

## 干渉波電流を用いた機能的電気刺激による手指機能再建

### Reconstruction of finger function by functional electrical stimulation based on interference potential current

儀保耕平，高橋隆行，二見亮弘

Kohei Gibo , Takayuki Takahashi , Ryoko Futami

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  
儀保耕平，Tel . : (024)548-5259 , Fax . : (024)548-5259 , E-mail: gibo@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アプローチがなされている．その中でも，機能的電気刺激，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，両手法には様々な課題が挙げられる．機能的電気刺激においては (1) 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，(2) 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が課題として挙げられる．また，パワーアシスト装置においては，(1) 小型で十分なトルクを出力出来るアクチュエータの入手が困難であること，(2)(1) 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が課題として挙げられる．我々はこれらの問題点に対し，両手法を複合的に使用することで問題を解決し日常的に使用可能なアシストシステムのを提案をめざしている．アシストシステムに

おいて，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る．また，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．本論文では，目的とする筋以外の興奮を防ぎ，任意の筋を局所的に刺激するための機能的電気刺激法について述べる．

## 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ことが多い．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い，刺激時に痛みを伴う不快感を感じることが多い<sup>1)</sup>．そこで本論文では干渉電流による局所刺激について述べる．干渉電流とは，Fig . 1 に示すように，2 つの異なる周波数を有する電流を重ね

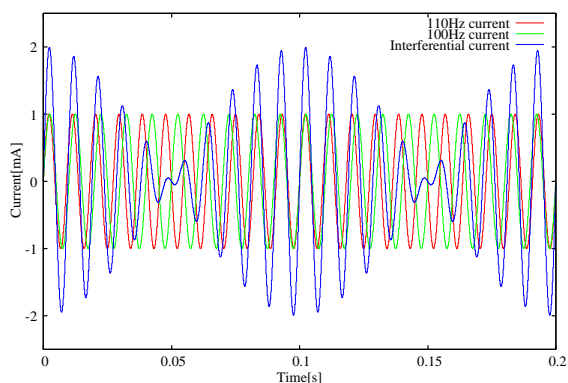


Fig. 1 Interferential Current

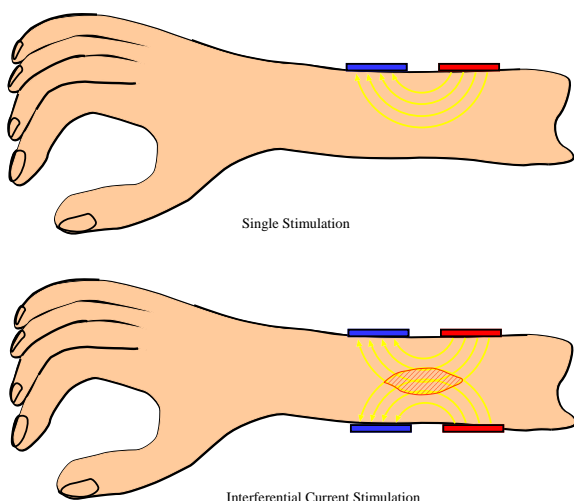


Fig. 2 Scheme of Interferential Current Stimulation

合わせて生成される電流であり、その包絡線の変化する周波数は2つの入力電流の周波数の差分となる値になる。この干渉電流の特性を活かした刺激法を考える。

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あう部分で干渉電流が生じる。干渉電流は入力電流の周波数の差分にあたる周波数を有するため、この周波数差が低周波数になるように設定することで、理論上干渉電流が生

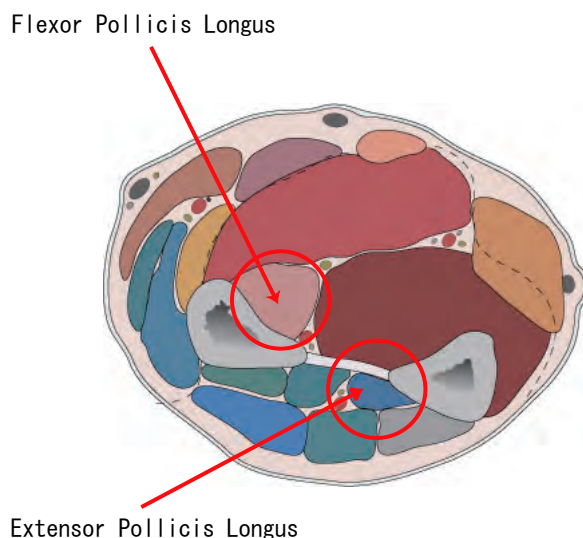


Fig. 3 Cross Section of Forearm at Midpoint<sup>3)</sup>

成された部分のみ刺激される<sup>2)</sup>。干渉電流を用いた局所刺激のイメージを Fig. 2 に示す。

### 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。この実験は実際に干渉電流を用いた局所刺激の可能性の検証を目的として行った。実験は Fig. 3 に示すような前腕深層にある長母指屈筋と長母指伸筋を選択的の刺激の対象とした。

#### 3.1 長母指屈筋

##### 3.1.1 実験目的

干渉電流を用いて長母指屈筋のみを刺激することを目的とする。長母指屈筋の分布図を Fig. 4 に示す。

##### 3.1.2 実験条件

この実験では (1) 母指の屈曲動作が見られるか、(2) 母指を屈曲させようとする刺激感覚が強く感じられるかの2点に重点をおいた。刺激電極は 90mm × 70mm のゲルパッド電極 (日本メディックス製) を使用したが、前腕部に配置する

には大きすぎるので 50mm × 50mm に加工して用いた．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<sup>4)</sup>．信号電圧はマルチファンクションシンセサイザ WF1946(エヌエフ回路設計ブロック製)から出力した．回路は入力 ±5V，出力 ± 60mA の仕様となっている．電極は，掌側面に一対，背側面に一対の電極をそれぞれ手首近傍に配置した．さらに，入力信号は被験者が痛覚やピリピリとした感覚を感じない周波数とし，それを無感覚周波数とする．使用電極，刺激信号波形，電極配置例をそれぞれ Fig. 5，Fig. 6，Fig. 7 に示す．

### 3.1.3 実験方法

この実験は 6 人の被験者に対して行った．実験の方法は (1) 前腕の解剖図などを参考にしながら電極を配置する，(2) 掌側面，背側面での無感覚周波数を測定する，2000Hz から刺激感覚が無くなるまで入力周波数を調節する，(3) 掌側面，背側面で測定した無感覚周波数のうち高いほう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母指の動作，又は刺激感覚を確かめながら (1) ~ (4) を繰り返す，母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．

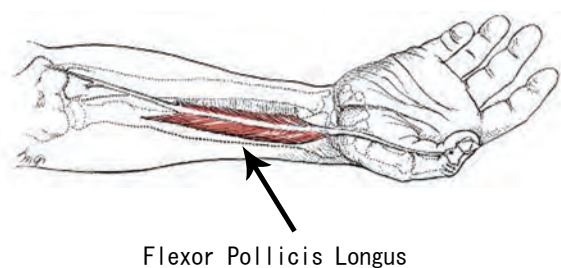


Fig. 4 Flexor Pollicis Longus<sup>5)</sup>



Fig. 5 Electrode

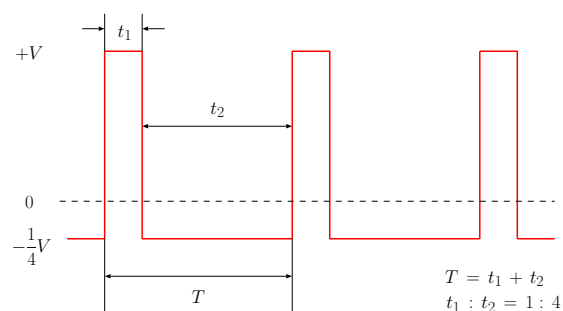


Fig. 6 Waveform of Stimulation Signal

### 3.1.4 実験結果

Table 1 に 6 人の被験者の各パラメータを示す．表中の Frequency of Interferential Current は被験者が最も強く刺激を感じた値である．どの被験者も母指の屈曲動作は得られなかった．母指に強い刺激感覚を感じたり，屈曲動作が起こりそうな場合もあったが屈曲には至らなかった．しかし，掌側面，背側面のみの刺激では得られなかった刺激感覚が両側を刺激したときに得られた．これは，体内で低周波の干渉電流が生成されたと予想される．

### 3.1.5 条件変更

上述の実験を踏まえ，実験条件の変更を行った．刺激効果が高いことから市販の干渉電流治

Table 1 Experimental Data 1(using Electrode Arrangement 1)

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Sensation	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
A	Palmar Aspect	9100Hz	9100Hz	200Hz
	Dorsal Aspect	7700Hz	8900Hz	
B	Palmar Aspect	14900Hz	14900Hz	200Hz
	Dorsal Aspect	13500Hz	14700Hz	
C	Palmar Aspect	14900Hz	14900Hz	100Hz
	Dorsal Aspect	7800Hz	14800Hz	
D	Palmar Aspect	11600Hz	11600Hz	200Hz
	Dorsal Aspect	8300Hz	11400Hz	
E	Palmar Aspect	17500Hz	17500Hz	1 ~ 200Hz
	Dorsal Aspect	11000Hz	17300 ~ 17499Hz	
F	Palmar Aspect	9600Hz	9600Hz	10Hz
	Dorsal Aspect	7400Hz	9590Hz	

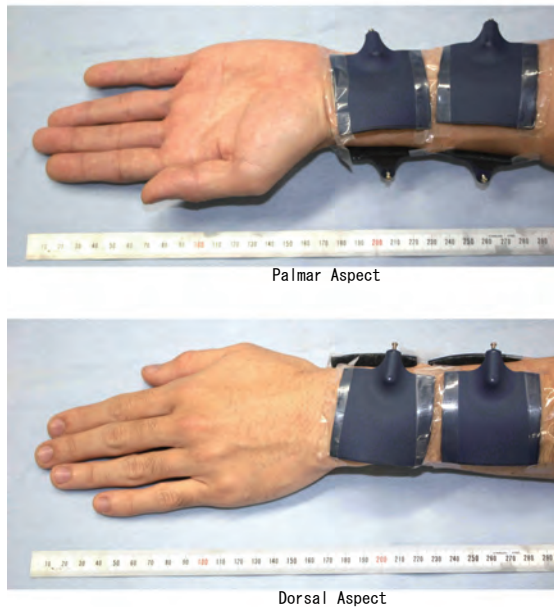


Fig. 7 Electrode Arrangement 1

療器などでは 4000 ~ 5000Hz の中周波電流が用いられている。さらに、各被験者における無感覚周波数を探索した際に、6000 ~ 8000Hz で指や手首の大きな動作は見られなくなったことを踏まえ、基準値の変更を行った。被験者ごとに、刺激感覚はあるが指や手首などの動作が見られ

ない周波数を探索し、これを無動作周波数とする。この無動作周波数を基準値とした実験を行った。電極サイズ、電極の配置箇所の決定方法などは先の実験と同じである。

### 3.1.6 実験方法

実験方法も先の実験と同じである。無動作周波数の決定においても 2000Hz から指や手首の動作がなくなるまで周波数を調節する。

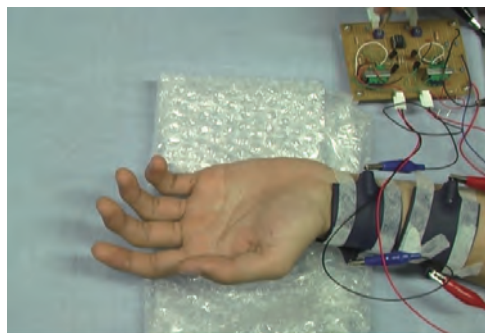
### 3.1.7 実験結果

6 人の被験者のうち 5 人に母指の屈曲動作が見られた。しかし、同時に手首やその他の手指の動作が見られた被験者もあり、母指のみの動作が得られたのは 6 人中 3 人である。Fig. 8 に屈曲動作を示す。

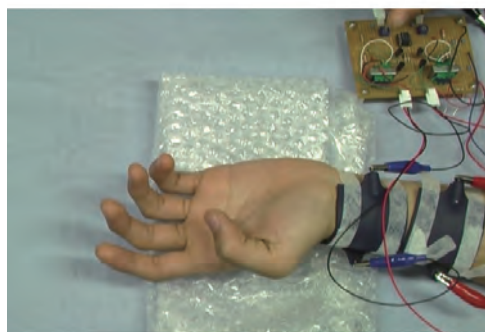
母指のみの動作が見られたのは被験者 B、被験者 C、被験者 F である。そのうち被験者 F は最も顕著に母指のみの屈曲動作が得られた。無感覚周波数を基準とした実験と同様に、掌側面、背側面のみへの刺激では指や手首の動作が見られなかったが、両方ともに刺激すると指の動作

Table 2 Experimental Data 2(using Electrode Arrangement 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 Dorsal Aspect	3800Hz 3900Hz	3800Hz 4000Hz	200Hz
B	Palmar Aspect Dorsal Aspect	5800Hz 4400Hz	5800Hz 5600Hz	200Hz
C	Palmar Aspect Dorsal Aspect	5400Hz 3800Hz	5400Hz 5390Hz	10Hz
D	Palmar Aspect Dorsal Aspect	5800Hz 4100Hz	5800Hz 5600Hz	200Hz
E	Palmar Aspect Dorsal Aspect	3300Hz 3200Hz	3500Hz 3200Hz	200Hz
F	Palmar Aspect Dorsal Aspect	5800Hz 4300Hz	5800Hz 5600Hz	200Hz



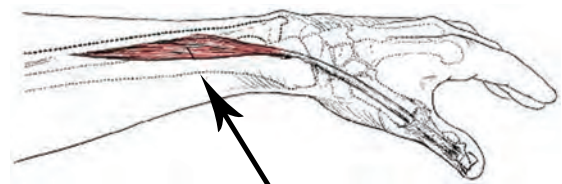
Without Interferential Current Stimulation



With Interferential Current Stimulation

Fig. 8 Flexing Action

や刺激感覚が感じられた。母指の屈曲動作が見られなかった被験者も母指にかかる刺激を感じ



Extensor Pollicis Longus

Fig. 9 Extensor Pollicis Longus<sup>5)</sup>

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。Table 2に各被験者のパラメータを示す。

### 3.2 長母指伸筋

#### 3.2.1 実験目的

干渉電流による局所刺激の可能性を高めるため、長母指伸筋への刺激を試みた。この実験は1人の被験者に対して行った。長母指伸筋の分布を Fig. 9 に示す。

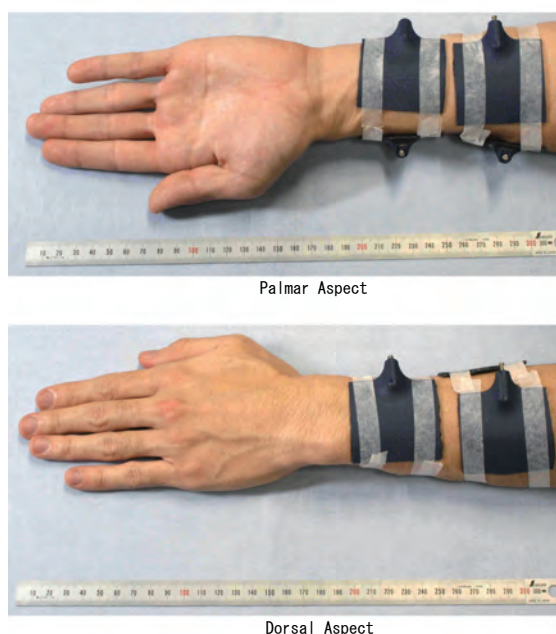


Fig. 10 Electrode Arrangement 2

### 3.2.2 実験条件

この実験では (1) 母指の伸展動作が見られるか、(2) 母指を伸展させようとする刺激感覚が強く得られるかの 2 点に重点をおいて行った。電極種類、電極サイズ、刺激信号波形は長母指屈筋の実験と同じである。手首近傍に配置した長母指屈筋の実験と電極配置が多少異なり、やや肘よりに電極を配置した。Fig. 10 に電極配置例を示す。

### 3.2.3 実験方法

実験方法は、先の実験と同じ方法で行う。入力周波数は、無動作周波数を基準値として行った。

ここで、長母指伸筋の近傍にあり、同じ母指の伸展運動を担う短母指伸筋とどちらを刺激しているかの判断について述べる。短母指伸筋は母指の外転と MP 関節の伸展を行うが、長母指伸筋は外点と MP 関節と IP 関節の伸展を行う。故に IP 関節の伸展が見られるか否かで長母指伸筋の刺激が行われているかの判断を行う。Fig. 11 に MP 関節と IP 関節を示す。

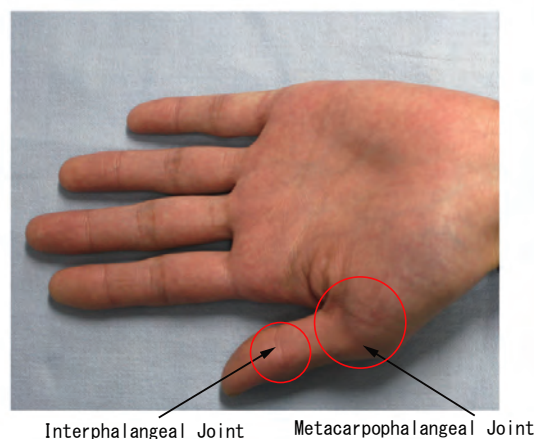


Fig. 11 Interphalangeal Joint, Metacarpophalangeal Joint

### 3.2.4 実験結果

長母指伸筋のみの動作が得られた。実験のデータを Table 3 に示す。

この実験の被験者は長母指屈筋の実験の時の被験者 B と同一人物である。無感覚周波数を基準値とした実験も同時に行った。今回の実験時では長母指屈筋の実験に比べ無感覚周波数と無動作周波数の差が小さかったことにより、無感覚周波数を基準値とした実験でも母指の伸展動作が得られた。しかし、示指と中指の伸展も同時に行われたり、動作が小さく刺激感覚も弱かったことから屈筋、伸筋どちらの実験でも無感覚周波数を基準値とした場合は明確な母指の動作が得られなかったことになる。無感覚周波数を基準値とした実験の実験データを Table 4 に示す。

## 4. おわりに

本論文では、機能的電気刺激とパワーアシスト装置を複合的に取り合わせたアシストシステムにおける干渉電流を用いた局所刺激法の調査を行った。長母指屈筋、長母指伸筋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局所刺激が可能であると考えられる。しかし、母指が動作しない被験者や、母指と共に

Table 3 Experimental Data 3(using Electrode Arrangement 2)

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Response	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
B	Palmar Aspect Dorsal Aspect	7000Hz 5500Hz	7000Hz 6980Hz	20Hz

Table 4 Experimental Data 4(using Electrode Arrangement 2)

Human Subject	Area of Electrode Attachment	Determined Frequency with No Sensation	Applied Frequency for Interferential Current Stimulation	Frequency of Interferential Current
B	Palmar Aspect Dorsal Aspect	7200Hz 6500Hz	7200Hz 7100Hz	100Hz

他の指や関節が動作する被験者もいるなど刺激箇所を選択性向上においてはまだ検討が必要である。さらに無感覚・無動作周波数の個人差も大きく、また同じ被験者でも実験日などの違いにより値が大きく異なるなど、汎用性、再現性の面で刺激法としてはまだ十分ではない。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ながら汎用性・再現性が共に高く、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。さらに、干渉電流による刺激が行われているのかの評価法についての検討もしていく。

5) 筋肉.guide ,  
<http://www.musculature.biz/> , November.18 (2009)

## 参考文献

- 1) 江崎 重昭, 川村 次郎, 本多 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)
- 2) 柳澤健: 痛みと物理療法-超音波療法と電気刺激療法-, 理学療法科学, 15-3, 105/110 (2000)
- 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)