

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月19日現在

機関番号：11601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22650134

研究課題名（和文） 手の運動機能再建のための干渉電流による前腕筋の選択的電気刺激法

研究課題名（英文） Selective stimulation method to forearm muscle by interference current for reconstructing motor function of hand

研究代表者

高橋 隆行 (TAKAHASHI TAKAYUKI)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：70197151

研究成果の概要（和文）：電気刺激による筋発生力と、小型軽量機構による機械的な補助を複合的に利用することにより、実用レベルの麻痺手の動作補助デバイスの実現を最終目的として、代表者らによりその可能性が示された干渉電流による刺激手法の高分解能化について検討した。実験を進めるうち、あるチャンネルを一定振幅で出力しながら他チャンネルの振幅を増大させていくと、一度刺激感覚が消失、または軽減し、再度刺激感覚を得るといった現象を得た。実験およびシミュレーションにより、この現象のメカニズムの一部を説明できる可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：With the aim of developing a small and lightweight mechanically assistive device using functional electrical stimulation (FES) for an individual with a paralyzed hand, the researchers investigated the use of interferential current stimulation as a method of increasing the resolution of the FES. The experiment involves the application of a constant amplitude voltage signal in one channel followed by an increase in the amplitude of the signal on a different channel. A resulting phenomenon during these experiments is the momentary disappearance or reduction of the sensation of the stimuli followed by its return. It has been suggested that experiments and simulations are able to explain to some extent the mechanism of this phenomenon.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	0	1,600,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	420,000	3,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：福祉・介護用ロボット、機能的電気刺激

1. 研究開始当初の背景

(1) 麻痺手の機能再建を目指したデバイスや手法がこれまで数多く提案されている。このうち、実用になっているものは受動的な（アクチュエータを用いない）いわゆる装具のみであるといつてよい。アクチ

ュエータを用いる能動的な補助システムは、実現された場合の効果は極めて大であると考えられるものの実験室レベルでの報告に留まっている。実用にならない大きな理由が重量と大きさであり、この解決には、①小型・軽量な関節機構、②アクチュエータ

の小型・軽量・高出力化，などの改良が必要である。

(2) 一方，機能的電気刺激により麻痺手の運動再建を目指した研究が行われているが，これまでの報告は，実用性という点では悲観的なものがほとんどである。手の運動は，手の平や甲に細かく分布する主として指の内外転を支配する筋と，前腕部に位置し主として指の屈伸を支配する筋により実現されており，人工的な電気刺激ではこれらを十分な精度で協調的に制御することができないためである。また，ガイドのない自由空間中で，力アクチュエータである筋を開ループで位置制御することは困難であり，目標設定にそもそも問題があるということもできる。しかし，力の発生という点では，筋は電気モーター等の電機素子を大きく凌ぐ優秀なアクチュエータであり，この特性を生かすことで，患者本人の筋を麻痺手の運動再建に効果的に活用することができ，上記課題②の解決を図れる可能性がある。

(3) 研究代表者は，世界最軽量のひとつとなるロボットハンドの実現を目指して研究開発を進めてきており，その成果である立体カム，バックラッシュ・レス減速機により，上記課題①の解決を図ることができる。

(4) 研究代表者は，前腕部にある手指屈伸に関連する筋の排他的刺激の可能性について実験的に検証してきた。その結果，電極を適切に配置し，干渉波刺激法を用いて適切な刺激信号を与えることで，前腕深部にある長母指屈筋を排他的に刺激できることが確認され，これを上記課題②の解決法として用いることで，最終目標デバイスである，電気刺激による患者本人の筋による発生力と小型軽量機構による機械的な補助を複合的に利用する新しい補助デバイスの実現可能性が大きく高まった。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は，握力など作業上必要な力を前腕部の電気刺激により患者本人の筋肉を使って発生させ，小型軽量の機械的補助デバイスを指の内外転を補助するように用いることで麻痺手の動作を補助する，新しい手法の実現である。このため，手の機能的電気刺激による運動再建に関して以下の点について検証し，機械的補助機構との協調動作を前提とした刺激法に関する基礎的な知見を得ることを当初目的とした。

(1) 前腕部にある指ならびに手首の運動を支配する筋を，十分な空間分解能をもって電気刺激する干渉電流法を確立する。この際，発生力は主として握力方向に着目し，指の内外転運動は機械的デバイスによ

り補助（制御）されることを前提として，機械デバイスが補正できること（1mNm 以下）を条件として実験を進める。

(2) リアルタイムで指先発生力を計測できる試作装置を用いて，適切な電気刺激パラメータの自動探索を試みる。また，手や手首等の動作の結果生じる刺激点の変化について定量的なデータ取得を試み，適応的に刺激点ならびに刺激パラメータの調節を試みる。

しかしながら，実験を進めるうち，マルチチャンネルによる経皮的電気刺激を行っている最中に，刺激信号振幅と手指動作のある非単調な関係を得た。前腕に対する 2ch 電気刺激実験において，あるチャンネルを一定振幅で出力しながら他チャンネルの振幅を増大させていくと，一度刺激感覚が消失，または軽減し，再度刺激感覚を得るという現象である。この現象は刺激感覚だけでなく，刺激信号振幅と手掌部の動作との間にも非単調な応答が見られた。この非単調な現象は，選択的刺激においては障害になると考えられた。そこで，この問題を解決するため，上述の現象が生じる刺激条件と，生じない刺激条件の比較を行い，さらに有限要素法を用いた簡易モデルにおける生体の刺激時の体内様相について詳細に検討することとした。

3. 研究の方法

この問題を解決するため，

(1) 上述の非単調現象が生じる刺激条件と，生じない刺激条件の比較を行った。具体的には

- ① 刺激信号の振幅変化
 - ② 位相遅れ振幅変化刺激
 - ③ 刺激タイミングの異なる振幅変化
 - ④ 2周期振幅変化刺激
 - ⑤ 定電圧刺激
- の各条件で比較した。

(2) さらに有限要素法を用いた簡易モデルにおける生体の刺激時の体内様相について検討した。

4. 研究成果

(1) 非単調現象が生じる刺激条件と，生じない刺激条件の比較

- ① 刺激信号の振幅変化

被験者は上肢に障害のない健常な男子大学生（21～24 歳）3 名である。被験者ごとに運動点を探し，基準電極としてゲルパッド電極大（45×70 mm）と，刺激電極としてゲルパッド電極小（30×40mm）を前腕背側に配置する。皮膚に電極をなじませるために電極を配置し，30 分程度経過してから実験を行った。また，手首の

傾斜角度を記録するため、手掌部背面 (Fig. 1 中赤丸印) にクロスボー株式会社製の傾斜角度センサ CXTA02 (20×45×27mm) を配置した。刺激は PC の DA 変換出力からの電圧を定電流回路に入力し、電流刺激に変換して与えた。チャンネルは橈側の電極対をチャンネル 1, 尺側の電極対をチャンネル 2 とした。実験の手順を以下に示す。



Fig. 1

- A) チャンネル 1, チャンネル 2 共に被験者自身が定電流刺激回路のボリュームを操作し, 「急に刺激が行われても痛みが無い」強さに設定し, これを最大振幅とする
- B) 刺激信号振幅が 25 段階で増幅し, 25 段階で減少する刺激をチャンネル 1, チャンネル 2 単独で行い, それぞれの刺激時の手首の関節角度を傾斜角センサにて記録する。同振幅持続時間は 0.5[s] とする。この時間は刺激開始から手掌部の動作が定常状態になる時間である。この時, 先に設定した最大振幅を 100[%] とし, この先刺激信号振幅は [%] で示す
- C) チャンネル 1 の刺激信号振幅を最大で固定し, チャンネル 2 の刺激信号振幅が変化する刺激を行い, 手首の関節角度傾斜センサにて記録する
- D) 刺激信号振幅を固定するチャンネルを逆にし, 同じ手順で刺激を行う
- E) A) ~ D) の手順を 100, 500, 1000, 5000, 10000 [Hz] の各周波数で繰り返す

実験の結果, 被験者 3 名共に刺激信号振幅と手首の関節角度との関係に非単調性が見られた。高周波である 10000 [Hz] での刺激では手掌部の動作が得られない被験者もいたが, 手掌部の動作が起きた周波数での刺激では, どの被験者でも非単調な現象が見られた。この非単調な応答は, 刺激時の筋収縮によって電極を配置している皮膚と筋支配神経の位置がずれることで刺激点が変わっていることが原因と考えられる。筋や筋支配神経束の位置, また電極の配置は被験者間ごとで異なり, さらに刺激信号の最大振幅は同一の被験者であっても皮膚の乾燥度などで実験日ごとに異なる。以上の

ことから非単調な応答の発生タイミング, 頻度, 現象の度合いが異なっていると考えられる。

② 位相遅れ振幅変化刺激

チャンネル 2 の刺激信号がチャンネル 1 の刺激信号より位相が 180° 遅れて出力される以外は①と同じ条件で実験を行った。実験の結果, すべての被験者において, 刺激信号振幅と手掌部の動作との間に非単調な応答は見られなかった。また, 刺激感覚についても刺激信号振幅の増大に伴い, ピリピリとした電気刺激を受けているという感覚は増大し, 刺激信号振幅の減少に伴い減少した。本実験でも高周波である 10000 [Hz] での刺激では手掌部の動作が得られない被験者がいたが, 刺激感覚に関しては刺激信号振幅の増減に伴った刺激感覚を得た。この実験条件では, チャンネル 1 と 2 の信号極性が打ち消しあうようになっている。①の条件での実験と比較して考えると, 非単調な応答が起きる原因の一つとして, 同極性の刺激信号波形を用いていることが考えられた。

③ 刺激タイミングの異なる振幅変化

チャンネル 2 の刺激信号がチャンネル 1 の刺激信号の休止時間に出力される以外は, ①と同じ条件で実験を行った。実験の結果, すべての被験者において, 刺激信号振幅と手掌部の動作との間に非単調な応答は見られなかった。また, 刺激感覚についても刺激信号振幅の増大に伴い, ピリピリとした電気刺激を受けているという感覚は増大し, 刺激信号振幅の減少に伴い減少した。本実験でも高周波である 10000 [Hz] での刺激では手掌部の動作が得られない被験者がいたが, 刺激感覚に関しては刺激信号振幅の増減に伴った刺激感覚を得た。①の条件での実験と比較して考えると, 非単調な応答が起きる原因の一つとして, 刺激信号のパルス出力タイミングが同じである刺激信号波形を用いていることが考えられる。

④ 2 周期振幅変化刺激

刺激信号の振幅変調が 2 回繰り返される以外は, ①と同じ条件で実験を行った。実験の結果, すべての被験者において刺激信号振幅と手首の傾斜角度との間に非単調な応答が見られた。各実験同様高周波の 10000 [Hz] では手掌部の動作が得られない被験者もいたが, 手掌部の動作が得られた刺激では, どの被験者も非単調な現象が得られた。また, 刺激感覚についてもすべての被験者で刺激信号振幅の増減と異なるといふ非単調な増減を得た。

⑤ 定電圧刺激

刺激として、定電流の代わりに定電圧を用いる以外は、①と同じ条件で実験を行った。実験の結果、刺激信号振幅と手首の傾斜角度との間に非単調な応答が見られた。また、刺激感覚に関してもすべての被験者が刺激信号振幅の増減と異なる非単調な増減を得た。①での実験と同様に、被験者や周波数の違いによって、非単調な応答が発生する回数やタイミングが異なり、それらの関連性は不明である。

(2) 有限要素法を用いた簡易モデルにおける生体の刺激時の体内様相

体内には骨・骨間膜・筋・神経・血管などの組織が多数存在している。筋や骨など異なる物質で構成されている組織は、導電率や比誘電率などの物性値が個々の組織で異なっているため、電気刺激時には体内の電位分布は複雑化していると考えられる。しかし、それらの組織が電気刺激時に体内の電位分布に与える影響は明らかになっていない。そこで、上述のさまざまな刺激条件下での非単調現象の原因について検討するため、有限要素法を用いた電位・電界シミュレーションを行った。

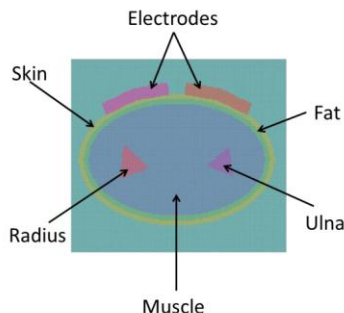


Fig. 2

作成した前腕モデルを Fig. 2 に示す。簡易化のため、皮質・脂肪・骨の他は均一に存在する筋とした。シミュレーションの結果、狭い範囲で複雑に電界強度が変化する部分があることが明らかとなった。そのため、筋の収縮で神経束の位置が変化し、非単調現象の発生につながっていると推測できる。また、全てのシミュレーションを通して、骨の周辺で電界強度が高くなる部分が見受けられる。骨の近くには神経が通っていることが多く、このことから、骨が体内電位分布に与える影響が、目的としない神経の刺激につながる恐れが考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 安沢孝太, 佐々木裕之, 鄭聖熹, 高橋隆行, 低バックラッシュ立体カム機構を用いたロボットハンドの開発～軽量ロボットハンドの試作と関節機構の評価～, 日本ロボット学会誌, 査読有, vol. 28, no. 7, 115-122, 2010.
- ② Hiroyuki Sasaki, Tomoya Masuyama, Takayuki Takahashi, Development of a Low Backlash Crown Reducer, The 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intl. Robots and Sys., 査読有, TuDInB. 50 (CDROM), 1384-1389, 2010.

〔学会発表〕(計14件)

- ① 儀保耕平, 二見亮弘: 前腕経皮的 FES における応答特性の非単調性に関する検討, 第 18 回日本 FES 研究会学術講演会講演論文集, pp. 27-32, 2012. 12, (岡山理科大学).
- ② 藤枝 涼, 二見亮弘: 断続高周波による機能的電気刺激のパラメータの検討, 第 18 回日本 FES 研究会学術講演会講演論文集, pp. 37-42, 2012. 2, (岡山理科大学).
- ③ 三浦裕文・藤森優太・高橋隆行, 高精度立体カム機構のフォロア軌跡の包絡線を用いたカム面の導出, 計測自動制御学会 東北支部 第 269 回研究集会, no. 269-4, 2011. 12, (東北学院大学).
- ④ 坂本将史・高橋隆行・尾股定夫, 生体硬度を用いた掌握運動時筋発生力計測手法の検討, 計測自動制御学会 東北支部 第 269 回研究集会, no. 269-11, 2011. 12, (東北学院大学).
- ⑤ 坂本将史・高橋隆行・尾股定夫, 生体硬度を用いた筋発生力計測手法の検討, 日本福祉工学会第 15 回学術講演会, 2011. 11, (山梨大学).
- ⑥ 儀保耕平, 高橋隆行, 二見亮弘, 前腕運動神経刺激のためのモデリングと刺激実験, 第 45 回 日本生体医工学会東北支部大会講演論文集, ME-o4-1, 2011. 10, (岩手医科大学).
- ⑦ 藤森 優太, 佐々木 裕之, 高橋 隆行, 秦 安延, 秦 豪一, 伏見 雅英, 高崎 進, 関富 勇治, 高精度立体カム機構及び変形クラウンギア減速機構を用いた 医療用小型多自由度マニピュレータの検討, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 3C1-3 (CDROM), 2011. 9.
- ⑧ 藤森優太, 安沢孝太, 高橋隆行, 高精度立体カム機構の評価とそれを用いた医療用小型多自由度マニピュレータの基礎的検討, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'11,

- 2P2-H4(CDROM), 2011.5, (芝浦工業大学).
- ⑨ 佐々木裕之, 増山知也, 安沢孝太, 高橋隆行, 伏見雅英, 秦豪一, 秦安延, 高崎進, 低バックラッシュなクラウン減速機の伝達トルクの向上, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11, 2A2-J16(CDROM, 2011.5, (岡山市).
- ⑩ 安沢孝太, 高橋隆行, 高精度立体カム機構を用いた小型パラレルマニピュレータの開発～高精度立体カム機構と試作マニピュレータの評価～, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11, 2A1-J06, 2011.5, (岡山市).
- ⑪ 藤森優太, 安沢孝太, 佐々木裕之, 高橋隆行, 低バックラッシュ立体カム機構を用いた医療用小型高精度多自由度マニピュレータの開発, 計測自動制御学会東北支部第261回研究集会, no. 261-5, 2010.11, (福島大学).
- ⑫ 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, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10, 1A1-E14(CDROM), 2010.6, (旭川市).
- ⑬ 安沢孝太・高橋隆行, 低バックラッシュ立体カム機構のパラレルマニピュレータへの応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10, 1A2-G22(CDROM), 2010.6, (旭川市).
- ⑭ 佐々木裕之・増山知也・安沢孝太・高橋隆行・秦豪一・秦安延・高崎進, 低バックラッシュなクラウン減速機の小径化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10, 2P1-C26, 2010.6, (旭川市).

〔産業財産権〕

○取得状況 (計2件)

名称：変形クラウンギア減速機構

発明者：高橋 隆行, 他3名

権利者：福島大学

種類：特許権

番号：2,696,888

取得年月日：23年10月

国内外の別：国外 (カナダ)

名称：変形クラウンギア減速機構

発明者：高橋 隆行, 他3名

権利者：福島大学

種類：特許権

番号：特許第4511635号

取得年月日：22年5月

国内外の別：国内

(1)研究代表者

高橋 隆行 (TAKAHASHI TAKAYUKI)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：70197151

(2)研究分担者

二見 亮弘 (FUTAMI RYOKO)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：20156938

6. 研究組織