

学 位 論 文 要 旨

題 目 Research on Clinical Gait Analysis Based on Predictive Assessment for The Exoskeleton Rehabilitation Robot

外骨格リハビリテーションロボットの予測評価に基づく臨床歩行分析に関する研究

氏 名 王 躍 飛

第1章 序論

本論文の背景は、脳卒中などによる下肢運動障害患者の運動神経系を再構築する可能性がある。歩行偏差は、患者の歩行特性を評価するために臨床歩行解析から得られたデータを必要とする。リハビリテーションの初期には、患肢の残存筋力が弱いため、下肢外骨格リハビリテーション (Lower Limb Exoskeleton Rehabilitation, LLER) ロボットによる受動的なトレーニングが必要である。中・後期には、アクティブなトレーニングにより回復を加速させることができる。解剖学的に、歩行周期における膝関節運動は HAMS (biarticular HAMStrings)、GAS (GASTrocnemius) および BFSH (Biceps Femoris Short Head) によって駆動されることを示している。また、膝関節はスイング段階で主に BFSH の影響を受ける。通常、受動的なトレーニング軌跡追跡データは正常な人体歩行計画から得られたため、患者の二次傷害を招き、回復中の患者の快適性が確保できない可能性がある。いくつかの研究が、歩行解析が治療計画を改善できることを示している。臨床歩行情報は、主に筋電信号センサ、モーションキャプチャ法、足圧センサによって取得される。その中、最もよく使われる設備は筋電センサである。LLER ロボットは、主に次の3種類の用途を想定して開発される。1つ目の用途は歩行リハビリテーションである。2つ目の用途は、下肢の運動機能やセンサ機能を失った患者を対象とした人間の運動アシストである。3つ目の用途は、健常者の身体能力を向上させること (筋力増強) である。

第2章 外骨格リハビリテーションロボットフレームワーク

本章では、予測評価に基づく膝関節外骨格リハビリテーションロボットフレームワークの全体構造を紹介し、その用途と機能を述べた。フレームワークには、予測評価モジュールと LLER ロボットコントローラが含まれる。予測評価のモジュールは、フォワード動力学シミュレーションを用いて、患者の病態歩行を再現し、臨床歩行分析を実現する。評価結果は LLER ロボットの期待値としてロボットカスタマイズの軌跡計画を実現できる。その中、歩行周期のスイング段階における BFSH の膝関節への影響と、HAMS、GAS および BFSH の膝関節全体の歩行周期への影響をそれぞれ研究し、病態の迅速な再現を目指してモデルの対応規則を確立した。また、LLER ロボットコントローラに対して、リハビリ前期における受動トレーニングのもとに、重力補償付 PD コントローラ、ロバスタ適応コントローラ、可変パラメータのインピーダンスコントローラを開発した。リハビリ中後期のアクティブリハビリテーションによって、運動想像 (MI) に基づいたマルチモード統合検出モジュールを開発した。運動神経のリモデリングを強化するために、患者の運動イメージの信号を EEG センサにより検出し、ロボットを起動して筋電図の修正を通して完全な歩行周期を遂行した。もちろん、このロボットの歩行サ

イクルは、予測の評価に基づいた臨床歩行分析モジュールにより生成された軌道計画からである。

第3章 リハビリテーションのための受動トレーニングにおける予測評価

OpenSim を用いて、予測動力学モデルを構築した。SCONE を用いて、フォワード動力学シミュレーションを行った。Hill-type を用いて、腱ユニット(MTU)についてモデリングを行い、一つの下肢を表す9個の筋腱ユニットを得た。フォワード動力学歩態コントローラは一つのハイレベルステートマシンと一つの支配法より構成される。膝関節シミュレーションのための90個のコントロールパラメーターはCMA-ES最適化アルゴリズムを用いて最適化された。目標関数は歩行関数である。この方法を用いてスウィン段階の膝関節に対するそれぞれBFSSHの効果と、HAMS、GAS、BFSSHの歩行サイクルにおける膝関節への影響を検討した。弱さと筋痙縮の効果の説明するために、系統的に膝関節骨格モデルに孤立性欠陥を導入し、これらの欠陥による歩行適応を予測するために歩行シミュレーションを作成した。MTUに軽度、中等度、重度の筋力低下または筋痙縮を適用し、自己選択速度で歩行するモデルをトレーニングし、それらの関係を調べた。予測シミュレーションの結果より、重篤な筋痙縮では、非スイング段階はより重度の膝屈曲性とより強い膝トルクを示し、変化の敏感性大きさはGAS>BFSSH>HAMSのことが分かった。スウィン段階では、HAMSとGASの筋痙縮は膝の角度を悪化させ、BFSSHの筋痙縮は膝の角度へ弱い影響を与えることが分かった。軽度のHAMSの筋肉の弱さは歩行速度を加速し、適度で重度のHAMSの弱みはその代わりに歩行速度を妨げた。BFSSH筋の弱さは膝関節トルクにより敏感である。

第4章 マルチモードを統合した運動意図の検出

本章では、マルチモード統合による運動想像(MI)に基づいた人間の意図認識モジュールを開発した。このモジュールをロボットのアクティブトレーニングモードに適用する。このモデルの主な特徴は、a.初歩的な受動トレーニングを経て、患肢の運動神経システムが次第に再建された；b.トレーニング前に、患肢部分の筋肉の活動は回復し、正常な筋肉活動を示すことができる。この場合、MIに基づいたマルチモード統合をした人間の意図の認識モジュールを開発した。このモジュールは、2つの主要な部分から構成されている。一つは、MIに基づいたEEG意図信号収集モジュールで、もう一つはEMGに基づいた運動命令補正モジュールである。ここで、MIに基づいた脳電意図信号取得モジュールは、リハビリテーション前期の受動トレーニングに依存し、有効な脳波を生成し、ロボットを駆動して予めプログラミングされた軌跡トレーニングを行った。また、HMIリハビリテーション視覚装置による患者の脳への持続的な画像情報刺激と組み合わせて、MIの精度が向上された。EMGに基づいたモータコマンド補正モジュールは、活性化が可能な患肢の筋肉領域に固定されたEMGドライ電極センサを含む。EMGセンサを用いて筋活動を検出することにより、脳波の獲得と処理後の意図的な制御命令を修正する。筋電に基づく運動指令補正モジュールは、センサの領域を固定する筋肉がアクティブ化されることは前提とする。人間の意図はEEGより採集と処理後、EMGセンサを介して筋肉のアクティブ化を検出し、矯正する。EEG駆動指令とEMG筋アクティブ化指令が同時に満たされている限り、LLERロボットの制御指令は有効である。そうでなければ、無効な制御コマンドとみなされる。

第5章 LLERロボットのモデリングとコントローラの設計

本章では、下肢リハビリテーショントレーニングにおける受動トレーニングモードに注目し、LLERロボットのコントローラを設計し、開発した。受動トレーニングモードは、LLERロボ

ットによる軌道追跡を行うことにより達成される。予測された軌道データは、第3章の予測評価モジュールの最適化結果から得られた。修正規則に従い、HAMS、GAS、BFSHのパラメータを修正し、筋痙縮と筋無力を生じさせ、対応する膝屈曲パラメータを得て、異なる病態歩行パターンを再現した。この目的を達成するために、まず、hip-knee LLER ロボットの運動学的および動力学的モデルを構築した。次に、重力補償付 PD コントローラを開発し、シミュレーションにより、基本的に股関節と膝関節の軌道追跡を実現できることを検証した。そこで、ロバスト適応 PD コントローラを開発した。このコントローラは、システムの過度の初期トルク出力を除去した。また、外力により乱されたときに速やかにシステムを修正できるという問題も解決した。種々のリハビリテーション段階で異なる影響を受けた四肢と四肢が異なる減衰効果と LLER ロボットからの弾性効果を必要とするリハビリテーションプロセスのために、可変パラメータを持つインピーダンスコントローラを開発した。最後に、異なる患肢と患肢は異なるリハビリテーション段階において、肢体に対してリハビリテーションロボットが異なるダンピング効果と弾性効果を有する必要があるため、可変パラメータのインピーダンスコントローラを開発した。この制御装置は、理学療法士が減衰と剛性値を調整し、リハビリテーションの必要性に応じて必要なダンピング効果と剛性効果を達成し、患肢のリハビリテーション効率を改善した。

第6章 結論

本論文では、LLER ロボットの軌道計画を改善するための予測評価に基づく臨床歩行分析方法を提案した。病理学的歩行を再現するために、予測評価モジュールは、OpenSim を用いて患者の診断結果に従ってシミュレーションモデルを確立し、SCONE を用いて予測シミュレーションを実現しました。最適化の結果は、LLER ロボットが軌道計画を実行し、カスタマイズされたトレーニングシナリオの目的を達成するために用いられる。次に、クイックモデリングのために、膝関節のモデル修正ルールを確立した。初期リハビリの受動的トレーニングモードを実現するために、重力補償を備えた PD コントローラ、ロバスト適応 PD コントローラ、および可変パラメータ付きインピーダンスコントローラを開発された。リハビリテーションの中期から後期までのアクティブトレーニングモードのため、マルチモーダル統合を備えた MI に基づくロボット制御方式を開発した。今後、予測モデルの各 MTU の歩行サイクルへの影響を検討し、修正規則の完全なライブラリを確立する。さらに、LLER ロボットを完成し、大量の実験を介して、コントローラのパラメータを調整する。