

氏名	ふるせ のりお	古瀬 則夫
授与学位		博士(工学)
学位授与年月日		平成11年3月25日
学位授与の根拠法規		学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称		東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻
学位論文題目		2次元刺激データを有する機能的電気刺激システムの構築に関する研究
指導教官		東北大学教授 星宮 望
論文審査委員	主査	東北大学教授 星宮 望 東北大学教授 松木 英敏
		東北大学教授 阿部 健一 東北大学助教授 二見 亮弘

## 論文内容要旨

障害者の失われた機能の再建・補助を行う機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation, FES)は、近年特にLSI回路技術の発展と極めて断線率の少ない優れた生体用の経皮電極が開発されたことから、上肢・下肢の運動機能の再建・補助に用いられるようになった。星宮・半田らによって開発され、市販されている臨床用の多チャンネルFESシステムでは、健常者の多チャンネル筋電図解析から得られた多チャンネル刺激データをあらかじめシステムに登録しておき、呼び出して被刺激筋に与えることにより麻痺肢の動作再建を実現している。この刺激データは、システム内の1次元のアドレスにより規定されるメモリに格納されており、そのアドレス上でポインタを1次元的に移動させることにより刺激電圧を選択して動作再建に用いられている。そのため、従来のFESシステムでは、再建される動作が筋電図計測時に参照した動作に限られ、再建動作中に動作軌道を変更することは困難である。しかしながら、複数の刺激データと再建動作との間に関連性を見出し利用できれば、再建動作中に肢位や動作軌跡の変化が考慮可能になり、健常者における少ない動作筋電図解析からより多くの種類の動作を再建することが可能になると考えられる。

そこで、本研究では、動作再建のために各筋に与える刺激データの基となる標準刺激データを、直接的に目的動作の筋電図から生成するのではなく、あるパラメータ(例えば、関節角度)を変えながら、同一の動作の筋電図を測定し、それら筋電図間に線形補間を施すことにより筋電図マップ(筋活動指標の分布)を生成し、そのマップの筋電振幅を標準刺激電圧に変換し、パラメータと動作時間とを各々システムのメモリアドレスに対応させ、肢位や動作軌跡の変化を考慮可能な2次元標準刺激データを生成することとした(図1)。そして、C4四肢麻痺者に対して有効と考えられる肩関節を能動型装具(FESとの併用を前提とした動力補装具)で再建し、肘関節より遠位の関節をFESで再建する上肢ハイブリッドFESを想定したFESシステムにおいて2次元刺激データを用いることの有効性を検討した。

その2次元刺激データの有効性を検討するため、肩関節角度をパラメータとした肩関節固定時の肘関

筋屈曲動作時の筋電図と、能動型装具で肩関節を屈曲動作させたときの肘関節屈曲動作時の筋電図を健常男性3名において各々計測した。それら筋電図を解析した結果、肩関節動作時の肩関節屈曲角度の軌跡を基にして筋電図マップから生成した肘関節屈曲動作時の筋電図波形（Interpolated EMG, IPEMG）が、実際に肩関節を動作させながら計測した肘関節屈曲動作時の筋電図波形（Recorded EMG, REMG）をより良く近似しうることがわかった。そのIPEMGとREMGとを比較した結果の一例を図2に示す。このことから、ハイブリッドFESによる麻痺上肢の動作再建において、2次元標準刺激データを用いることは、肢位の変化による重力負荷の影響等を考慮可能にし、健常者における少ない動作筋電図解析からより多くの種類の動作を再建する可能性を有することから、現在FESで用いられている1次元のアドレスに対応させた標準刺激データを用いるよりも有効であることを示した。

現在のFESシステムでは、異なる動作速度の動作を再建する場合、システム内のメモリアドレス上のポインタの移動速度を変化させることにより対応している。この手法は、同一動作軌跡で計測した筋電図の波形が動作速度に依存しなければ妥当であると考えられる。しかし、一般に筋電図は動作速度に依存すると考えられ、2次元刺激データを有するFESシステムにおいても筋電図を基にした刺激データを用いていることから、刺激データの適用動作速度範囲が問題になる可能性があると考えられる。そこで、各々異なる動作速度において計測した肘関節屈曲動作時の筋電図波形の相違を調べた。その結果、本実験での動作条件においては、実用的な動作速度(36.7[deg/sec])と十分に遅い動作速度(12.2 [deg/sec])での筋電図波形には大きな違いはなく、実用的な動作速度を上限とする速度範囲においては、単一の標準刺激データで再建動作の速度変化に対応することが可能であることを示した。このことは、動作筋電図に基づく標準刺激データを用いたこれまでの上肢FESシステムの妥当性を支持するものとも言える。

ところで、従来のFESシステムでは、刺激データの1次元のアドレス上のポインタを移動させることにより刺激電圧を選択して、麻痺肢の動作再建を実現している。しかし、2次元刺激データを有するFES

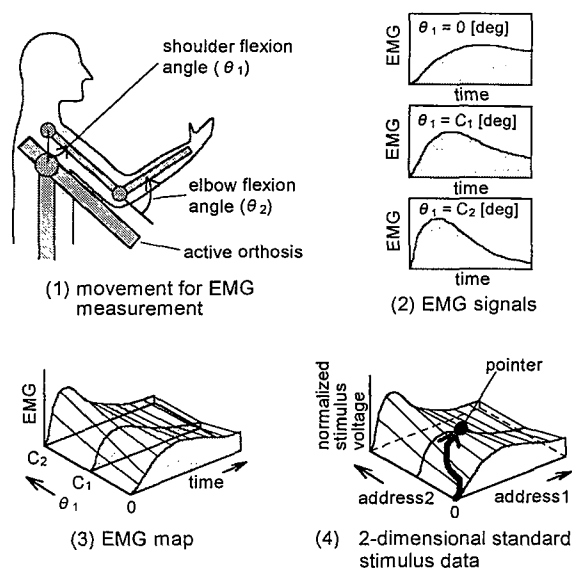


図1 2次元標準刺激データの生成手順

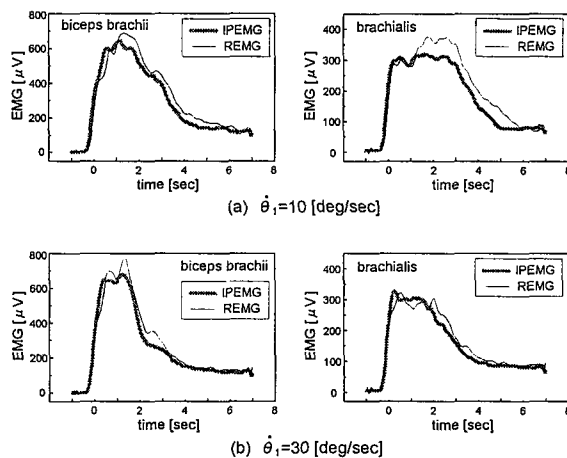


図2 2次元標準刺激データの生成手順に基づいて補間生成した筋電図波形（IPEMG）と、実際に装具を動作させ計測した筋電図波形（REMG）との比較

システムによる動作再建において、2次元刺激データの2次元のアドレス上のポイントをリアルタイムで2次元的に移動させることは、1次元のアドレス上のポイントを移動させることを前提にした従来のFESシステムの制御命令入力方式では、十分に対応できないものと考えられる。そこで、本研究では、主に脊髄損傷により上肢と下肢が麻痺したC4～C6四肢麻痺者に対して、2次元刺激データを有するFESシステムを使用する上で、より使い易い入力インターフェイスを提供するため、新たな制御命令入力システムを構築することを検討した。そのFESシステムが必要とする制御命令としては、リアルタイムの位置制御などに用いられるアナログ量と、各種のコマンドが考えられる。

本研究では、運動機能麻痺者の残存運動機能を3次元位置測定装置により直接的に認識し、それら制御命令入力システムの制御命令源として用いることとした。そこで、3次元位置測定装置により測定したうなずき動作と急激な肘関節屈曲動作をニューラルネットにより認識することを、健常男性3名とC5-6四肢麻痺者1名に対して試みた。その結果、ニューラルネットによりそれら動作の認識が十分可能であり、このことから、FESシステムによる麻痺肢の動作再建において、うなずき動作などの特徴的な動作を特定コマンドの入力に用いることや、複数のコマンドを入力する場合の選択されたコマンドの確定に用いることが可能であることが示唆された。

C4～C6四肢麻痺者の場合、上肢の動作の再建がFESの対象となる場合が多いので、頭部動作が制御命令源として考えられる。そこでFESシステムにおけるコマンド入力の評価として、頭部動作による文字入力実験を行った。この文字入力は、頭部位置変位により文字を選択し、うなずき動作によりその文字を確定することにより実現される。健常男性4名とC5-6四肢麻痺者1名に対して文字入力実験を行った。その結果、いずれの被験者においても十分な文字入力の性能を示したことから、複数のコマンドを素早く入力することのできるコマンド入力システムを構築することが十分に可能であると考えられる。そして、この文字入力においてはディスプレイに2次元的に配置された小さな文字セルを、頭部動作によりポイントを移動させ選択できたことから、運動機能が限られた麻痺者でも、3次元位置測定装置で計測される頭部の前後屈、回旋などの動作を用いて、2次元刺激データを有するFESシステムによる麻痺肢の動作再建において、2次元刺激データの2次元のアドレス上のポイントをリアルタイムで移動させることができると考えられる(図3)。さらに、C5-6四肢麻痺者固有の残存運動機能(机上上肢動作)を活用した文字入力実験を行い、本研究で構築した制御命令入力システムを、FESシステムのみならず各種福祉機器の制御命令入力として用いる可能性を示した。

そして、これらの結果を踏まえて、2次元刺激データを有するFESシステムの臨床適用の実現のために必要となる研究課題などを考察した。本論文で得られた結果を、現在のFESシステムに反映させることができれば、FESシステムの制御性と操作性を改善できるものと期待される。

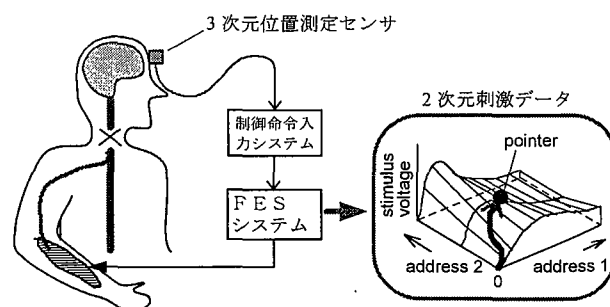


図3 頭部動作を用いる制御命令入力システムの2次元刺激データを有するFESシステムへの適用

## 審査の結果の要旨

機能的電気刺激（FES）は、中枢神経障害などによる運動麻痺に対して有効な機能再建などを可能にする新しい手法として、最近、臨床的に用いられている。実用化されている FES システムで再建される動作は、刺激データを作成するために参照とする筋電図計測をおこなった動作に限られる。著者は、健常者の数少ない動作中の筋電図から複数の動作を再建可能にする 2 次元刺激データを作成する新しい方式を考案し、このデータを用いることの有効性を示した。また麻痺患者の残存機能を活用する新しい制御命令入力システムを提案し、高機能 FES システムの実現に重要な成果を得ている。本論文は、これらの研究成果についてまとめたもので、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。第 2 章では、本研究の背景と関連した知見について述べている。

第 3 章では、測定条件の異なる複数の筋電図から補間生成した 2 次元刺激データと、実際に動作させ計測した筋電図波形とを比較して、上肢ハイブリッド FES において 2 次元刺激データを用いることの有効性を示している。また、異なる速度の動作を再建する場合でも基本的に単一の刺激データで対応できることを示している。これは FES システムの制御アルゴリズムの単純化が可能であることを示しており有用な成果である。

第 4 章では、四肢麻痺患者のための制御命令源について考察し、うなずき動作などが利用可能であることを示している。うなずき動作をニューラルネットにより認識する実験と、頭部動作による文字入力実験とから、障害レベルが C4～C6 の四肢麻痺者でも、頭部動作を用いて 2 次元刺激データをリアルタイムで出力することや、各種のコマンドを入力することができることを示している。これは高機能 FES システムを操作する上で重要な成果である。

第 5 章では、全体的な考察として、2 次元刺激データを有する FES システムを臨床的に実現させるための研究課題について述べている。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、複数の動作の再建を可能にする 2 次元刺激データを用いた補間方式と、麻痺患者の残存運動機能を活用する新たな制御命令入力方式を導入することにより、上肢 FES システムの制御性と操作性を改善できることを示しており、医用電子工学と福祉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。