

令和元年6月3日現在

機関番号：33916

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21456

研究課題名(和文)短下肢装具型ロボットの立位外乱応答を補完する装具支柱剛性最適化に関する研究

研究課題名(英文)A study of optimal stiffness of the posterior strut of ankle-foot orthosis for standing balance response

研究代表者

小山 総市朗(Koyama, Soichiro)

藤田医科大学・保健衛生学部・講師

研究者番号：90754705

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)：本研究の目的は、立位時の予期しない外乱に対する姿勢応答と装具支柱剛性との関係性を検討し、短下肢装具型ロボットにおける剛性最適値を明らかにする事であった。本研究の成果として、まず床反力計内蔵トレッドミルを用いた外乱刺激計測システムを構築した。そして、同システムを用いて剛性の異なる装具支柱5条件と裸足の計6条件で外乱刺激後の姿勢応答を比較した。その結果、身体重心の前後変化量、下肢関節角度の変化量、下肢筋活動量は装具支柱の剛性によって変化は認めず、足関節固定の有無による影響が最も大きい事が明らかとなった。本結果は、立位外乱刺激後の姿勢応答に対して装具支柱剛性は影響が少ないこと示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リハビリテーション現場で培われてきた短下肢装具のノウハウと最新のロボット技術との融合の観点から、通常立位時の予期しない外乱に対する姿勢応答である、足関節底背屈運動による重心動揺最小化を、装具支柱剛性で再現できるかについて検討した。その結果、装具の有無によって予期しない外乱に対する姿勢応答は異なるものの、装具支柱剛性による違いは認めなかった。本結果によって、短下肢装具ロボットに立位姿勢制御機構を付与するためには、装具支柱以外の検討事項が必要である事がヒトに対する定量的検討によって得る事が出来た。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to investigate the relationship between the standing posture response to unexpected disturbances and the brace stiffness of the posterior strut, and to clarify the stiffness optimum value for the robot of ankle-foot orthosis type.

Firstly, we constructed a disturbance stimulation measurement system using an instrumented treadmill. Then, using this system, we compared the standing postural responses after disturbance stimulation under six conditions (five braces with different stiffness, and bare feet). As a result, it was found that the amount of anterior-posterior change in center of gravity, the change in joint angle of lower limbs, and the muscle activity of lower limbs did not change with the stiffness of braces of the posterior strut. The results suggest that the brace stiffness of the posterior strut has little effect on the postural response after disturbance stimulation.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：短下肢装具 立位姿勢応答 ロボット

1. 研究開始当初の背景

リハビリテーション医療の治療介入手法は、医工連携によって急速に進展している。随意運動が障害された骨格筋に対して電気刺激を行い、運動を補助する機能的電気刺激や、大脳皮質に対して磁気または電気刺激によって運動練習効果を高める経頭蓋脳刺激法などは、医療と工学分野が連携した好例として、現在でも積極的に研究が行われている。

近年、新たな運動練習の補助手段として、ロボット技術の臨床応用が行われている。特に、従来の短下肢装具に力源を付加した短下肢装具のロボット化が注目され、患者および医療者の高い期待のもと研究開発が進められている。ロボット下肢装具は、足底センサ等から歩行時の接地・離地情報を取得し、歩行周期に合わせた関節運動を再現する。また立位時は、足関節を一定角度に保持して安定した立位を提供する。しかし、立位時の完全な足関節固定は、日常場面で多くみられる起伏のある床面や不意の外力には不利に働く。すなわち、通常の立位外乱応答である足関節の底背屈運動による重心動揺最小化は、足関節固定によって著しく制限される。

このような立位時の外乱に対する姿勢制御も行うロボットは実現できていない。その要因として、立位時の外乱応答には高速・高トルクの制御が求められ、モータの大型化とそれに伴う実用性の低下が避けられないためと考える。ロボット短下肢装具の普及には、ロボット制御の性能向上だけでなく、小型かつ軽量といった「実用性」という観点も考慮しなくてはならない。

そこで、現実的な解決手段として、先端技術である歩行時のロボット機構は保ちつつ、立位時の予期しない外乱に対する姿勢応答を装具支柱の剛性最適化で対応する「短下肢装具のハイブリッド化」を提案する。これまでの装具支柱の剛性最適化は、支柱のみでの滑らかな歩行運動生成に主眼が置かれており、外乱時の立位姿勢応答における最適化は検討されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、立位時の予期しない外乱に対する姿勢応答と装具支柱剛性との関係性を検討し、短下肢装具型ロボットにおける剛性最適値を明らかにする事である。

3. 研究の方法

本研究は3つの研究を行った。

(研究1)

本研究では実験環境を構築する事を目的とした。具体的には、計測項目や解析項目を決め、外部制御可能な床反力計内蔵トレッドミル、三次元動作解析装置、表面筋電計を用いた同期計測システムの構築ならびに計測プログラムをLabVIEWによって作成した。

(研究2)

本研究の目的は、立位時の予期しない外乱に対する姿勢応答について、十分に高い支柱の剛性を持つ短下肢装具によって足関節を固定した場合と、下肢装具を装着せずに足関節を固定しない場合とで比較し、立位外乱応答に対する足関節固定の影響を明らかにすることであった。

対象者は健常成人8名とした。実験手順は、まず実験開始前に対象者の両側下肢に短下肢装具(RAPS-AFO)を装着して、三次元動作解析用カラーマーカを骨盤(腸骨稜)、股関節(上前腸骨棘と大転子を結んだ直線上の大転子から1/3の位置)、膝関節(大腿骨外側上顆の前後径の中心)、足関節(外果)、足指(第5中足骨骨頭)の体表に貼付した。

対象者には床反力計内蔵トレッドミル上で立位をとらせた。対象者の視線は前方の注視点に向けさせた(図1)。上肢は胸の前で組ませた。安定した立位姿勢を確認後、無作為なタイミングでトレッドミルベルトを 20m/s^2 の加速度で20cm前方駆動して対象者に外乱刺激を与えた。対象者には、外乱刺激後も立位を保持させた。対象者の立位姿勢が再び安定するまで計測を継続した。実験条件は、十分に高い支柱の剛性を持つ短下肢装具によって足関節を固定した場合と下肢装具を装着せず足関節を固定しない場合との2条件とした。計測は各条件3回行った。外乱刺激後にステップ反応や上肢支持を認めた時は再計測した。



図1 実験場面

評価は、身体重心の前後変化量、股関節と足関節の関節角度変化量とした。下肢関節角度は三次元動作解析機器を用いた。解析は各対象者で変化量を求めた後、足関節固定の有無について対応のある t 検定を用いて有意差検定を行った。有意水準は 5% とした。

(研究 3)

本研究の目的は、複数の剛性を持つ短下肢装具によって、ある程度の足関節運動を許容した場合における外乱に対する立位姿勢応答の比較をすることで、立位外乱応答に対する装具支柱剛性の違いによる影響を明らかにすることであった。

対象者は健常成人 6 名とした。実験手順は、まず実験開始前に対象者の両側下肢に短下肢装具 (RAPS-AFO) を装着させ、三次元動作解析用カラーマーカを骨盤 (腸骨稜)、股関節 (上前腸骨棘と大転子を結んだ直線上の大転子から 1/3 の位置)、膝関節 (大腿骨外側上顆の前後径の中心)、足関節 (外果)、足指 (第 5 中足骨骨頭) の体表に貼付した。

対象者には、床反力計内蔵トレッドミル上で安静立位をとらせた。対象者の視線は前方の注視点に向けさせ、上肢は胸の前で組ませた。その後、立位保持の継続を指示して無作為なタイミングでトレッドミルベルトを 20m/s^2 の加速度で 20cm 前方駆動した。対象者が再び安定立位となるまで計測を続けた。実験条件は、剛性の異なる装具支柱 5 条件 (剛性の高い方から、アルミ、リジット、セミリジット、スタンダード、フレキシブル) と裸足の計 6 条件とした。計測は、各条件 3 回測定した。外乱刺激後にステップ反応や上肢支持を認めた時は再計測した。

評価は、身体重心の前後変化量、股関節、膝関節、足関節の関節角度最大値、および下肢筋活動とした。下肢関節角度は三次元動作解析機器を用いた。下肢筋活動は表面筋電計を用いた。筋活動電位の導出筋は、左脚の大腿四頭筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、内側腓腹筋とした。表面筋電図の電極は各筋の筋腹に貼付した。得られた筋活動電位は RMS 処理を行い、最大筋活動時の筋活動電位に対する割合を算出してその後の解析に用いた (%MVC)。

統計学的解析は、支柱間の比較として対応のある一元配置分散分析を行い、必要に応じて Bonferroni の多重比較補正を用いて有意差検定を行った。有意水準は 5% とした。

4. 研究成果

(研究 1)

計測および解析項目の決定と実験プログラムの作成を行った。

ヒトを対象とした実験を行う前に、作成プログラムを用いて床反力計内蔵トレッドミル上に 20kg の重錘設置し、外乱刺激時の重心移動を計測した。その結果、作成プログラムによってデータの同期集録が可能となった。さらに、得られたデータは外乱刺激方向に関わらず重心移動軌跡が確認できた。本結果によって床反力計内蔵トレッドミルを用いた外乱刺激計測システムが作成できた。

(研究 2)

実験の結果、身体重心の前後変化量は、足関節の固定あり $19.9 \pm 4.3\text{cm}$ 、足関節の固定なし $18.4 \pm 4.6\text{cm}$ であり、条件間に有意な差は認めなかった。一方、股関節角度は、足関節を固定あり 14.0 ± 6.0 度、足関節固定なし 9.2 ± 2.1 度と両条件間に有意差を認めた。足関節角度は足関節を固定あり 3.8 ± 0.9 度、足関節固定なし 8.7 ± 3.1 度であり有意な角度の増大を認めた。

(研究 3)

身体重心の前後変化量は、装具支柱の剛性が高い方から $22.4 \pm 12.3\text{cm}$ 、 $17.8 \pm 4.6\text{cm}$ 、 $17.9 \pm 4.9\text{cm}$ 、 $18.7 \pm 5.9\text{cm}$ 、 $15.1 \pm 3.9\text{cm}$ 、裸足 $23.1 \pm 14.9\text{cm}$ であり、条件間に有意な差は認めなかった (図 2)。

股関節角度 (伸展を-と表現) は装具支柱の剛性が高い方から -0.08 ± 3.5 度、 0.06 ± 2.8 度、 0.6 ± 2.2 度、 -0.8 ± 1.8 度、 0.1 ± 2.5 度、裸足 0.8 ± 2.6 度であった。膝関節角度は 1.7 ± 1.4 度、 2.6 ± 1.1 度、 1.6 ± 1.6 度、 1.3 ± 1.9 度、 1.3 ± 1.7 度、裸足 2.9 ± 1.5 度であった。足関節角度は、 0.8 ± 2.9 度、 -1.4 ± 3.6 度、 -0.6 ± 2.7 度、 -0.3 ± 3.6 度、 -0.4 ± 3.2 度、裸足 4.9 ± 3.0 度であった。裸足の足関節角度のみ他条件よりも有意な角度増加を認めた (図 3)。

大腿四頭筋は $25.1 \pm 29.0\%$, $18.7 \pm 14.4\%$, $15.5 \pm 7.4\%$, $14.3 \pm 4.2\%$, $15.1 \pm 6.2\%$, 裸足 $16.3 \pm 16.4\%$, 大腿二頭筋は $5.6 \pm 7.3\%$, $5.7 \pm 8.0\%$, $5.9 \pm 8.4\%$, $5.6 \pm 7.7\%$, $6.1 \pm 8.0\%$, 裸足 $5.4 \pm 7.3\%$, 前脛骨筋は $33.9 \pm 54.5\%$, $34.9 \pm 51.1\%$, $38.2 \pm 49.9\%$, $36.0 \pm 47.7\%$, $37.5 \pm 57.3\%$, 裸足 $37.4 \pm 52.0\%$, 内側腓腹筋は $32.3 \pm 69.5\%$, $15.3 \pm 28.3\%$, $13.5 \pm 22.8\%$, $9.2 \pm 13.0\%$, $12.1 \pm 19.4\%$, 裸足 $13.2 \pm 21.5\%$ であった。下肢筋活動電位は、装具支柱の剛性の違いによって差を認めなかった。

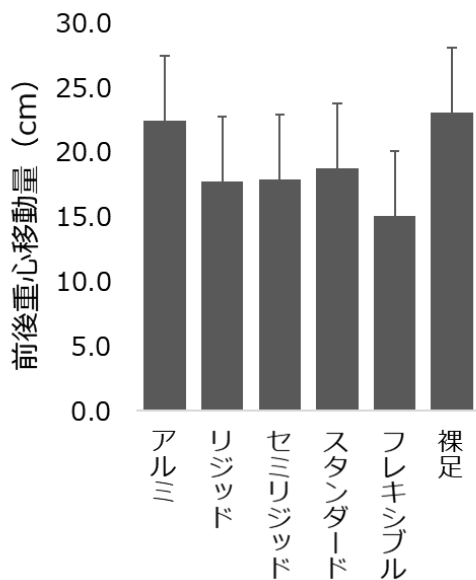


図2 重心の前後変化量

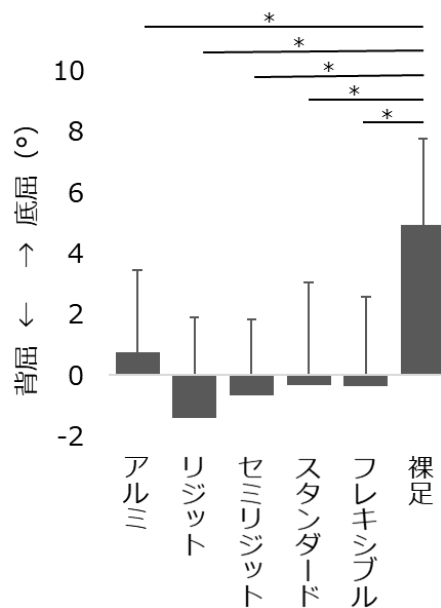


図3 足関節角度変化

身体重心の前後変化量は、装具支柱剛性によって差を認めなかった。さらに、支柱剛性強度に伴う下肢関節角度の増加も認めなかった。また下肢筋活動についても、本研究で与えた外乱刺激量の大きさにおいては、装具支柱剛性によって変化しないことが明らかになった。これらの結果によって、短下肢装具ロボットに立位姿勢制御機構を付与するためには、装具支柱以外の検討事項が必要である事がヒトに対する定量的検討によって得る事が出来た。しかしながら、本研究で用いた外乱刺激量が、重心移動量で天井効果を認めるほど大きく、装具支柱の撓みを利用した足関節制御ではなく、全身運動を利用した姿勢制御となった可能性も考えられる。したがって、今後は外乱刺激量を調整する事によって、装具支柱剛性が立位姿勢応答に与える詳細な影響を明らかにすべきと考えている。

5. 主な発表論文等

なし

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 0 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：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8 桁）：

(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。