

氏 名	むら かつ はじめ 村 上 肇
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 6 年 10 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	平成 元 年 3 月 北海道大学大学院工学研究科生体工学専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	機能的電気刺激 (FES) による体幹運動の制御に関する 基礎研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 星宮 望 東北大学教授 高木 相 東北大学教授 山本 光璋 東北大学教授 半田 康延 (医学研究科)

## 論 文 内 容 要 旨

### 1. 序 論

脳卒中に伴う皮質遠心性線維の損傷や、種々の事故による脊髄損傷を被ると、上位からの運動指令の伝達が阻害され、その結果として末梢当該部位の運動機能の麻痺が生ずる。しかし、それらがあくまで中枢性の障害であって、末梢の運動器自体に損傷が生じない場合がある。それら末梢の神経筋系に対して、医用電子・生体工学的手法によって運動指令を補うことにより、麻痺している部位の運動の再建が期待される。この運動指令として外部から電気刺激を印加し、運動機能麻痺者の動作を再建するのが、「機能的電気刺激」(Functional Electrical Stimulation; FES) と呼ばれる手法である。FES は、運動・呼吸・排尿機能の補助や制御、及び感覚機能の代行などに広く用いられている。FES による運動機能の再建としては、手指の把持動作、肘の屈伸、肩の屈曲・外転・水平内外転といった上肢動作、及び起立、歩行といった下肢動作の再建が既に行われている。しかしながら、体幹の動作に関する FES の研究はほとんど行われていないのが現状である。

FES で動作再建を行うためには、その動作を達成するために刺激すべき筋の選択、及び刺激方式を定める必要がある。また、従来の四肢の動作再建に比べて、体幹動作の再建に際しては、より多数の筋を刺激する必要が生じる可能性がある。そこで本研究では、FES による体幹運動制御のための基礎研究として、刺激パターン生成のための基礎的知見を得るための、体幹動作中の筋活動電位の計測と解析、及び、体幹制御に利用可能な高機能 FES システムの開発に関する研究を行った。

## 2. 機能的電気刺激による運動機能の再建

FESは、興奮性を有する末梢の神経筋系に対して、外部から電気刺激を印加することにより、喪失した機能を再建する手法である。FESシステムの操作者（すなわち、運動機能麻痺者）は、残存している随意機能によって、制御命令を与える。システムはその命令を解読して、電気刺激のためのパルス波形を生成する。このパルス波形は電極を介して、対象となる神経筋系を刺激し、運動が発生する。したがってFESシステムは、切断された運動指令伝達路を電子工学的にバイパスする神経補綴の装置であるといえる。

本論文第2章では、体幹運動の制御を考察する上で関連する、FES刺激パターン制御方式、刺激装置、体幹筋骨格系、並びに体幹筋群のFESについて、概説した。

## 3. 体位変換動作中の多チャンネル筋電図解析

FESで動作再建を実現するためには、対象となる動作と、刺激する筋との定量的対応関係に基づいた「刺激パターン」の生成が重要となる。体幹筋群の活動に関する研究は既に報告されているが、それらは姿勢維持や、上肢・下肢運動との同期的な活動に着目しており、本研究で目的とする体幹動作に関する筋活動の報告は、ようやく緒についたばかりである。

そこで、本論文第3章では、FESによる動作再建を実現するための基礎的知見を得ることを目的として、健常被験者を対象として、体位変換動作について多チャンネル筋電図解析を行った。

第3章第2節では、表面電極によって導出した筋電図について解析を行い、体位変換動作中の各筋の活動状態の推移、及び筋群の協同関係を明らかにすることができた。特に、体位変換に際して上肢帯の運動を導入することによって、体幹筋群の活動が変化することから、上肢・体幹・下肢の協調的な刺激によってFESで効率の良い体位変換が実現できる可能性があることが分かった。

第3章第3節では、経皮的埋込電極によって導出された筋活動電位について議論した。この実験結果は基本的には表面電極による結果と同様の傾向を示しており、さらに腸腰筋や腰方形筋といった深層に位置する筋の活動を解析することができた。その結果、幾つかの筋群の特徴を抽出することができ、FESの刺激パターン作成時のデータ処理に有効な知見を得ることができた。

これらの結果は、FESで効率の良い体位変換を実現する上で有用なだけでなく、体幹筋群に対する筋力強化のための治療的電気刺激（Therapeutic Electrical Stimulation；TES）にも役立つものと思われる。

## 4. 体幹胸腰部の単位動作中の筋電図解析

FESの刺激パターンを生成する場合、再建する動作と筋活動の対応関係を明確にする上で、筋電図解析は有効な方法である。刺激パターン生成の知見を得るための筋電図解析の手法として、大きく分けて、2種類の方法が考えられる。第1は、本論文第3章のように、再建すべき動作そのものを直接調べる手法である。第2は、再建動作を個々のより単純な動作に分解し、それらについて個別に解析を行い、最終的に統合して議論する手法である。解析結果をFESの刺激パターンに反映させる場合、前者の方法は、応用範囲が極めて制限されるという欠点を有する。そこで本論文第

4章では、後者の手法に基づいて、より汎用性の高い再建方法を確立するための手法として、単位動作分解手法を提案した。また、この手法を導入することによって、各筋の機能と活動に関する議論がより単純化して行える。そこで、筋の重要度に関する新しい評価関数を考案し、それに基づいて体幹胸腰部の筋電図を解析した。

第4章第2節では、単位動作分解手法の概念について述べた。一般的な動作を個別の関節の動作に分解して議論することで、FESによる再建動作を、各関節での動作の種類を選択と、刺激強度の調整、そして遅延によって表現できることを説明した。また、体幹胸腰部に関する単位動作として、前屈、後屈、側屈、回旋の4種類を定義した。

第4章第3節では、再建動作に関する筋の重要度の評価法について述べた。まず、従来から行われている筋活動電位の振幅による議論について検討を加え、問題点を指摘した。そして、これを解決する一手法として、変動係数に着目し、これを用いた筋の重要度の評価方法を定めた。

第4章第4節では、第2節で定義した胸腰部の単位動作について筋電図を測定し、これを変動係数で評価することにより、単位動作実現に関する体幹筋群の重要度に検討を加えた。その結果、振幅の小さい主動筋の筋電信号であっても適切に判定できることを確認し、変動係数による重要度評価が有用であることを示唆する結果を得た。

FESの臨床応用に際しては、任意の再建動作に関する刺激パターンを容易に作成できること、また再建動作に必要とされる筋群の選定を定量的に評価できることが重要である。本章で提案した手法は、これらの点を解決するためのものである。これらを発展させることにより、FESの臨床応用がより広範に進められるものと思われる。

## 5. 高機能FESシステムの開発

8ビットマイクロコンピュータで構成された基本的な多チャンネルFESシステムは、四肢麻痺者の上肢運動機能の再建を既に可能にした。このFESシステムは30チャンネルの刺激出力を有している。しかしながら、起立や歩行といった下肢の運動機能の再建のためには、60チャンネル以上の刺激出力チャンネル数が必要となる。また四肢麻痺者の上肢動作であっても、手指・肘・肩の同時動作、あるいは左右両上肢の協調的動作といったより複雑な動作の再建の実現を目指すのであれば、従来よりも多くの刺激チャンネル数を必要とする。体幹制御を行う場合にも、同様の問題が生ずるのである。

そこで本論文第5章では、新しいFESシステムの基本仕様を明確にすると共に、主として研究目的での使用を想定したFESシステムのソフトウェアを開発し、またマン・マシン・インタフェースについて検討を加えた。

第5章第2節では、高機能FESシステムで必要になるとと思われる性能について検討を加えた。

第5章第3節では、前節の条件を満たす性能を有するFESシステムを製作し、その概要について説明した。

第5章第4節では、製作したFESシステムをより適切に運用するための、マン・マシン・インタフェースの改良について検討を行った。

第5章第5節では、このFESシステムに関する考察を行った。

この高機能FESシステムを用いることにより、FESによる体幹制御が将来的に可能になるものと思われる。

## 6. 考 察

本論文第6章では、前述の結果を踏まえ、FESによる麻痺者の運動機能の再建について述べた。

第6章第1節では、本論文がその前提としていた「筋電図解析に基づく刺激パターン作成法」について言及し、臨床の場での動作再建には、刺激パターンの修正過程も重要であることを指摘した。

第6章第2節では、本論文で提案した「単位動作分解手法」について、その問題点を論じた。また、体位に応じて筋活動を調整する方法について説明した。

第6章第3節では、機能再建に際する、FESとそれ以外の外部機器との比較を行い、FESの特徴について検討を加えた。そして、FESが、主目的たる機能の実現だけでなく、それ以外の二次的な側面に対する効果をも包含すべきであることを述べた。

## 7. 結 論

本論文では、機能的電気刺激（FES）による体幹運動制御のための基礎研究として、刺激パターン生成のための基礎的知見を得るための、体幹動作中の筋活動電位の解析、及び、体幹制御に利用可能な高機能FESシステムの開発に関する研究を行った。

本論文で行った検討の結果により、FESで体幹運動機能の再建を行うための、動作達成に関する筋の作用が明らかになり、適切な刺激パターン作成のための手法が考案され、また、高機能の刺激システムが製作された。この論文から得られた結果を反映させることにより、FESによって、体幹の運動機能の再建が実現するものと思われる。

## 審査結果の要旨

末梢の神経筋系に対して電気刺激を印加し、運動機能麻痺者の動作を再建するのが、「機能的電気刺激」(FES)である。高齢化社会では、寝たきりの問題に対して体幹運動機能の再建が有力な解決法として期待されているが、この分野へのFESの適用は未だ行われていない。本論文は、FESによる体幹運動制御の基礎研究として、刺激パターン生成の知見を得るための、体幹動作中の筋電図の計測と解析、及び、体幹制御に利用可能な高機能FESシステムの開発に関する研究の成果をまとめたものであり、全編7章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、体幹運動の制御を考察する上で関連する、FESにおける刺激パターン制御方式、刺激装置、体幹筋骨格系、並びに下半身麻痺者の姿勢保持のためのFES等について述べ、本研究の位置づけを明らかにしている。

第3章では、体位変換動作中の筋電図を多チャンネル同時計測し、解析した結果を述べている。これにより、各筋の活動状態の推移、及び筋群の協同関係がはじめて明らかになった。さらにこれまでに知られていなかった腸腰筋や腰方形筋といった深層の筋の活動をも解析し、筋群活動の特徴を抽出することができた。これらは、極めて重要な知見である。

第4章では、任意の動作の刺激パターンを容易に作成できる手法の提案を行っている。また、対象動作に関する筋の重要度の評価関数として変動係数を提案し、それに基づいた体幹の筋電図の解析を試みている。そして、小振幅の信号であっても重要度を適切に評価できることを確認し、本法が有効であることを述べている。

第5章では、体幹の運動機能再建を実現する高機能FESシステムの開発について述べている。特にマン・マシン・インタフェースについて新しい感覚フィードバック方法や、従来使われていない耳介動作の利用法などの斬新な提案と具体的な検討を加えていることは注目される。

第6章は考察であり、これまでの結果を踏まえて、FESによる麻痺者の運動機能の再建方法について、体幹動作実現を中心に、述べている。また機能再建におけるFESとそれ以外の機器を用いる方法との比較検討を行い、FESの特徴を明確にしている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、FESで体幹運動機能の再建を行う際の、刺激パターン作成のための有用な知見をまとめ、さらに新しい手法を提案したものであり、生体電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。