

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26750231

研究課題名(和文) Development of a novel gait rehabilitation system in combination of functional electrical stimulation and robotic system for hemiplegic patients after stroke

研究課題名(英文) Development of a novel gait rehabilitation system in combination of functional electrical stimulation and robotic system for hemiplegic patients after stroke

研究代表者

叶 晶 (Ye, Jing)

早稲田大学・理工学術院・招聘研究員

研究者番号：10646821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、非侵襲機能的電気刺激(FES)デバイス、分割ベルトトレッドミルと骨盤制御サブシステムを統合し、回復期脳卒中片麻痺患者への歩行リハビリのための新たな歩行訓練システムを開発した。システムは、歩行運動機能を回復するために、片麻痺患者を積極的に機械的な訓練に誘導することを目指した。歩行訓練中に、前脛骨筋(TA)と内側腓腹筋への電気刺激は、トレッドミル歩行システムによって自動的に起動され、大腿四頭筋とハムストリングへの電気刺激が骨盤制御ロボットによって自動的にトリガされた。ロボットシステムとFESの組み合わせで下肢の運動学習の適用性を実験で検討することであった。

研究成果の概要(英文)：A novel gait rehabilitation system for walking rehabilitation of hemiplegic patients with convalescence stroke is developed in this study, which integrated a non-invasive functional electrical stimulation (FES) device with a robotic system based on a designed split belt treadmill and a pelvis control sub-systems. The system, in order to recover the locomotor function, aimed at inducing hemiplegic patients to actively mechanical training. During gait training, electrical stimulation to the Tibialis anterior and the medial gastrocnemius muscle was automatically activated by the split treadmill walking. Electrical stimulation of the quadriceps and hamstring was also automatically triggered by the pelvis support robot. The feasibility of the gait rehabilitation system for motor learning of the lower limbs was preliminarily verified in experiments.

研究分野：生命理工学

キーワード：医療・福祉 リハビリテーション 福祉ロボット 脳卒中片麻痺患者

1. 研究開始当初の背景

多くの国は近年に高齢者社会の時代に入っていて、軽度または重度の脳卒中患者が増えている。患者は物理的な移動性の損失で大幅に苦しんでいる。この失われた運動機能の回復は十分に生物医学的な治療によって行く対処されていない。一般的に、理学療法は運動機能回復にある程度効くことである。従来のリハビリテーション方法は、理学療法士の観察や重労働、特別に設計された予備演習と下肢の位置の直接制御を必要とし、人数が増えている患者を治療することができなくなる。最近多くの研究は、運動機能の回復を改善に向けて努力してきたが、それは大多数の脳卒中生存者のリハビリテーションの有効性を高めるのに長い道のりをまだ持っている。したがって、新しい治療方法を開発するのが必要である。

現在まで、いくつかの生体力学的ソリューションはかなり治療効果であることを証明された。これらは、運動機能の回復を促進するため、電氣的に脳卒中生存者の麻痺筋肉を刺激することにより筋肉の収縮を生成する機能的電気刺激 (FES) を含む。運動機能を回復するための高い神経可塑性及び修復メカニズムが FES を使用して得ることと、FES の有効性が少なくとも 24 ヶ月を維持することができる。一方、リハビリロボットが高齢社会に不可欠なものとなっている。これらのロボットは、軽度または重度の運動障害者に安全な集中的かつタスク指向のリハビリテーションを提供する。そして FES と片麻痺患者の歩行リハビリ用ロボットは、歩行リハビリテーションに普及し、効果的な方法になっている。

2. 研究の目的

分割ベルトトレッドミル歩行システムと骨盤制御システムを含むロボットシステムと非侵襲的な FES の統合の新たな方法を実施する予定である (図 1)。(図 1 には人間の骨盤に取り付けられたロボット部分は、体重のサポート (BWS) の機能もある。) FES を

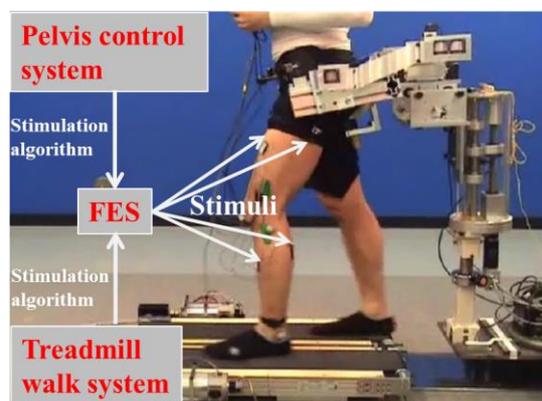


図 1 提案され歩行訓練システム

使用する目的は、瞬時に歩行パターンに影響を与えることにより、歩行の品質を改善することである。提案された新たなシステムは、

協調運動のトレーニング練習中に下肢の運動に直接制御を可能にする。この研究のもう一つの目的は、片麻痺下肢のトレーニングと運動学習を通してロボットシステムと FES の組み合わせの適用性を検証することである。最終的に設計されたトレーニングの練習の期間によってできるだけ正常な歩行に近づいて片麻痺下肢の歩行機能の改善することを目指している。予めシミュレートされた片麻痺の被験者に実験により提案手法の実現可能性をテストし、フォースプレートセンサを用いて測定した結果と実験結果を比較することにより、適用性を確認する。

3. 研究の方法

片麻痺患者歩行能力回復のために、分割ベルトトレッドミル歩行システムと骨盤制御システムを含むロボットシステムと非侵襲的な FES の統合の新たな方法を提案する。

骨盤制御ロボットシステムは、主に骨盤嵌合機構と二つモータで構成される。骨盤嵌合機構は、患者の骨盤を保持し、その骨盤の動きを維持するために開発される。それは左右の水平方向と垂直の移動で骨盤の動きを制御する。したがって、2 つのモータは、骨盤嵌合機構を制御するために使用される。一つのモータが水平面内で骨盤運動を制御することである。一方、他のモータは機構の垂直移動を駆動する。骨盤嵌合機構は骨盤と機構との間の垂直方向の力を検出するセルセンサがインストールされる。骨盤が歩行時に垂直方向に上下移動するので、BWS 目標値に骨盤嵌合機構の垂直方向の駆動モータが体重を支持する。ロボットシステムが構築された後、骨盤の動きを制御するための骨盤コントロールシステムを開発する予定である。

いままでに、片麻痺患者の歩行リハビリテーションのための新規な自動歩行訓練システムを開発した。これは、2 つの筋肉を刺激するために 2 分離されたチャネルを有する FES 装置とのスプリットベルトトレッドミルを兼ね備えている。FES 装置からの刺激の送達は、被験者の歩行位相によって自動的に制御される。彼らの歩行相は、被験者は分割トレッドミル上を歩くとき、トレッドミルのモータの電流値の変化を観察するアルゴリズムによって推定される。

4 つ主要な下肢筋肉 (大腿四頭筋、ハムストリング、前脛骨筋 (TA) 、および内側腓腹筋) が歩行動作の中で最も重要である。患者の足を前方に揺動する時には、大腿四頭筋とハムストリング筋が活性化されることが示されている。したがって、4 つの筋肉への電気刺激のタイミングは、骨盤および下肢の間に得られた運動学とロボットシステム動作制御の関係に基づき、計算される。各筋肉への刺激の電流容量は、刺激で引き起こされる下肢関節の曲がった角度を確認することにより決定することができる。

トレッドミル歩行システムおよび骨盤制御システムと、上述した 4 つ全ての筋肉に刺

激を送るために分離された4チャンネルを有するFES装置を統合する。歩行訓練中に、TAと内側腓腹筋への電気刺激は、トレッドミル歩行システムによって自動的に起動され、大腿四頭筋とハムストリングへの電気刺激が骨盤制御ロボットによって自動的にトリガされる。

最後に、Ankle-foot orthosis (AFO) という装置を履いて脳卒中後片麻痺患者に模擬できる健常者で実験を実施する。電気刺激のタイミング精度、提案システムの優位性と有効性を確認するために、従来の治療法から、他のトレーニング結果と比較する。本研究は、2014年度と2015年度を2年間に分割して進むことであった。

4. 研究成果

この骨盤制御システムとFESを組み合わせることで、脳卒中生存者における下肢運動機能の回復をより効果的に促進することに焦点を当てる。FES装置からの電気刺激が自動的に計算され、骨盤制御ロボットとトレッドミルシステムに基づいて、刺激アルゴリズムによって麻痺した筋肉に応用される。

本研究を実施するために、4つの主要な段階があった。ステップ1は、下肢の運動学的モデルを確立することである。ステップ2では、骨盤制御とトレッドミル制御ロボットシステムを構築した後、このシステムへ運動学的なモデルをインポートする。ステップ3は、刺激のアルゴリズム構築してロボットシステムとFESを組み合わせることである。ステップ4は、統合されたロボットシステムとFESで、実験を行い、最終的にシステム評価を進める。

ステップ1: 下肢の運動学的モデルの構築

骨盤の動きデータを得るために、下肢の各セグメントに関連する下肢運動学モデル取得される必要である。下肢と骨盤の間の運動学的関係のモデルパラメータは、歩行中に外部マーカー及びコンピュータ支援のビデオ運動分析システム(VICON)で検出され、アルゴリズムによって計算することができた。

ステップ2: 骨盤制御システムとトレッドミル制御システムに歩行運動学的モデルをインポートする

骨盤制御ロボットシステムは、主に骨盤嵌合機構と二つのモータで構成された。骨盤嵌合機構は、使用者の骨盤姿勢の保持と骨盤の動くために開発された。それは骨盤の垂直移動と水平方向に移動することを制御されていた。ロボットシステムが構築された後、前に得られた下肢運動学的関係のモデルパラメータを骨盤の動き制御とトレッドミル制御のプログラムに入れて、ロボットシステムが全体に下肢運動を支えること制御された。

ステップ3: 刺激アルゴリズムを構築して、骨盤の制御システムとFESの組み合わせる

4つ主要な筋肉(大腿四頭筋、ハムストリング、前脛骨筋(TA)、および内側腓腹筋)

が歩行運動の中で最も重要である。患者が前方に自分の足をスイングしながら、4つ筋肉が活性化される。TAと内側腓腹筋への電気刺激は、トレッドミル歩行システムによって自動的に起動され、大腿四頭筋とハムストリングへの電気刺激が骨盤制御ロボットによって自動的にトリガされた。骨盤の動きは、このように2つの筋肉への電気刺激のタイミングが骨盤と下肢の間に得られた運動学的関係に計算され、歩行中にインポートした運動学モデルの回転角度 α の周期的な変化に追従した。骨盤はまた、歩行中に垂直方向に上下に移動するので、骨盤フィッティング機構の垂直方向の駆動モータは、体重を支えるのは、セルセンサーの力フィードバックによって骨盤の上下運動を実現することができた。各筋肉への刺激の電流容量は、刺激によって引き起こされる下肢関節の屈曲角度によって決定することができた。

ステップ4: 統合されたロボットシステム、とFESのシステムで実験

骨盤の制御システムとFESの組み合わせの後、トレッドミル歩行システムと骨盤の制御システムと、上記の4つのすべての筋肉に刺激を送信するために4分離チャンネルを有するFESを統合した。

図2は統合したロボットシステムとFES

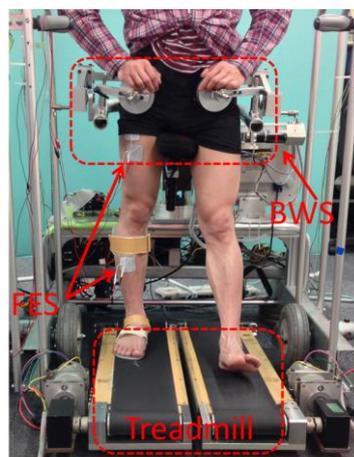


図2 統合したロボットシステムとFES制御の実験

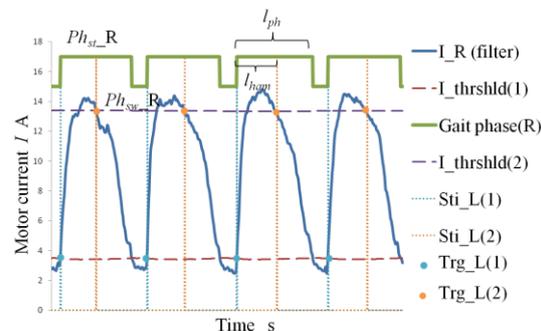


図3 筋肉の電子刺激タイミング制御実験の一部結果

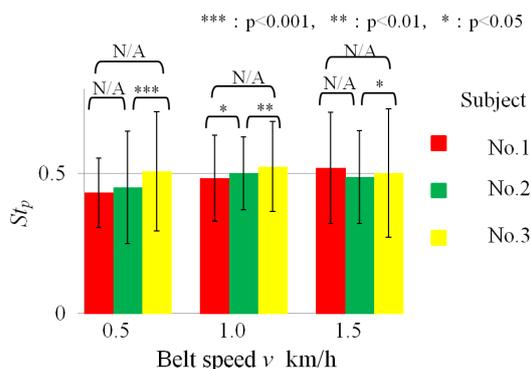


図4 筋肉の電子刺激タイミング制御実験の一部結果

S制御の実験を示した。Ankle-foot orthosis (AFO) という装置を履いて脳卒中後片麻痺患者に模擬できる健常者で実験を実施した。図3と図4は実験の一部結果が示された。図3は3つ被験者がFESを受けたタイミング結果である。青いとオレンジ色の点は被験者の歩行中に刺激が自動的に発生した時点である。図4はほかの3つ被験者が3つ歩行速度でTA筋肉に電子刺激の時間差と誤差である。時間差と誤差は受けられる範囲中にあるとみられた。

結論としては、提案されたシステムの有効性を掲示した。将来には、回復期脳卒中患者の歩行リハビリテーションのための適合性を実証することを望む。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計3件)

- ① Jing Ye, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "A Gait Phase Estimation Based on a Pelvis Assist Robot for Gait Rehabilitation of Hemiplegic Stroke Survivors", International Workshop on Wearable Robotics, 2014年度09月14日～2014年度09月19日, Baiona (Spain), pp.1-2, 2014;
- ② Jing Ye, Yasutaka Nakashima, Bo Zhang, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "A Novel Gait Rehabilitation System for Hemiplegic Stroke Survivors Based on FES and a Pelvis Support Robot", International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 2014, 2014年度08月26日～2014年度08月30日, Chicago (USA), pp. 3099-3101, 2014;
- ③ Jing Ye, Yasutaka Nakashima, Bo Zhang, Quanquan Liu, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, "Development of a Novel Gait Rehabilitation System in Combination of

Functional Electrical Stimulation and a Split Belt Treadmill for Hemiplegic Patients after Stroke", IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics 2014, 2014年度08月12日～2014年度08月15日, Sao Paulo (Brazil), pp. 701-706, 2014;

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

叶 晶 (YE, Jing)

早稲田大学 理工学術院・招聘研究員

研究者番号：494333