

氏名・(本籍)	井上 純一 (新潟県)
専攻分野の名称	博士(医学)
学位記番号	医博甲第 1059 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	医学系研究科医学専攻
学位論文題名	Development of a gait rehabilitation robot using an exoskeleton and functional electrical stimulation and validation in a pseudo-paraplegic model (外骨格と機能的電気刺激を併用した歩行リハビリロボットの開発と疑似対麻痺モデルにおける評価)
論文審査委員	(主査) 橋本 学 教授 (副査) 新山 幸俊 教授 中永 士師明 教授

学位論文内容要旨

論文題目

Development of a gait rehabilitation robot using an exoskeleton and functional electrical stimulation and validation in a pseudo-paraplegic model

外骨格と機能的電気刺激を併用した歩行リハビリロボットの開発と疑似対麻痺モデルにおける評価

申請者氏名 井上純一

研究目的

近年、低エネルギー外傷による不全麻痺の脊髄損傷が増加しており、高齢化に伴い、さらに増加していくと予想される。脊髄損傷のリハビリテーションは介助量が大きく、特に高齢者ではさらに介助量が増え、セラピストの負担が大きい。そこで、リハビリテーション方法の確立が求められている。我々は機能的電気刺激(FES:Functional Electrical Stimulation)と外骨格ロボットを組み合わせ、対麻痺用歩行リハビリテーションロボットを開発した。本研究では、FESによる筋収縮が関節運動を生み出すことができれば、FESを併用することでモーターユニットの発生するトルクを必要最小限のアシスト量に抑えることができると推論した。本研究では、FESの併用によりロボット由来のトルクを低減できるかどうかを健常者の疑似対麻痺モデルで検証することを目的とした。

研究方法

健常成人9名(22-36歳)を対象とした。

外骨格は長下肢装具を元に独自に作成し、被験者はリハビリテーション用免荷リフト、FES、ロボット装具を装着し、トレッドミル上を歩行した。FESによって両側の大腿四頭筋とハムストリングスを刺激した。被験者は、リフトで全体重を持ち上げられ、両下肢を完全に脱力させた状態で歩行するよう指示され、これを疑似対麻痺モデルとした。被験者は、(a) FESなし0.8km/h歩行、(b) FESあり0.8km/h歩行、(c) FESなし1.2km/h歩行、(d) FESあり1.2km/h歩行の4つの条件でそれぞれ1分間歩行した。

各条件で、モータ由来のアシストトルクの最大値を股関節、膝関節ごとに測定した。アシストトルクの1分間歩行平均値を、一元配置分散分析により比較した。統計的有意性は $p < 0.05$ とした。

研究成績

健常者の疑似対麻痺モデルにおいて、FESを用いた歩行では、FESを用いない場合に比べて股関節と膝関節の屈曲・伸展トルクが減少した。右股関節伸展時を除く、全ての関節でトルクが有意に減少した。また、時速0.8kmと1.2kmの比較では、トルクに有意差はなかった。有害事象は発生しなかった。

FESによる大腿四頭筋への刺激で股関節屈曲と膝関節伸展が、ハムストリングスへの刺激で股関節伸展と膝関節屈曲が誘発され、ロボットによる股関節、膝関節の各アシストトルクが減少したと考えられる。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、本研究の被験者は健常者の疑似対麻痺モデルであり、麻痺のある患者とは結果が異なる可能性がある。今後、さらなる安全性を確認した上で、麻痺患者を対象に同様の実験を行い、リハビリテーションの効果を検証する必要がある。また、FES刺激により右股関節トルクが減少したが、その差は有意ではなかった。健常者の疑似対麻痺モデルにおいて被験者が完全に下肢脱力できなかった可能性があり、左右差が生じたと考えられた。

結論

我々はFESを併用した対麻痺麻用の歩行リハビリテーション用ロボットを開発した。健常者疑似対麻痺モデルにおいて、FESを併用した歩行では股関節・膝関節でロボット由来のトルクを減少させることが示唆された。

学位(博士一甲)論文審査結果の要旨

主査: 橋本 学

申請者: 井上 純一

論文題名: Development of a gait rehabilitation robot using an exoskeleton and functional electrical stimulation and validation in a pseudo-paraplegic model

(外骨格と機能的電気刺激を併用した歩行リハビリロボットの開発と疑似対麻痺モデルにおける評価)

要旨

著者の研究は、論文内容要旨に示すように、対麻痺者に対するリハビリテーションにおいて、外骨格ロボットと機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation, 以下FES)を併用したロボットを開発し、健常者疑似対麻痺モデルにおいてロボット由来のトルク量の変化を指標とし、その効果の検証を試みたものである。

FES 刺激の有無と二つのスピード(0.8/1.2km/h)で膝・股関節でアシストトルクの1分間歩行平均値を求め、一元配置分散分析で比較した。FES刺激で有意にアシストトルクの減少がみられた。

本研究で健常者疑似対麻痺モデルにおいて、FESを併用することで筋力由来のトルクが増加し、関節運動に必要なトルクに占めるロボット由来のトルクを減少させることを示した。

本論文の斬新さ、重要性、実験方法の正確性、表現の明瞭さは以下の通りである。

1) 斬新さ

従来、対麻痺に対するリハビリテーションは下肢装具を装着し、療法士による全介助で行われてきたが、介助負担軽減などのため、リハビリテーションロボットや機能的電気刺激が発展してきた。これまで、ロボットとFESの併用による筋力回復や関節可動域改善などのリハビリテーション効果を示す報告はあったが、その機序を明らかにした報告はなかった。本研究では、健常者疑似対麻痺モデルにおいて、FESを併用することで筋力由来のトルクが増加し、関節運動に必要なトルクに占めるロボット由来のトルクを減少させることを示した。この結果は、FES刺激による筋由来のトルクを発生させ、ロボットへの依存度を軽減させることで、自身の筋由来の力を最大限に活用し、リハビリテーションを行うことがより効果的な機能回復を促している可能性を明らかにした。

2) 重要性

我が国における脊髄損傷の年間発生数は5000人～6000人とされており、有症者は20万人とされている。脊髄損傷は対麻痺によって下肢機能が著しく低下し、寝たきりや車いすなど自力で

歩行することが出来なくなる可能性が高い。脊髄損傷による対麻痺におけるリハビリテーションは療法士の負担が非常に大きい一方で、自然経過による機能回復を期待せざるを得ないという現状であった。ロボットやFESなどの新技術の発展により、療法士の負担を軽減させ、より効果的なリハビリテーションが可能になってきている。しかし、ロボットは訓練量を確保することができる一方で、筋収縮が発生しにくいという特徴を有している。また、FESは筋収縮を引き起こす一方で、訓練量を確保しにくいという特徴があった。本研究では、ロボットとFESを併用することこそが、それぞれのデメリットを補い合うことができ、麻痺した筋に筋収縮を引き起こしつつ、訓練量を確保できる、より効果的な訓練を行える可能性を示した。さらに、近年報告されている再生医療におけるリハビリテーションとしても効果が期待でき、新しい医療技術の効果を最大限に引き上げる役割も担う可能性がある。

3) 研究方法の正確性

先行研究において、健常者疑似片麻痺におけるリハビリテーションロボットの精度を検証した研究の実験方法を参考にし、実験を行っている。各項目の測定を同一検者で行い、測定に関する検者間のバイアスを除去している。健常者疑似対麻痺モデルでは、リハビリ用の免荷リフトによって健常者の全体重を持ち上げ、両下肢を脱力するという手法で全ての被験者で同様の方法で行っている。さらに、すべての結果は統計学的検討が加えられており、実験方法は客観的で正確性がある。

4) 表現の明瞭さ

本研究のもつ意味、開発したロボットと使用した機器の概要、各種測定方法、評価項目、得られた結果、考察は簡潔かつ明瞭に記載されている。

以上述べたように、本論文は学位を授与するに十分値する研究と判定する。