

# 学位論文審査の要旨

学位申請者	石 磊
論文題目	Study on Control System of Lower Extremity Exoskeleton Rehabilitation Robot Based on Neuromusculoskeletal Model 神経・筋肉・骨格モデルに基づいた下肢リハビリロボット制御システムの研究

審査（試験・試問）委員会

主 査 教授 劉 震

委 員 教授 日當 明男

委 員 教授 谷山 紘太郎

委 員 教授 石松 隆和

(長崎大学大学院工学研究科)

委 員 教授 下島 真

## 〈論文審査の結果の要旨〉

高齢化が進む中、脳血管障害や転倒による肢体障害を受けた場合、失った機能を回復し自立した生活が行えるようになるために、神経・筋肉・骨格モデルに基づいた下肢リハビリロボット制御システムについて研究した。

**第1章 序論** では、研究の背景、従来の研究、本研究の目的及び本論文の構成について述べた。

**第2章 下肢リハビリロボットシステムの提案** では、リハビリに関する回復原理と治療法を簡単に紹介した上で、下肢リハビリロボットシステムを提案した。本ロボットシステムは4つの部分、すなわち基本フレームシステム、縄システム、制御システムと着用型外骨格ロボットシステム（Exoskeletons Rehabilitation Robot（以下 ERRobot で書き））で構成する。

(1) 基本フレームシステム:全システムの骨組みで、他のサブシステムを支えている；

(2) 縄システム：①患者を吊り上げて、重量負荷を低減して、訓練ができる；②座りと立ち姿勢の転換に使われる；③患者の重心を調節し、患者のバランス練習にも完成できる；

(3) 制御システム：①システムのサブモジュールを協調制御する；②フィードバック信号を表示する；③患者の回復の度合いに基づいて、リハビリ訓練を設置・更新する；

(4) 着用型外骨格ロボットサブシステム（ERRobot）：訓練運動中、患者自分からの筋力提供が不足する時、ERRobot からのアシストができる。これは直接患者と接触するから、全体システムの一番重要な部分と見なしている。

**第3章 下皮膚表面筋電信号とデータ処理** では、筋電位(Electromyogram(EMG))信号および処理方法を詳述した。本研究では、皮膚表面筋電（s EMG）信号を用いて、下記のことを利用する。(1) 神経モデルの代わりに人間の動き意図推定システムの構成；(2) 定量的評価システムの構成；(3) 動作パターンの認識。

本研究は、新たな s EMG 分割方法 P & WND（Peak Analysis and Non-equi-distant Window）を提案した。信号のピーク情報と移動ウィンドウ関数などを利用している。この方法を検証するため、三つの下肢運動（ウォーキング、ランニング、ジャンピング）を選んで、サポート・ベクター・マシン（SVM）方法を利用して計測した s EMG を解析し、この三つの下肢運動の認識を行う。この方法は、今までよく使っている方法 Di Fabio と比べて、データの分割精度がよくて、動作認識の精度も上がったが分かった。また、本章で「振幅標準化」方法を介して、筋肉モデルの開発に要する神経興奮を表す信号を導出した。

**第4章 筋-腱数理モデルの構築** では、「筋」と「腱」を整体にして、数理モデル（Muscle Tendon Complex (MTC)）を導いた。MTC モデルの入力信号は神経興奮を表す s EMG 信号で、出力は筋力である。この出力を人体骨格系の数理モデルの入力として、人体筋骨格全体システムに対し運動学と動力学モデルを構築する。開発したモデルに対し Matlab/Simulink を使って、Winters(2000)らに定義された筋肉テストから三つのテストを選んで、シミュレーションを行った。O' Brein らの研究結果（2006）と比べ、本筋肉数理モデルの有効性が検証できた。

また、s EMG 信号と筋肉活動の関係を探究した。実験によって s EMG と下肢関節運動信号と同期的に得られ、Mokka0.6.2 と Matlab を用いて、下肢関節運動に役に立つ筋肉は、大殿筋、大腿筋、大腿直筋、大腿二頭筋（長頭）、前脛骨筋とヒラメ筋であることが分かった。

**第5章 ヒューマン・ロボットシステムのモデル構築** では、人体骨格の生物力学モデルとロボットシステムを整体にしてモデルを構築した。この中、ロボットは力の形で人体の生物力学モデルの構築に参加する。本研究に使われる人体下肢骨格の生物力学モデルは、人間3次元全身運動分析用の多剛体リンクモデルLS-DHM (Linked Segment Digital Human Model)を開発した上で、自由度簡素化方法を通して獲得した。開発した骨格モデルLS-DHMは19のリンクおよび46のDOFsがあった。

ヒューマン・ロボットシステムのモデルの下に、制御システムを開発するため、筋肉、床、ロボットなどの力を分析し、運動学・動力学分析モデルを導いた。

**第6章 NMSに基づいた制御システムの提案と検証** では、人体の筋骨格モデルを研究・構築した上で、sEMGを利用して、「着用型外骨格ロボット」に意欲的に訓練できるような知的制御システムを研究・開発した。本研究は3階層構造の制御システム(上位制御システム、中間転換システム、下位制御システム)を提案した。下位制御システムは直接にロボットのドライバの制御に参加するコントロール・システムである。このコントロールに使われるコマンドはユーザー動作の意図に応じて、上位制御システムからの生成と中間転換システムの変換した後、転送される指令値である。

上位制御システムの中、三つの重要な部分は下記のとおりである。

(1) 意図の推定モジュール (Motion Intent Parse (MIP))

sEMG信号を計測し、神経興奮量生成した後、筋肉激活ダイナミクス用の入力準備しておき;装着者当時の運動状態から、興味がある筋肉の長さや速度を求め、得られた神経興奮信号と一緒に筋-腱系(MTC)数式モデルに導入し、筋力あるいは筋トルクが計算され;順動力学分析モデルを介して、現在装着者の動作意図が解析する。

(2) リハビリ評価システム (Rehabilitation Assessment System (RAS))

今まで下肢運動機能回復の評価は、殆ど主観的であるが、本研究は、定量的な評価方法を提案した。評価方法の検証は治療師と一緒にしなければならないが、本論文は理論方法だけを提示した。評価方法には、二つの新たな概念、「健康帯 (Health Belt)」と「健康評価指数 (HAI (Health Assessment Index))」を導入した。そして、関節の外在表現と運動に関する筋肉のパフォーマンス情報を総合して下肢の回復の度合いを計算する。

(3) 運動軌跡の計画-Motion Planning Module(MPM)

有限状態機械(Finite State Machine(FSM))の中のスイッチシステムはMPMの実行に引き込んでいる。歩行訓練を例として、Matlab/Simulinkを用いてシミュレーションをして、運動計画モジュールの有効性を示した。なお、下肢膝関節の運動訓練で、提案した下位制御システムの有効性も検証した。

**第7章 総括と今後の課題** では、本研究で得られた主要な結論を取りまとめた。また、今後の研究について提言した。

本研究は、下肢不自由な方々に日常生活における機能障害や能力低下からの回復を目指し、下肢リハビリロボットシステムを提案した上で、「外骨格ロボット」に対して意欲的に訓練できるような知的制御システムを研究した。このシステムに人体の「神経・筋肉・骨格」の数理モデルを構築し結び付けられている。このモデルと結合すると、人間のように自然に任務動作の実行をコントロールできて、情報処理の時間遅延も減らすことができる。

(1) sEMG信号処理に関して、信号のピーク情報と移動ウィンドウ関数を利用して一つ新しい精度よくsEMG分割方法P&WND (Peak Analysis and Non-equidistant Window)を提案した。(2)筋骨格の数式モデルを研究・構築したうえでHuman-ERRobotシステムの運動学と動力学分析モデルを導出しました。この中、実験を通して、下肢関節運動に関連する筋肉を決定した。(3)表面筋電信号を利用して人間の意図に基づく自由に外骨格型ロボットをコントロールできるような制御システム、すなわち自然な感覚で操作可能なヒューマン・マシンインタフェースを構築した。この中、いくつかのモジュールすなわち装着者動作意思の推定モジュール (Motion Intent Parse (MIP)、リハビリ評価-Rehabilitation Assessment System (RAS)、運動軌跡の計画-Motion Program Planning(MPP)などを研究・開発しました。(4)シミュレーション方法を利用して、提案した方法、機能モジュールを検証し、有効性が分かりました。

これからも、ユーザーに満足できるようなリハビリシステムを提供できるように努力しに行く。これから下記のことに取り組んでいきたい。(1)下肢麻痺患者本人が簡単に使用できる操作系を構築する;(2)コンパクト化、低コスト化などに力を入れる;(3)本システムの改善とリハビリロボットとしての有効性を実機に行う。

〈試験 (試問) の結果の要旨〉

学位請求の論文、ならびに関連分野に関する学識についての試問を行った結果、博士(工学)の学位を受け取るに十分な学識を有していること、審査(試問)委員全員の一致により認められた。