

# 学 位 論 文 要 旨

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に関する研究

氏 名 石 磊

2015年、日本は総人口に占める65歳以上の高齢者は25%（4人に1人が高齢者を超え、本格的な超高齢社会（老年人口割合が21%を超える社会）となった。肢体不自由者については、2010年日本に281.8万人がおる。高齢化が進む中、脳血管障害や転倒による肢体不自由などにより、介護やリハビリが必要とする高齢者が増えてくることが予想されている。これらの障害を受けた場合、失った機能を回復し自立した生活が行えるように下肢リハビリロボットの開発が進められている。本研究もこのような背景で提出した。

**第1章 序論** では、研究の背景、従来の研究、研究の目的、ならびに本論文の構成について述べた。リハビリを必要とする人の増加とリハビリの現状から見ると、新しいリハビリ手段の開発が必要となっている。本研究は、もっぱら「下肢不自由な方々のリハビリ支援、機能障害からの回復を目指し、生活質の向上と維持をはかる」ことを目的として下肢リハビリロボットに関する研究・開発を進んでいる。肢体不自由人達に自立生活ができるようになり、未来予想される医者が不足する問題の解決に役立ったりすると考えている。

**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、主に提案した下肢リハビリロボットシステムについて紹介した。本システムは運動学習理論を利用して、失われた下肢運動機能を回復する。本ロボットシステムは大きく分けて4つのパート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））で構成されている。

（1）基本フレームシステム：全システムの骨組みだから、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、全体システムが一番重要な部分と見なしている。以下の内容は主にERRobotに使われる制御システムの研究・開発を行う。

**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。EMGとは、骨格筋が収縮する際に神経を伝わって大脳から届いた運動指令により、筋線維を構成する細胞の内外に生じる電位差の時間変化だ。現在2種類のEMGがある。本研究では、その中の皮膚表面筋電 (sEMG) 信号を選んだ。sEMGは皮膚表面に貼り付けた電極により活動電位を測定するものだ。電極下の筋の多数の運動単位の活動電位が時間的・空間的に加算され、対象とする筋の活動を大まかに把握する場合や、運動パターンを解析するのには適している。本研究に、下記のことを利用する。(1) 神経モデルの代わりに使用され、人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、ワイヤシステムME B-2312 (日本光電社製) と無線システムWE B-7000®QP-700H (日本光電社製) を採用してsEMG収集した後、主としてsEMG信号の処理方法を研究した。リハビリロボットを使っている装着者の動作をアシストできるため、ユーザー当時の運動状態はまず認識されなければならない。そのために、本研究に一つの新しいsEMG分割方法P&WIND (Peak Analysis and Non-equi-distant Window) を提案した。これは、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。この提出した方法に検証するため、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sEMG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。

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、数理モデルを導く。ここで筋-腱系 (Muscle Tendon Complex (MTC)) 数理

モデルと呼ぶ。MTCモデルは主に激活ダイナミクスと収縮ダイナミクスから構成される。このモデルの入力信号は神経興奮を表す sEMG 信号で、出力は筋力だ。この出力を後で開発した人体骨格系の数理モデルに加入し、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) 達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。研究者 O' Brein (2006) 達と比べて、本研究で導出した筋肉数理モデルの有効性を検証した。

なお、sEMG 信号と筋肉活動の関係を探究した。これは下肢動作関連の筋肉選択などに役立っている。実験によって sEMG と下肢関節運動信号と同期的に得られてから、Mokka0.6.2 と Matlab を用いて、データを処理した後、下肢関節運動に関係がある筋肉すなわち大殿筋、大腿筋膜張筋、大腿直筋、大腿二頭筋（長頭）、前脛骨筋とヒラメ筋が獲得した。

**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、モデルを創立する。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の獲得については、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 がある。そして、本研究に採用した3次元下肢筋骨格運動に関する筋肉が、実施した実験で決定した。

ヒューマン・ロボットシステムのモデルを得た後、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能制御システムを研究・開発した。このために、本研究が3階層構造の制御システム（すなわち上位制御システム、中間転換システムと下位制御システム）を提案した。下位制御システムは直接ロボットのドライバの制御に参加するコントロール・システムだ。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、転送される指令値だ。

本章で、本システムに使われる下位制御システムを簡単に説明した後、主として「上位制御システム」を中心にして研究・構築した。上位制御システムの中、三つの重要な部分は：

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

このモジュールの実行については、まず、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く；次に、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，今現在装着者の動作意図が解析できた。

### (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，主に主観的だから，本研究に定量的評価方法を開発した。提出した方法の実施と検証については，治療師たちと一緒にしなければならないから，本論文で，理論方法だけを提供した。この評価方法を実現するため，二つの新概念すなわち「健康帯 (Health Belt)」と「健康評定指数 (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)) 中のスイッチシステム (図7-5) がMPMの実行に引き込んでいます。

最後に、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，主にシステムを中心部分「外骨格ロボット」に対して意欲的に訓練できるような制御システムを研究・開発しました。他の多くの研究と違って，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，人類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努力しに行く。これを考えて，これから下記のことに取り組んでいきたいです：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。