

研 究 成 果

サブテーマ名： 小テーマ名：	(1)インテリジェントF E Sによる生体機能再建システムの開発 - e 計算論的アプローチによるF E S制御方式の開発 (1)-2-a インテリジェントF E Sシステム基盤技術の開発 筋骨格系モデリングとフィードバック制御、身体装着型 安定評価システムの開発、計算論的アプローチによるF E S制御方式の開発	フェーズ、 フェーズ フェーズ
サブテマリーダー 研究従事者	東北大学大学院工学研究科 東北大学大学院工学研究科 財団法人みやぎ産業振興機構	客員(共同)研究員 客員(共同)研究員 派遣研究員 二見亮弘 二見亮弘 大庭茂男
研究の概要、新規性及び目標		
<p>研究の概要</p> <p>運動に関連する筋・骨格系のモデリング、それに基づく望ましいF E S制御方式の開発、および患者での実用的な制御方式の開発を行った。同様な制御方式を適用可能で、より扱いやすい上肢運動についても、モデリングと制御方式開発の対象とした。制御方式としては、フィードバック制御とフィードフォワード制御の利点を併せ持つフィードバック誤差学習の導入などを進め、制御遅れの低減、精度や頑健性の向上、刺激調整時間の短縮などを目指した。さらに、これらの成果を患者の起立・歩行制御に適用して、センサ情報を利用した制御方式の試験を行い、実用的な制御結果が得られることを確認した。臨床F E Sに直接寄与する成果としては、開ループ制御と閉ループ制御の比較検討、姿勢計測用傾斜角度センサシステムの開発、不全片麻痺患者の適応的F E S歩行制御方式の開発などがあげられる。</p> <p>研究の独自性・新規性</p> <p>対麻痺患者の歩行制御への適応・学習機能の導入、姿勢計測用の簡便かつ高精度な統合型センサシステムの開発、フィードバック誤差学習の臨床応用による制御遅れの改善は、本研究独自のものであり、従来の研究には見当たらない。</p> <p>研究の目標</p> <p>フェーズ インテリジェント制御のための要素技術を確立する。</p> <p>フェーズ 対麻痺患者等で「起立・立位保持・歩行器を使用した数歩の歩行」のより良い運動機能再建をフィードバック制御の導入によって可能にすることを期間内の目標として、その実現に必要な制御対象のモデリング、モデルによる制御方式の比較検討、実用的なセンサシステムの構築、および、提案する制御方式の臨床評価を目指した。</p>		
研究の進め方及び進捗状況		
<p>フェーズ 制御対象の理解と表現に関して痙性の発生への過剰な伸長反射の関与に着目し、救心性の a 繊維から脊髄運動ニューロンへの結合を減弱させて痙性を低減する方法について、健常者で検討した。</p> <p>フェーズ 目標としてあげた起立・立位保持・歩行の実現のために、その各種基盤技術と臨床応用テストを行った。具体的には、シナプス長期減弱により痙性を低減するための脛骨神経刺激、多チャンネルの刺激時系列の決定に関する最適化規範の検討、非周期的電気刺激パルスに対する筋・神経系の応答の検討、F E Sによる完全対麻痺患者の立位保持制御、足関節角度のF E S帰還制御、上肢モデルによる開ループ制御と閉ループ制御の比較検討、姿勢計測用傾斜角度センサシステムの開発、不全片麻痺患者のF E S歩行制御方式の開発、フィードバック誤差学習法による制御の遅れの改善について研究を実施した。これらによって、2003年8月下旬の時点において、脊損による対麻痺患者に対して、滑らかな起立、長時間の安定した立位保持をフィードバックF E S制御によって可能にした。歩行に関しては、表面電極を用いた股関節屈曲において原理的な困難がある患者が多いので、引き続き検討と試験を進めている。</p>		
主な成果		
<p>具体的な成果内容：</p> <p>多チャンネルの刺激時系列の決定に関する最適化規範の検討に関して、脳における運動制御についての知見を元にした合理的な計算手法を開発することを目標として、上下肢の制御にあたって存在する不良設定問題を解決するため、ジャーク最小規範、トルク変化最小規範、意図したトルクの変化最小規範、運動指令変化最小規範などをF E S制御に適用することを検討し、新しい刺激時系列決定方法として制御対象の初期姿勢と最終姿勢および必要なら経由点に関する条件を制約条件として用い、刺激振幅変化速度の2乗積分値を最小化するという簡便な最適化の規範を提案し、その有効性をモデルで確認した。</p>		

電気刺激パルスに対する筋・神経系の応答をモデルで検討し、運動単位が有する Catch-like effect などの強い時変特性と疲労特性の発現機構を定量的に明らかにし、最適な電気刺激を選ぶための新しい微視的な筋モデルを提供した。

傾斜角度計測のもつ不要な感度を除去して実用的な姿勢計測を可能にするために、マイクロマシーニング技術で作製された比較的遅れの小さい市販の傾斜角度センサと、市販の角速度センサ（ジャイロ）を用い、それぞれの出力信号とそれらに1次遅れや1次進みの伝達関数を数回かけた信号の線形和で傾斜角度を推定する方式を開発した。線形和の結合荷重は、推定された傾斜角度から計算される関節角度と、別途ゴニオメータで計測された関節角度の間の2乗誤差を最小化するように、最適化アルゴリズムを用いて決定し、実用上十分な精度が得られることを明らかにした。

足底圧センサによる踵接地情報を使った“Rule-Based”制御により、片麻痺歩行のFES制御が行われてきたが、多くのパラメータを患者が自分の意志で調節することが困難であるという問題があった。この問題を軽減することを目的として、我々は調整すべきパラメータを各チャンネルについての一定刺激振幅、刺激開始時刻、刺激継続時間だけに絞って調整を単純化し、それらを医師が調節することを容易にする方法を試みた。患者にこの方法を適用して歩行制御を行ったところ、簡単なパラメータ調整のあとで歩幅と歩行速度の改善がみられ、患者による評価も高かった。

速い目標軌道に対するフィードバック制御の遅れの問題を改善するために、フィードバック誤差学習法を用いたFES制御器について検討し、手関節の掌背屈方向1自由度往復運動を2筋（ECRL/ECRB, FCU）刺激により制御するシミュレーション実験、並びに健常被験者を用いた刺激実験を行った。その結果、現実的な繰り返し回数で前向き制御器が学習でき、周期2sの速い目標軌道に対して遅れ量の少ない良好な制御結果が得られることを確認した。シミュレーションによりあらかじめ学習した順モデルとIDMを用いることが学習回数の低減に有効であった。

特許件数：1件

論文数：1件

口頭発表件数：

研究成果に関する評価

1 国内外における水準との対比

先に記述した研究成果はすべて国内外を通じて新規性のあるものである。しかし、目標の中にあげた「表面電極による歩行の制御」に応用するためには、国内外の研究者に共通する「乗り越えるべき問題点」としての股関節屈曲（大腿持ち上げ）の問題があり、歩行制御の幅広い臨床応用を困難にしている。これを医学的に改善できる手法が見出されれば、本研究の成果がより有効に応用に寄与できると考えられ、世界的にも高レベルの臨床応用が実現できる。

2 実用化に向けた波及効果

本研究で有効性を明らかにしたフィードバック誤差学習の導入による前向きFES制御と、統合型センサシステムによる姿勢制御方式は、下肢FES制御に限らず、種々のFESによる運動機能再建において有効であると考えられ、高い波及効果が期待できる。

残された課題と対応方針について

表面電極による股関節屈曲制御が困難である問題については、今後、体内埋め込み型FES装置の開発や、膝屈曲のトルクを股関節屈曲に変換する装具の開発などを進めることにより解決可能であると考えられる。これらについてさらに検討と臨床試験を進める予定である。

	J S T 負担分 (千円)							小 計	
	H10	H11	H12	H13	H14	H15			
人件費	1,846	9,132	13,823	5,031	2,880	1,320	34,032		
設備費	1,793	8,648	20,310	7,698	3,148	0	41,597		
その他研究費(消耗品費、材料費等)	2,052	2,220	1,611	1,825	4,045	772	12,525		
旅費	1,234	1,334	2,573	411	299	215	6,066		
その他	22	769	1,515	206	80	52	2,644		
小 計	6,947	22,103	39,832	15,171	10,452	2,359	96,864		
	地域負担分 (千円)							小 計	合 計
	H10	H11	H12	H13	H14	H15			
人件費	1,200	0	0	0	0	0	1,200	35,232	
設備費	0	0	0	0	0	0	0	41,597	

その他研究費(消耗品費、材料費等)	0	0	0	0	0	0	0	12,525
旅費	0	0	0	0	0	0	0	6,066
その他	0	0	0	0	0	0	0	2,644
小計	1,200	0	0	0	0	0	1,200	98,064

代表的な設備名と仕様 [既存 (事業開始前) の設備含む]

J S T 負担による設備 :

- ・ 研究用 F E S 制御 P C
- ・ 多チャンネル高電圧表面電気刺激装置
- ・ 筋・骨格系モデル計算用ワークステーション
- ・ 恒温恒湿型シールドルーム

地域負担による設備 :

複数の研究課題に共通した経費については按分