

令和元年6月26日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01535

研究課題名(和文) 機能的電気刺激を組み合わせた下肢ロボットリハビリテーションに関する研究

研究課題名(英文) Development of a Rehabilitation Robot Combined with Functional Electrical Stimulation

研究代表者

巖見 武裕 (iwami, takehiro)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10259806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：機能的電気刺激(FES)とモータを組み合わせたハイブリッドFES歩行訓練リハビリテーションロボットを製作した。そして慣性センサを用いて最適なタイミングで患側下肢を振り出す可変遅れ時間システムを開発し、片麻痺患者と健常者を対象に検証を行った。FESに関しては、右大腿四頭筋を表皮電極で刺激した。関節角はモーションキャプチャシステムで測定し、歩行サイクル中の最大屈曲角から伸展までの振幅の再現性を評価した。運動の滑らかさは、角度ジャークコスト(AJC)を用いて評価した。さらに、強化学習の枠組みを用いた自動アシスト調整システムを開発し、患者の状態に合わせてロボットの行動を最適化できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な下肢リハビリロボットが開発されてきたが、これまで個人特有の歩行軌道を生成するハイブリッドFESを用いたリハビリロボットは存在しない。Redkarらは、IMUを組み合わせたヒューマンアシストロボットを提案し、IMUによって望ましい目標軌道を生成できる可能性を示唆している。本研究で開発したハイブリッドFES歩行訓練リハビリテーションロボットは、麻痺によって失われた患側の歩行軌道を健側の軌道で補完し、さらに、個人固有の歩行軌道に基づいたタイミングで電気刺激を与えることで、より高いニューロリハビリテーションの効果が期待できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We developed a rehabilitation robot to assist hemiplegics with gait exercises. The robot was combined with functional electrical stimulation (FES) of the affected side and was controlled by a real-time-feedback system that attempted to replicate the lower extremity movements of the non-affected limb on the affected side. We measured the reproducibility of the non-affected limb movements on the affected side using FES in disabled and non-disabled individuals and evaluated the smoothness of the resulting motion. The measured hip and knee joint angles of the non-affected side were reproduced on the pseudo-paralytic side using the robot's motors. The right quadriceps was stimulated with FES. Joint angles were measured with a motion capture system. We assessed the reproducibility of the amplitude from the maximum angle of flexion to extension during the walking cycle. The smoothness of the motion was evaluated using the angular jerk cost.

研究分野：医用生体工学

キーワード：robot therapy FES hemiplegia feedback system IMU

## 1. 研究開始当初の背景

近年、脳卒中片麻痺に対する積極的治療法の有効性が多数報告されており、従来考えられている以上に中枢神経系には可塑性があることが動物やヒトの研究からも判明している。しかし、積極的治療法のほとんどは比較的軽度の麻痺が対象であり、随意性が乏しい片麻痺下肢に対しては有効なアプローチが未だに見いだされていない。また、ロボット技術の進歩により装着者の力を増幅させるパワーアシストスーツの開発が行われ、介護医療や産業などの分野で活躍が期待されている。この代表的なものとして筑波大学の HAL がある。得にリハビリを目的としたものに松下電器グループの REALIVE 等がある。随意性の少ない片麻痺下肢に対してもこれらロボット技術を応用した治療法に期待が寄せられているが、ロボットだけでは他動的な練習になってしまうところに問題があった。

一方、秋田大学の研究グループでは麻痺した筋や神経系に電気刺激を与えて筋活動を外部コントロールする機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation: FES)の研究を続けてきた。また、これまでに片麻痺上肢に対して FES と運動療法を組み合わせることにより、大脳運動野が賦活され麻痺が効果的に改善されることを f-MRI を用いた研究により確認している。そこで、我々は片麻痺下肢に対する新しい治療法として、FES とロボット技術を組み合わせたハイブリッド FES システムによる新しい歩行訓練装置を用いて反復歩行練習を行うことを考えた。本システムの構想は、対麻痺用リハビリ機器として既に特許を取得している(特許番号: 特許第 5061285 号、発明の名称: 生体運動支援装置)。

## 2. 研究の目的

研究の終了時には、脳卒中片麻痺患者の急性期リハビリテーション・プログラムとして、理学療法士が行う歩行訓練(装具使用)をアシストする治療効果の高い装置を提供することを目標とする。脳卒中片麻痺患者や不全対麻痺患者に対して、単なる歩行訓練アシストだけではなく機能的電気刺激(FES)により下肢筋の収縮活動を発生させ、神経再教育・筋力強化を効果的に促すことのできるものとする。本研究では、歩行や起立が困難な下肢麻痺者が日常生活者において起立や歩行を可能とする訓練機を開発することを最終的な目的とするが、個人病院やリハビリ施設に導入しやすいよう、機能を絞り込んだコンパクトで、ある程度安価な装置の研究と開発を目指す。そのために、実際に試作機を大学病院に設置して患者を対象とした長期にわたる臨床試験を行い、必要とされる機能の選定、安全性の確認、治療効果の確認、訓練プログラムの構築を行い、本システムの有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

開発した歩行アシスト・ロボットについて、健常者を対象とした動作試験で十分な安全性と信頼性を確認した後、秋田大学医学部倫理委員会の審査を経て医学部付属病院リハビリテーション科に設置する。そして、片麻痺患者を対象とした歩行訓練に利用して、その治療効果や利便性などの評価を行う。また、右片麻痺対応の本装置に、左脚側のアシスト・ロボットを追加して、左右片麻痺患者および不全対麻痺患者にも対応できるようにする。

歩行アシスト・ロボットを右脚に装着し、下肢筋(大腿四頭筋、大殿筋、大腿二頭筋)の表面に刺激用表面電極を貼付する。アシスト・ロボットは既存の装具と同様に関節可動域の調整ができるため、足関節の安定が必要な麻痺患者は関節を固定させ、ある程度筋力のある患者は起立動作をなめらかに行うために関節をフリーにするなど、使用者に合わせた調整ができる。これを大学病院に設置して片麻痺患者の歩行訓練に使用するための改良を行う。使用する患者が手で体を支える手摺りと腰部を支えるハーネスを患者が使いやすいものに改良し、また療法士が一人で操作出来るよう操作プログラムを改良する。現在はあらかじめプログラムされた脚の運動軌道をアシスト・ロボットが繰り返すだけであるが、慣性センサを用いて関節の角度や歩行周期を測定する装置を使うことにより、片麻痺歩行訓練では、麻痺側の脚の動きを健常側の脚の動きに同期させることが出来るようになる。これにより、健常側の脚の動きに合わせた自然な歩行訓練が出来るようになる。ハイブリッド FES システムでは、ロボットによる麻痺脚の他動運動に同期して、FES による下肢の筋収縮を制御する。そのために筋疲労の少ない刺激周波数、刺激タイミングを選定する。

## 4. 研究成果

初年度は、片麻痺リハビリテーションにおける左右対称かつ自発的な歩行訓練を促すため、健常側の関節角度をマスターとして計測し、スレーブ側となる麻痺側の下肢軌道を生成して歩行を行う制御システムを開発した。そして、慣性計測装置(Inertial Measurement Unit: IMU)を用いて健常側の関節軌道を計測し、マスタースレーブ動作するハイブリッド FES 歩行アシスト・ロボットを実際に製作し、健常者および片麻痺患者に装着して使用した。その結果、以下のことを確認した。マスタースレーブ動作によって健常側の動作を麻痺側に追従させることができた。IMU を用いた姿勢推定を光学式モーションキャプチャと比較し、IMU による

マスター側の動作計測が有効であることが分かった。片麻痺患者に本装置を装着して歩行訓練を実施し、結果として左右の関節軌道が一致し、左右の脚が交互に振り出すことで左右対称な歩行を実現したことを確認した。

次年度は、IMU を用いて健常側の関節軌道を計測し、マスタースレーブ動作によって自然な歩行訓練ができる片麻痺リハビリ装置について、障がい者が使用するうえで問題となる機構の改良を行った。また、本研究にて開発した歩行訓練システムを用いて 10 名の健常者と 3 名の片麻痺患者に対する動作実験を行った。実験の結果、IMU の計測精度とアクチュエータの制御性能は良好な結果を示し、またロボットによるアシスト歩行の左右対称性を確認した。これにより、健側の動作を患側にフィードバックすることで、左右対称な歩行を可能にすることが実証された。FES に関しては、右大腿四頭筋を表皮電極で刺激した。関節角はモーションキャプチャシステムで測定し、歩行サイクル中の最大屈曲角から伸展までの振幅の再現性を評価した。運動の滑らかさは、角度ジャークコスト (AJC) を用いて評価した。その結果、股関節および膝関節の振幅再現率 (%) はそれぞれ  $87.9 \pm 6.2$  (平均  $\pm$  標準偏差) および  $71.5 \pm 10.7$  であった。歩行周期の再生率は、股関節および膝関節についてそれぞれ  $99.9 \pm 0.1$  および  $99.8 \pm 0.2$  であった。FES を用いた結果と FES を用いなかった結果との間に統計的に有意な差はなかった。ロボットと FES でアシストする患側の AJC は健側の AJC よりも有意に小さかった。これまでに、片麻痺患者を対象として健側から患側への動作フィードバックと FES による歩行アシストを試みた研究はなく、本実験により患側の動きの高い再現性を示した。本年度は、これらの結果をロンドンで開催された国際 FES 学会 (IFESS2017) において発表できた。また、英文学会誌 (Progress in Rehabilitation Medicine 2018) に投稿して掲載された。

最終年度は、歩行訓練ロボットに力制御を用いた可変アシストシステムを用いることで、使用者の随意運動を誘発させることができることを示した。さらに、強化学習の枠組みを用いた自動アシスト調整システムを開発し、患者の状態に合わせてロボットの行動を最適化できることが示唆された。本年度の研究結果は、3 報の学術論文として投稿している。これまでの研究により、脳卒中片麻痺患者の急性期リハビリテーション・プログラムとして、理学療法士が行う歩行訓練 (装具使用) をアシストする治療効果の高い装置を提供することができた。開発した歩行訓練ロボットは、脳卒中片麻痺患者に対して、単なる歩行訓練アシストだけではなく機能的電気刺激 (FES) により下肢筋の収縮活動を発生させ、神経再教育・筋力強化を効果的に促すことができる。本研究では、歩行や起立が困難な下肢麻痺者が日常生活者において起立や歩行を可能とする訓練機を開発することを最終的な目的とするが、個人病院やリハビリ施設に導入しやすいよう、機能を絞り込んだコンパクトで、ある程度安価な装置の研究と開発を行った。そのために、実際に試作機を大学病院に設置して患者を対象とした長期にわたる臨床試験を行い、必要とされる機能の選定、安全性の確認、治療効果の確認を行い、本システムの有効性を検証した。現在は、左脚側のアシスト・ロボットも製作して、左右片麻痺および対麻痺の患者にも対応できる装置の開発を行っている。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文]

1. 山内哲也, 臼田伊織, 齊藤諒, 井上純一, 巖見武裕, 島田洋一, 歩行訓練リハビリロボットの下肢関節軌道生成に関する研究, 臨床バイオメカニクス, 40 巻, 2019 (査読有 掲載決定)
2. 臼田伊織, 齊藤諒, 山内哲也, 井上純一, 巖見武裕, 島田洋一, 機能的電気刺激を併用した片麻痺用歩行リハビリテーションロボットにおける歩行の左右対称性評価, 臨床バイオメカニクス, 40 巻, 2019 (査読有 掲載決定)
3. Ryota Kimura, Toshiki Matsunaga, Takehiro Iwami, Daisuke Kudo, Kimio Saitoh, Kazutoshi Hatakeyama, Motoyuki Watanabe, Yusuke Takahashi, Naohisa Miyakoshi and Yoichi Shimada, Development of a Rehabilitation Robot Combined with Functional Electrical Stimulation Controlled by Non-disabled Lower Extremity in Hemiplegic Gait, Progress in Rehabilitation Medicine 2018, Vol.3, pp1-6, 2018, DOI: 10.2490/prm.20180005 (査読有)

### [学会発表]

1. 臼田伊織, 齊藤諒, 山内哲也, 巖見武裕, 井上純一, 木村竜太, 島田洋一, 歩行訓練リハビリロボットの下肢関節軌道生成に関する研究, 第 45 回日本臨床バイオメカニクス学会, 2018 年
2. 山内哲也, 臼田伊織, 齊藤諒, 木村竜太, 井上純一, 巖見武裕, 島田洋一, 機能的電気刺激を併用した片麻痺用歩行リハビリテーションロボットにおける歩行の左右対称性評価, 第 45 回日本臨床バイオメカニクス学会, 2018 年

- 3 . Kimura, R., Matsunaga, T., Iwami, T., Kudou, D., Saito,K., Iida, J., Iwamoto, Y., Takahashi,Y., Honda, T., Takeda, K., Takei, T., Usuda, I., and Shimada,Y, A New Rehabilitation Robot Using Functional Electrical Stimulation (FES) and Feedback Systems using The Motion of NonDisabled Lower Extremity to Improve the Gait of Hemiplegic Individuals, Annual Meeting of the International Functional Electrical Stimulation Society(IFESS) 2017 (国際学会) ,2017 年
- 4 . 武井剛士 , 臼田伊織 , 齊藤諒 , 山内哲也 , 巖見武裕 , 木村竜太 , 松永俊樹 , 島田洋一 , 機能的電気刺激を併用した反復歩行訓練の開発, 第 51 回 日本生体医工学会 東北支部大会, 2017 年
- 5 . 武田康平 , 本田大生 , 武井剛士 , 臼田伊織 , 巖見武裕 , 木村竜太 , 松永俊樹 , 島田洋一 , 動作フィードバックを有する片麻痺用歩行リハビリロボットの開発と評価, 日本機械学会 第 29 回バイオエンジニアリング講演会, 2017 年

〔雑誌論文〕(計 3 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：畠山和利

ローマ字氏名：Hatakeyama Kazutoshi

所属研究機関名：秋田大学

部局名：医学部付属病院

職名：理学療法士

研究者番号 (8 桁): 50748291

研究分担者氏名：木澤悟

ローマ字氏名：Kizawa Satoru

所属研究機関名：秋田工業高等専門学校

部局名：その他部局等

職名：教授

研究者番号（8桁）：90234202

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。