

2022年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	体幹部制御を特徴とする免荷機能付き歩行訓練装置の研究 ー再生医療時代へ向けてー
キーワード	① 歩行訓練装置、② リハビリテーション、③ 動作制御

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	ヒコサカ ジュン 彦坂 潤
配付時の所属先・職位等 (令和4年4月1日現在)	豊橋創造大学 保健医療学部・助教
現在の所属先・職位等 (令和5年7月1日現在)	豊橋創造大学 保健医療学部・助教
プロフィール	2012年豊橋創造大学リハビリテーション学部理学療法学科卒業。 2012年4月より医療法人宝美会総合青山病院にて理学療法士として勤務。 2017年豊橋創造大学大学院健康科学研究科修了(健康科学修士)。 2018年9月豊橋創造大学保健医療学部理学療法学科助手、 2021年9月同助教。

1. 研究の概要

本研究では、歩行中の身体状態をリアルタイムに推定し、同時に装置へ所定の運動を指令し、歩行介助を実現する歩行リハビリ装置を開発する。そのために、ハーネスを用いて体重を免荷した状態での歩行練習(以下、BWSTT)におけるモータの運動を期待通りの歩行介助に繋げる機構を作成する。初めに、ソフトウェア上において歩行アシストのシミュレーションを行う。具体的には、歩行時の運動や姿勢などの情報からコントローラの指令と適切な歩行介助方法を決定し、シミュレーション上において身体状態に対する適切な歩行介助を実現する。これによりワイヤの牽引力など必要な機能が明らかになる。次に、身体の各部位へ装着した加速度センサからの情報と床反力のデータから身体運動力学モデルを組み立て、身体の姿勢や脚への負荷量などの推定をリアルタイムに行う。また、推定された身体状態をもとに、歩行介助を適切に行うためのモータ運動を決定するとともに、モータを動かす指令システムを作成する。その後、トレッドミル上での歩行動作について身体状態推定および動作アシストの精度検証を実施し、制御システム全体の調整を行う。体幹部制御を行う装置を製作し、4本のワイヤと5個のモータによって体幹部に装着するハーネスの運動を制御する。

2. 研究の動機、目的

近年、iPS細胞などを用いた再生医療に関する研究が進んでいる。これまで著明な回復が望めないとされてきた脊髄損傷やパーキンソン病、脳卒中などの中枢神経疾患に対しても、再生医療を受け、症状の改善を目指す患者数の増加が予想されている。しかし、中枢神経疾患に対する再生医療の治療対象は、障害されている神経機能のみである。患者の主な希望は歩行動作が可能になることである。日常生活における歩行動作の獲得には神経機能の改善に加え、筋力、バランス能力、全身持久力など多くの能力の改善が不可欠である。また、実用的な歩行の獲得のためには、適切な重心移動を伴いながら、頻回・長時間・多歩数の歩行練習が必要である。つまり、再生医療を受け、神経機能が回復した患者が再び歩行を獲得するためには、適切なアシストを伴う十分な量の歩行練習の実施が求められる。

一方、重度の中枢神経疾患患者は歩行練習の際に外部から大きな力で身体を支える必要があり、人力での歩行練習は介助者への負担が非常に大きい。これにより、歩行練習の時間や距離が不十分になることや、介助者の疲労による歩行アシストの精度低下が起こる可能性がある。その結果、非効率的な歩き方の学習や、歩行練習中の転倒に繋がり、歩行の再獲得が困難になる恐れがある。

以上の問題を解決するために、本研究では再生医療実施後の中枢神経疾患患者に対して効果的な歩行リハビリが可能となる装置の開発を行う。本開発を実現するためには、患者の歩行様式やタイミングに合わせて重心移動の制御や荷重量の調節を行うことが必要である。そこで本研究では、歩行中の身体状態をリアルタイムに推定し、同時に装置へ所定の運動を指令し、歩行アシストを実現する歩行リハビリ装置の開発を目指す。

3. 研究の結果

(1) ソフトウェア上での歩行アシストシミュレーション

身体重心が存在する体幹部の運動制御の違いが歩行中のキネティクスや筋活動へ与える影響について検討し、開発する歩行アシスト装置に必要な機能や適切な歩行介助方法を明らかにし、我々が提案する歩行アシスト方法の有効性を確認するために、ソフトウェア上でシミュレーションを実施した。

まず、三次元動作解析装置 VICON MX (VICON MOTION SYSTEMS 社製) を用いて、シミュレーションにおいて使用する動作を計測し、マーカー座標と各関節角度を取得した。計測動作はトレッドミル上での歩行動作 (0.4km/h) とした。その後、筋骨格モデリング・シミュレーション AnyBody Modeling System (AnyBody Technology 社製) を使用し、上記で計測したトレッドミル上歩行動作における床反力、脊柱および下肢の関節反力、関節モーメントを推定した。また、最適化計算により同部位における筋張力を算出した。

牽引方法を以下の 2 条件としてシミュレーションを実施した。なお、両条件ともに左右の肩マーカーへ外力を作用させ、その外力の大きさをそれぞれ体重の 1/4 (15.9kgf) とした。

① Fix 拘束 (従来の装置にて採用されている歩行アシスト方法)

絶対座標系において 2 つの固定点を設け、左右の肩マーカーに対して固定点へ向けて外力を作用させながら歩行をした (図 1 左)。

② LF (Lateral Force) 拘束 (今回提案する歩行アシスト方法)

左右の肩マーカーに対して常に鉛直上側へ向けて外力を作用させながら歩行をした。加えて、重心移動に伴って体幹部から側方へ向けて外力を作用させた (図 1 右)。外力の大きさは、重心位置の左右方向への移動に伴い増加させ、重心移動と同側へ作用させた。

$$y = k \cdot x$$

ここで、 y は側方への外力の大きさ [N]、 x は重心位置の x 座標 [m] である。ただし、 x 、 y ともに左側を正とする。今回は $k = 750$ に設定してシミュレーションを実施した。

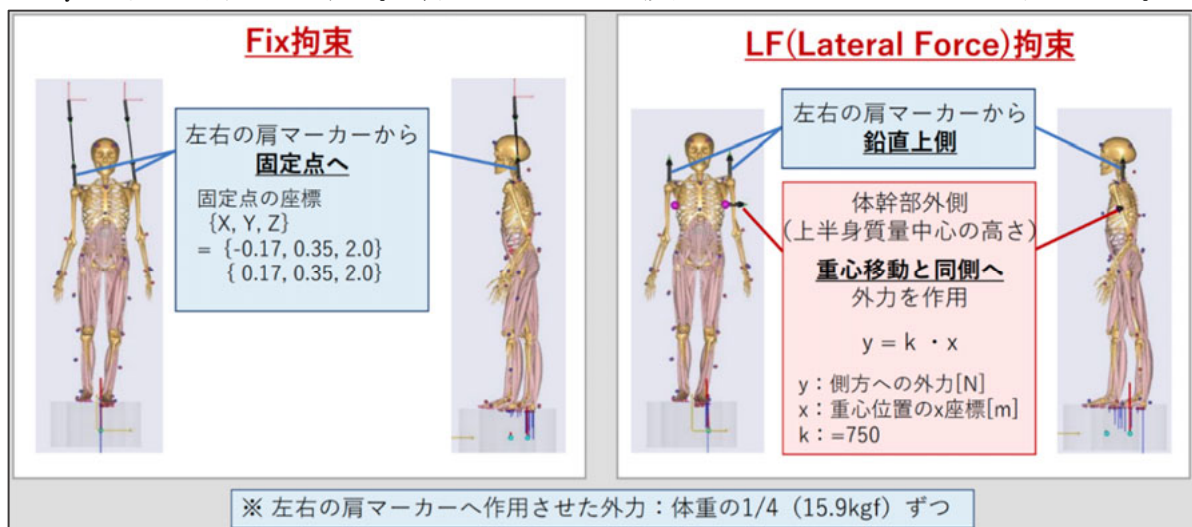


図 1 AnyBody における歩行アシストシミュレーションの各拘束条件

(2) シミュレーション結果まとめ

体幹の姿勢保持に関する筋群において、従来の装置で採用されている歩行アシスト方法と比較して、今回提案する歩行アシスト方法ではより通常歩行に近い筋活動を実現しながら歩行訓練を行える可能性が示唆された。また、立脚側股関節の負荷を減少させるとともに骨盤の安定性が向上し、立脚側への重心移動を適切に誘導できることが推察された。加えて、遊脚下肢の振り出しが容易となることで、重心移動および下肢の振り出しに關与する筋群の負担を軽減した状態で歩行訓練を行えると考えられた。今回提案する歩行アシストの条件下において、低速かつ歩幅の小さい歩行では床反力垂直成分から下肢荷重量の推定が可能であるとと考えられた。

(3) 歩行アシスト装置および制御システム概要

上記のシミュレーションによって装置に求められる機能や適切な歩行アシスト方法が明らかになった。現在、対象者の歩行動作に合わせて適切な歩行アシストを行うための外力を作用させるシステムの構築を目指している。重度の歩行障害を有する患者に対して、歩行リハビリ中の転倒を防止しながら長距離・多歩数の歩行練習を行うためには、BWSTT が有用である。その中で、本研究では体幹部に装着したハーネスの両肩部を上方へ、腹側部を側方へワイヤで牽引する方法を採用した（図 2）。また、ワイヤの牽引力を全て独立とするとともに、上方へ牽引するワイヤは左右に移動する滑車を通して装置下部へ繋がっており、トレッドミル歩行時に身体重心が存在する体幹部の運動を装置側で制御・誘導することが可能である。加えて、振り出す脚と反対側のワイヤを中心に牽引強度を調整することで、支える脚に加わる体重を減らす（免荷する）ことが出来る。本機能は歩行リズムに合わせて左右の牽引強度を調整することで、左右片脚ずつ異なる負荷量で歩行練習を行うことを可能にする。これにより、左右の脚それぞれにおいて限界を超えない範囲で最大の負荷を加えることで効率的な歩行練習が可能となる。

本開発を実現するためには、患者の歩行様式やタイミングに合わせた重心移動の制御や荷重量の調節を行うことが必要である。そこで本研究では、歩行中の身体状態をリアルタイムに推定し、同時に装置へ所定の運動を指令し、歩行アシストを実現する装置の開発を試みる。そのために、以下の項目について検討を行う。

歩行中の身体状態を推定するために、身体運動データと床反力データから人体運動力学モデルを組み立て、身体の姿勢や下肢への荷重量などの推定をリアルタイムに行う。身体運動データは、身体各セグメントに装着した加速度センサと床反力のデータにより計測する。また、推定された身体状態情報をもとに、歩行アシストを行うためのモータの適切な運動を決定するとともにモータを動かす指令システムを作成する。これにより、フィードバックされた身体状態に対する適切な歩行アシストのための指令が装置のモータへ伝達される。



図 2 歩行アシスト装置

4. 研究者としてのこれからの展望

今後、我が国の医療・介護分野における人材不足は深刻化することが予想されており、そのための対策の一つとしてロボット技術の活用が挙げられています。先述の通り、再生医療により中枢神経機能が回復した患者が歩行を再獲得するためには、適切な身体重心移動を伴った十分な距離の歩行練習が必要です。筆者はこれまで理学療法士として重度の歩行障害を抱えた方々に対してリハビリテーションを実施してまいりました。その中で、歩行時の重心移動の重要性と制御の大変さを実感していました。本研究にて開発する装置は、上記のような患者における歩行練習に対して非常に有用な装置であると考えられます。本研究は今後さらに発展していく再生医療を、真の意味での歩行・生活機能改善の手段とするために不可欠な装置の開発となり得ると考えており、今後も本研究を継続してまいりたいと考えています。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

本研究の意義をご理解いただき、ご支援いただきました日本私立学校振興・共済事業団の関係各位ならびに奨励金をご寄付いただいた皆様に心より御礼申し上げます。今回いただいたご支援により、本研究を前進させることが出来ました。今後は今回得られた結果を基に実機を用いた検証を進め、人々の健康寿命の延伸に寄与していけるよう引き続き精進してまいります。