi

福島大学

Fukushima University

キーワード: 機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation), 干渉電流 (Interferential Current)

連絡先: 〒960-1296 福島県福島市金谷川1 福島大学 理工学群共生システム理工学類 高橋研究室
栗野祐介, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: awano@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 上肢麻痺者の手指運動機能再建を目的とした様々な研究がなされている¹⁾. その中でも, 機能的電気刺激やパワーアシスト装置に関する研究は多数報告されているが, それぞれに様々な問題がある. 機能的電気刺激においては前腕部・手掌部に多数の筋があり, それらの選択的制御が困難であること, 把持動作において重要な指の内外転運動や対立運動を行う筋が多数存在する手掌部への電極配置が困難であることなどの問題がある. また, パワーアシスト装置においては, 小型で十分なトルクを出力できるアクチュエータの入手が困難であること, それに伴いシステム全体の小型・軽量化が困難であることなどの問題がある. 筆者らは両手法を複合的に使用することでこれらの問題を解決し, 日常的に使用可能なアシストシステムの提案を行う. 提案するアシストシステムは, 前腕部には機能的電気刺激を用いることで筋を選択的に

刺激し, 握力方向への力を発生させ, 手掌部にはパワーアシスト装置を用いることで内外転の運動を実現する. 筆者らはこれまで母指の選択的刺激についての考察を行ってきた²⁾. しかし, 日常生活における手指の運動の多くは母指だけでなく, 母指と示指など複数の指の組み合わせで行われているため, 母指以外の指を選択的に動作させる必要がある. 本論文では, 示指を動作させる筋を選択的に刺激する方法についての基礎的検討を述べる.

2. 干渉電流による局所刺激

通常, 機能的電気刺激では数十~数百 [Hz] の低周波電流を用いる. しかし, 深層に存在する筋の刺激を目的とした場合, 低周波電流では刺激経路の途中の浅層にある筋を支配する運動神経も刺激してしまい, 局所的な刺激は困難である. さらに感覚神経も刺激してしまうため, 刺激時に痛みを伴う不快感を感じることが多い.

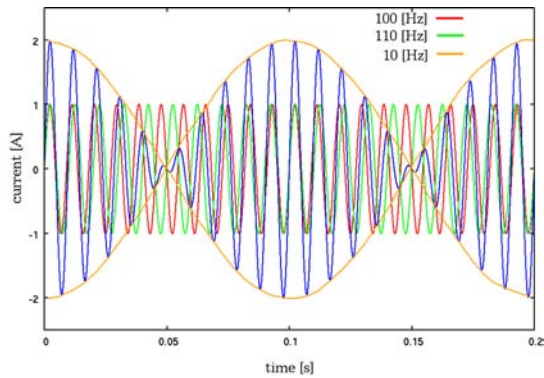


Fig. 1 Interferential Current

そこで本研究では、干渉電流による局所刺激を行う。干渉電流とは、Fig.1 に示される2つの周波数の異なる電流を重ね合わせて生成される包絡線で表される電流であり、その周波数は2つの入力電流の周波数の差分となる。この干渉電流の特性を活かした刺激法を提案する。

まず、2つの異なる周波数を有する中・高周波電流を対応する電極に流す。神経は刺激周波数が高くなると反応しなくなる性質があるため、どちらか一方のみを流しても筋の動作を起こしにくい。さらに周波数が高ければ皮膚インピーダンスも小さくなり、深部組織への通電も可能である。また、2つの電流を同時に流すことで、それらが重なり合う部分で干渉電流が生じる。2つの電流の周波数の差分が低周波数になるように設定することで、干渉電流が生成された部分のみ刺激される。

3. 干渉電流による局所刺激実験

干渉電流による局所刺激実験について述べる。この実験は、干渉電流を用いた局所刺激の検証を目的として行った。実験は Fig.2 に示す浅指屈筋と総指伸筋を選択的刺激的対象とした。

3.1 実験条件

実験は健康男性3名の被験者(20,21,24歳)に対して行った。実験は以下の手順で行った。

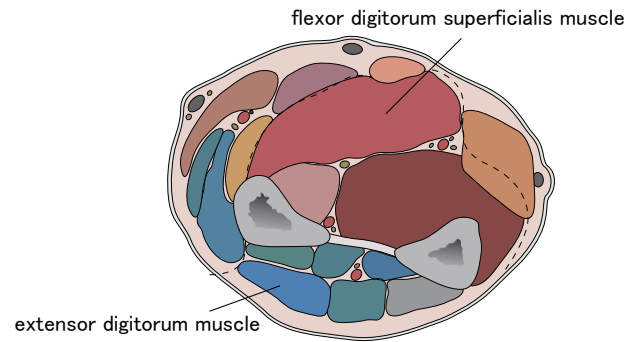


Fig. 2 Cross Section of Forearm at Midpoint³⁾

- 1) 前腕の解剖図などを参考にし、掌側面と背側面にそれぞれ一対の電極を配置する
- 2) 刺激感覚はあるが、指や手首などの動作が見られない入力周波数の最低値を無動作周波数とし、掌側面、背側面での無動作周波数を測定する
- 3) 掌側面、背側面で測定した無動作周波数のうち、高い方の周波数を基準値として入力周波数を決定する
- 4) 電極位置、干渉電流周波数を変えながら示指の動作、又は刺激感覚を確かめながら1)~3)を繰り返し、示指の動作が最大となる状態と被験者本人が最も強く刺激感覚を感じる状態を探索する

また実験は以下の3点に重点をおいて検証を行った。

- 1) 示指の動作が見られるか
- 2) 示指を動作させようとする刺激感覚が強く感じられるか
- 3) 刺激に大電極のみを用いた場合と大電極と小電極を併用した場合には、結果にどのような違いが生じるか

大電極のみを使用した場合、深層の筋が選択的に刺激され、大電極と小電極を併用した場合



Fig. 3 Large Electrode



Fig. 4 Small Electrode

は浅層の筋が選択的に刺激されることが分かっている²⁾。本論文で動作を実現したい示指につながる浅指屈筋および総指伸筋は前腕部の浅層に分布するため、大電極と小電極の併用が有効なのではないかと考えた。本論文ではこの点について確認する。

使用電極をそれぞれ Fig.3, Fig.4 に示す。大電極は 90×70 [mm] のゲルパッド電極(日本メディックス製)を 50×50 [mm] に加工したものをを用いた。小電極は $\phi 13.5$ [mm] のディスプレイ電極(株式会社メッツ製)を用いた。また、刺激信号波形を Fig.5 に示す。刺激信号は正電圧と負電圧の比が 4:1, それぞれの電圧の持続時間の比が 1:4 になる方形波を自作した定電流回路に入力して用いた²⁾。信号電圧はマルチファンクションシンセサイザ WF1974(エヌエフ回路設計ブロック製)から出力した。

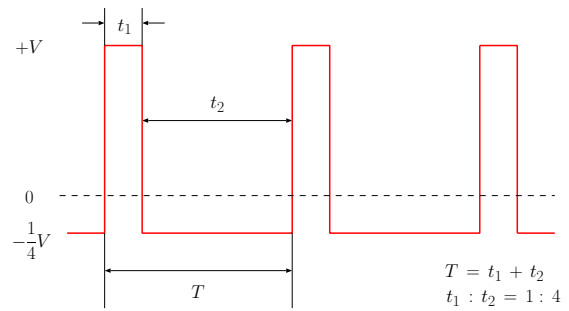


Fig. 5 Waveform of Stimulation Signal

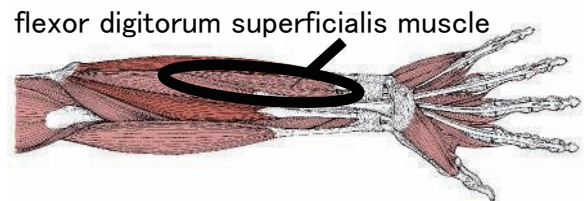


Fig. 6 Flexor Digitorum Superficialis Muscle⁵⁾

3.2 浅指屈筋刺激実験

3.2.1 実験目的

実験は干渉電流を用いて浅指屈筋のみを刺激し、示指を選択的に屈曲動作させることを目的として行った。浅指屈筋の分布図を Fig.6 に示す。

3.2.2 実験方法

被験者 A の大電極のみを使用した場合の電極の配置例を Fig.7, Fig.8, 大電極と小電極を併用する場合の電極の配置例を Fig.9, Fig.10 に示す。

3.2.3 実験結果

大電極のみを使用した場合、全被験者に示指の屈曲動作が見られた。しかし、同時に他の指の屈曲動作が見られたり、屈曲動作があまり見られない被験者もいた。被験者 B は最も顕著に示指のみの屈曲動作が得られたが、被験者 A は中指の屈曲動作が見られ、被験者 C は大きな動作が見られなかった。Table 1 に大電極のみを用いた際の各被験者のパラメータを示す。

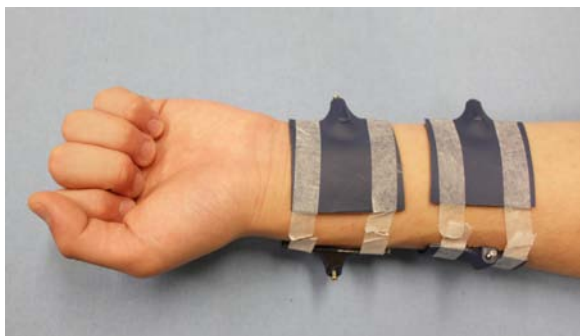


Fig. 7 Electrode Arrangement in palmar aspect

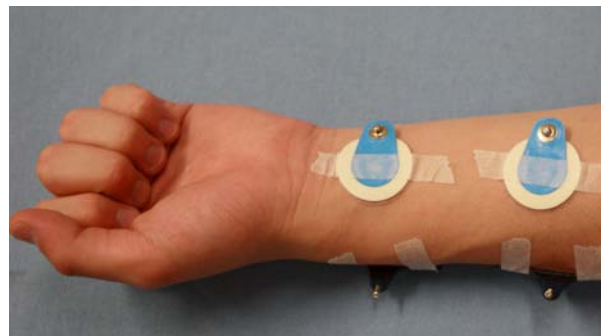


Fig. 9 Electrode Arrangement 2 in palmar aspect

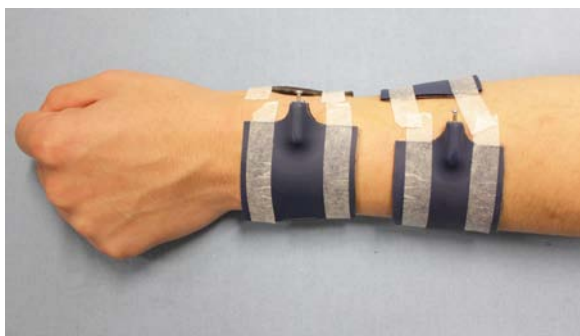


Fig. 8 Electrode Arrangement in dorsal aspect



Fig. 10 Electrode Arrangement 2 in dorsal aspect

大電極と小電極を併用した場合，全被験者に示指の屈曲動作が見られた．また，大電極だけを用いた場合と比較して動作が大きく，選択的に刺激できた．さらに被験者全員において，示指のみの選択的刺激を行うことが可能であった．Table 2 に大電極と小電極を併用した際の各被験者のパラメータを示す．

3.3 総指伸筋刺激実験

3.3.1 実験目的

実験は干渉電流を用いて総指伸筋のみを刺激し，示指を伸展動作させることを目的とした．また，前実験と同一の3名の被験者に対して行った．総指伸筋の分布を Fig.11 に示す．

3.3.2 実験方法

被験者 A の大電極のみを使用した場合の電極の配置例を Fig.12，Fig.13，大電極と小電極を

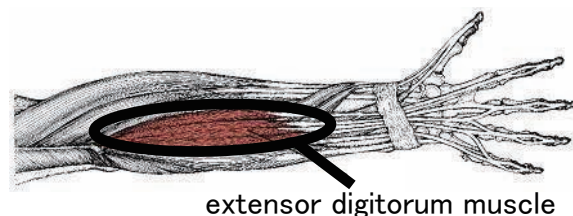


Fig. 11 Extensor Digitorum Muscle⁵⁾

併用した場合の電極の配置例を Fig.14，Fig.15 に示す．

3.3.3 実験結果

大電極のみを使用した場合，全被験者に示指の伸展動作が見られた．しかし，同時にその他の指の屈曲動作が見られたり，示指の PIP 関節で屈曲動作が見られる被験者もいた．Table 3 に大電極のみを用いた際の各被験者のパラメー

Table 1 Experimental Data 1

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Response	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
A	Palmar Aspect	7000Hz	7000Hz	150Hz
	Dorsal Aspect	4400Hz	6850Hz	
B	Palmar Aspect	6000Hz	6000Hz	50Hz
	Dorsal Aspect	4800Hz	5950Hz	
C	Palmar Aspect	4700Hz	7400Hz	100Hz
	Dorsal Aspect	7500Hz	7500Hz	

Table 2 Experimental Data 2

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Response	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
A	Palmar Aspect	15000Hz	15000Hz	200Hz
	Dorsal Aspect	5000Hz	14800Hz	
B	Palmar Aspect	3500Hz	4800Hz	100Hz
	Dorsal Aspect	4900Hz	4900Hz	
C	Palmar Aspect	6000Hz	9900Hz	100Hz
	Dorsal Aspect	10000Hz	10000Hz	

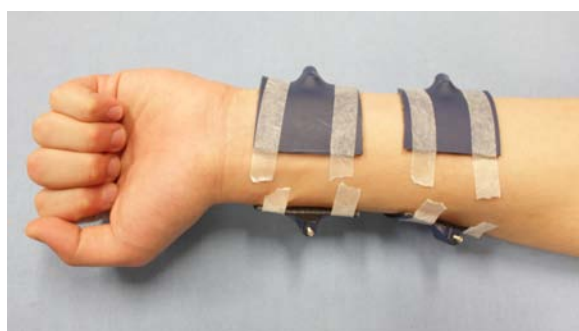


Fig. 12 Electrode Arrangement in palmar aspect

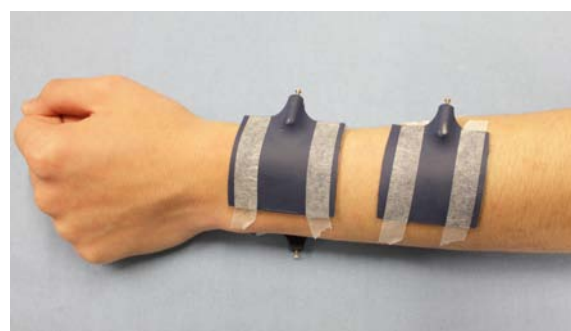


Fig. 13 Electrode Arrangement in dorsal aspect

を
示す。

大電極と小電極を併用した場合、全被験者に示指の伸展動作が見られた。また、大電極のみを用いた場合と比較して動作が大きく、選択的に刺激をすることができた。さらに、被験者全員において、示指のみの選択的刺

が可能であった。Table 4 に大電極と小電極を併用した際の各被験者のパラメータを示す。

Table 3 Experimental Data 3

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Response	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
A	Palmar Aspect	4,600Hz	4,600Hz	100Hz
	Dorsal Aspect	3,800Hz	4,500Hz	
B	Palmar Aspect	5,000Hz	5,000Hz	100Hz
	Dorsal Aspect	4,000Hz	4,900Hz	
C	Palmar Aspect	5,500Hz	6,450Hz	50Hz
	Dorsal Aspect	6,500Hz	6,500Hz	

Table 4 Experimental Data 4

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Response	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
A	Palmar Aspect	5,500Hz	8,960Hz	40Hz
	Dorsal Aspect	9,000Hz	9,000Hz	
B	Palmar Aspect	3,900Hz	4,660Hz	40Hz
	Dorsal Aspect	4,700Hz	4,700Hz	
C	Palmar Aspect	6,700Hz	7,150Hz	150Hz
	Dorsal Aspect	7,300Hz	7,300Hz	



Fig. 14 Electrode Arrangement 2 in palmar aspect

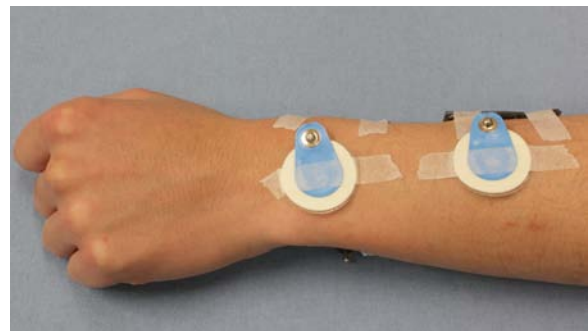


Fig. 15 Electrode Arrangement 2 in dorsal aspect

3.4 考察

掌側面，背側面のみへの刺激では指や手首の動作が見られなかったが，両側を同時に刺激すると指の動作や刺激感覚が感じられた．このことから，体内で干渉電流が生成され，それによ

る刺激が行われたと考えられる．

大電極のみを用いて実験を行う際，屈曲，伸展ともに他の関節や指の動作が見られることから，選択的に刺激を行うことが困難であった．しかし，大電極と小電極を併用して実験を行った場合，屈曲，伸展ともに示指の動作が大電極の

みを使用した場合と比較して大きく、選択的に刺激を行うことができたと考えられる。以上のことから、浅層を刺激する小電極を用いることでより局所的な刺激を行うことができたと考えられる。また、電極を腕の同じ位置に貼った場合、各被験者でそれぞれ異なる結果が得られた。そのため各被験者ごとに試行錯誤的に電極の位置を変える必要があった。これは筋の位置に個人差があるためだと考える。これは装置の汎用性を高めるための課題である。

4. おわりに

本論文では、干渉電流を用いた局所刺激法について述べた。その結果、示指屈曲、示指伸展の独立した動作を得ることができた。この結果から干渉電流による浅指屈筋、総指伸筋への局所刺激が可能であることが示された。しかし、示指と共に他の指や関節が動作する被験者もいたことから刺激箇所の選択性向上においてはさらなる検討が必要である。さらに刺激周波数による個人差も大きく、実験日によって結果が異なる被験者もいたため、汎用性、再現性の面で刺激法としてはまだ十分ではないと考えられる。今後は電極のサイズ、電極配置、刺激周波数などのパラメータを変化させることで、汎用性・再現性を向上させるとともに、任意の筋の局所刺激が正確に行える刺激法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 末松英一郎, 稲田智久, 田川善彦, 志波直人: 前腕への表面電極刺激用マッピングと動作再現実験 バイオメディカル・ファジィ・システム学会大会講演論文集: BMFSA (21), 62-65, 2008-10-11(2008)
- 2) 儀保耕平, 高橋隆行, 二見亮弘: 干渉電流による手指動作筋の選択的刺激法の開発, ロボティクスメカトロニクス講演会 2010, 1A1-E14(2010)
- 3) 河合 良訓 (監), 原島 広至 (著): 3D 踊る肉単, 株式会社エヌ・ティー・エス (2009)

- 4) 高周波治療研究会: 高周波治療について, <http://www.koushuha.jp/whats/>, November.18 (2009)
- 5) 筋肉.guide, <http://www.musculature.biz/>, November.18 (2009)
- 6) 江崎重昭, 川村次郎, 本田知行, 小野仁之: 電気刺激による筋力強化-健常人に対する高周波電気刺激の効果-, 理学療法学, 22-2, 49/52 (1995)