

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：33910

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12610

研究課題名（和文）理学療法士の技術を模擬した在宅利用が可能な内反尖足進行予防機器の開発

研究課題名（英文）Development of a home-use ankle stretching machine for equinovarus with three dimensional control

研究代表者

宮本 靖義 (MIYAMOTO, Yasunori)

中部大学・医療技術実習センター・准教授

研究者番号：00612665

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、理学療法士の徒手ストレッチングの特徴を統計的に分析し、明らかにすること、および、三次元制動が可能な足部ストレッチング機器を開発することを目的として実験を実施した。その結果、理学療法士間に内在する脳卒中片麻痺患者に対する足部ストレッチング手技の共通性および個人差を特定することができた。理学療法士は共通して、背屈と外転を同時に加えて足部を制動していた。この動きを参考に、2本のワイヤ駆動機構を用いて安全性の高い足部ストレッチング機器を試作し、健常者を対象に、実際に三次元制動が可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：The aim of our study was to establish a method to statistically analyze the techniques of manual stretching for equinovarus, and to develop a three dimensional foot stretching machine that the patient can use for the treatment of equinovarus by him- or herself. Our method based on PCA enables the statistical analysis of the similarities and differences of complex manual stretching techniques among PTs. All PTs commonly transferred the diseased foot such that the symptomatic deformation (plantar flexion and adduction) of the foot was corrected. By adopting a cable-driven mechanism with two independently controllable pneumatic actuators, the stretching machine can apply the force on the foot along the dorsiflexion direction as well as the direction combining abduction and eversion. We verified the effectiveness of a prototype stretching machine for healthy subjects and dorsiflexion foot movement after adduction and inversion was performed during stretching by this prototype.

研究分野：福祉工学

キーワード：ストレッチング機器 徒手ストレッチング 内反尖足 足部三次元制動

1. 研究開始当初の背景

脳卒中は介護を要する原因の第1位である。介護を要する要因の一つである歩行能力の低下には、脳卒中の後遺症である内反尖足が関与している場合が多い。内反尖足に対する治療として、足部変形の原因となる筋の緊張を緩和するストレッチングが主に行われる。しかし、退院後の患者のリハビリテーションの頻度は、入院時に比べ格段に少なく、在宅で十分な量のストレッチングを受けることができない。そこで、患者自身が在宅で機器を用いてストレッチングを行う必要がある。我々の予備的調査で、臨床で行われる徒手によるストレッチングは、筋の走行や関節の構造、痙性の程度を考慮し、複雑な伸張力の調節と3次元的に複雑な方向の調節が行われていることがわかりつつある。それに対して、現存する下肢リハビリテーションロボットの多くは、1自由度しか可動性を有していない。また、そのほとんどが大型であり、現実的に在宅での利用は難しい。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究の目的を、内反尖足に対し臨床現場で行われているストレッチングに近い制動を可能とする機構を搭載した、在宅で利用できる小型の治療機器を開発することとした。

(1) 内反尖足は3次元的に足部が変形する症状であり、理学療法士の徒手によるストレッチングでは足部は3次元的に制動される。ストレッチング機器の機構開発のためには、理学療法士の徒手ストレッチングの特徴を明らかにする必要がある。よって、臨床現場で理学療法士が脳卒中後遺症者の足部に対して行う徒手ストレッチングを統計的に分析する。

(2) (1)で理学療法士の足部に対する徒手ストレッチングの特徴を明らかにした後、その特徴を参考に、足部を3次元的に制動することのできるストレッチング機器を試作し、健康者による有効性検証を実施する。

3. 研究の方法

(1) 理学療法士のストレッチング手技の分析

徒手ストレッチングは、療法士が自身の手で対象の抵抗を感じ取り、それに相応しい力量を調節しながら、対象部位を連続的かつ3次元的に押す、引く、捻じる行為である。そこで、ストレッチング手技を定量的に表現するために、対象に加えられる直線方向および回転方向への力の程度と対象部位の姿勢変化とを時系列的に計測した。

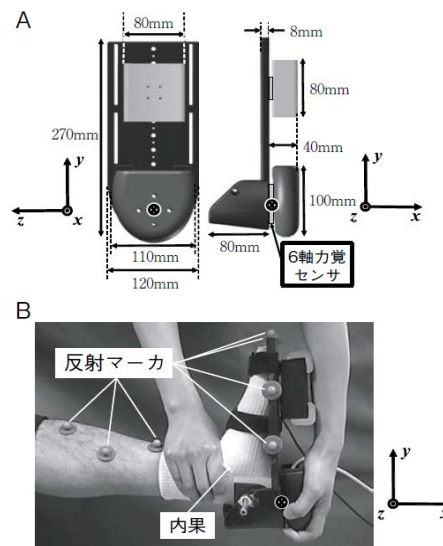
ストレッチング手技における力の計測には、6軸力覚センサ (IFS-67M25A50-I40, ニッタ社製) を踵部に内蔵した自作の靴型の測定装置を用いた (図1, A)。一般に、理学

療法士は患者の踵を把持して足部をストレッチングする。よって、理学療法士が対象者の足底面に装着された測定装置の踵部を把持して足部をストレッチングすることで、踵部に加わる力とモーメントが計測される。一方、足部姿勢の計測には、三次元動作解析装置 (VENUS3D Ver4.0, ノビテック社製) を用いた。計測用の反射マーカは、脳卒中片麻痺患者の麻痺側下腿と麻痺側足部に装着した測定装置上に貼付した (図1, B)。下腿上の反射マーカは、脛骨前縁上に2点、それらの中央の高さの脛骨内側縁上に1点、計3点設置した。測定装置上の反射マーカは、装置足底面の前縁上に2点、内側縁上に2点、計4点設置した。これらのマーカ座標より下腿の姿勢と足部の姿勢を算出し、下腿に対して足部が3次元的にどのように動いたかをロール角・ピッチ角・ヨー角で算出することで、足部の3軸周りの角度変化を算出した。

計測実験には、脳卒中片麻痺患者に対するリハビリテーションの経験が4年以上ある理学療法士6名と痙性麻痺を有する脳卒中片麻痺患者3名 (年齢 77.7 ± 8.4 (平均 \pm 標準偏差) 歳) が参加した。上記の装置を装着した脳卒中後遺症者の足部を、理学療法士が10秒間ストレッチングした。幾つかの組み合わせで実験を実施し、合計81試行分のデータを取得した。得られた各変量についての時系列データについて、主成分分析を拡張して分析を実施した。

(2) 足部ストレッチング機器の試作および有効性検証

在宅での使用を最終目標とし、機器の小型化、操作の容易性、安全性を意識した上で、内反尖足位に対し、適切な方向に適切な力を加えてストレッチングすることができる機構の開発を目指し、ストレッチング機器を試作した。



●: センサ中心部 (座標原点)

図1 A: 測定装置の概要, B: 測定時の姿勢・力の計測に用いた反射マーカ位置および基準座標系。

ストレッチング機器は、足底板部、下腿支持部、および支柱からなる(図2)。足底板部は、前足部を底面から支持し、対象者にはベルトを用いて固定される。足底板部の両側にはワイヤが1本ずつ通してある。支柱部に固定されたアイドラを介して足底板部の2本のワイヤはそれぞれマッキベン型アクチュエータ(神田通信工業株式会社製)に接続されている。マッキベン型アクチュエータに加圧することで、アイドラを介して2本のワイヤを引き、足部をストレッチングする(図3)。

空気圧アクチュエータは電磁モータ以上に大きな力を発揮することができるため、変形の制動のために大きな出力が必要であるストレッチング機器に適している。さらに、空気圧アクチュエータとワイヤ駆動機構を使用することで人体の回転中心を活かすことができ、関節不整合による足部の関節への負荷を軽減することができる。加えて、空気圧アクチュエータを用いた場合、機構の剛性を下げるような設計が可能であり、機構の柔軟性を維持することで機器に固定された足部への負担を軽減することができる。

理学療法士の徒手ストレッチングでは、内反尖足を制動するために、背屈・外転・外がえし方向への力が加えられる。そこで本試作機では、足底板の両側に沿わせたワイヤを2本同時に引くことで足部を背屈し、外側のワイヤを独立に引くことで、足部に外転・外がえし方向の力を同時に加えることのできる機構を採用した。さらに、内反尖足は症状の程度によって足部の変形量が異なるため、ワイヤのコントロールだけでは吸収しきれない個人差については、足底板の柔軟性およびワイヤ駆動機構の柔軟性を利用して対応することとした。

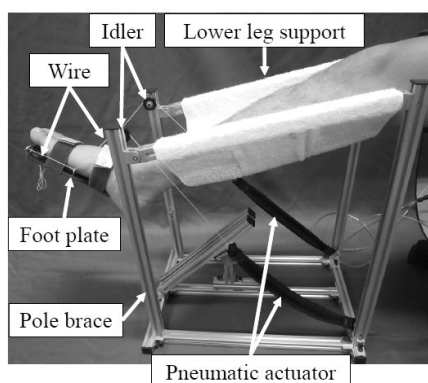


図2 試作機構造

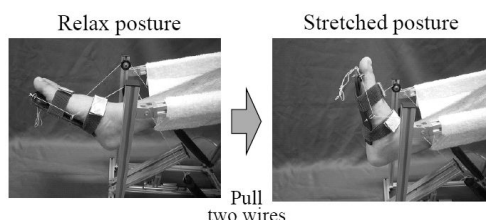


図3 ストレッチング動作

試作機の有効性検証では、椅子に腰かけた健常者(30歳)の右足部を本試作機にて制動し、三次元的な足部姿勢の制動が可能かどうかを検証した。脳卒中後遺症者の足部を模擬するため、開始肢位は意識的に内反尖足位を取るようにした。足部の姿勢の計測には、ゴニオメータ(SG110/A, Biometrics社製)を使用し、底背屈角度、内外転角度、内外がえし角度を得た。このとき、解剖学的基本肢位、つまり、足部が捻じらない状態で、爪先が真っ直ぐ前方を向き、下腿と足部が直角に位置する姿勢を、底背屈 0° 、内外転 0° 、内外がえし 0° とした。内反尖足位から正中位(内外転 0° 、内外がえし 0°)に近づけてから背屈方向への力を加えるため、初めに外側のワイヤを引き、次いで内側のワイヤを引いた。マッキベン型アクチュエータの制御は手動で行い、必要以上の圧が加わらないように配慮した。

4. 研究成果

(1) 足部ストレッチング手技の特徴

ストレッチングに関する先行研究では、その指標に底背屈回りの関節トルクが用いられることが多い¹⁾。しかし、これらの研究では機械によるストレッチングで生じる関節トルクを計測しており、セラピストの手技における力、モーメントを適切に計測しているものはない。今回、我々はストレッチング中に理学療法士が加える力とモーメントを計測できる測定装具を作製し、三次元動作解析装置と同期して理学療法士のストレッチング手技を計測した。これにより、ストレッチング手技における力、モーメントおよび対象部位の姿勢変化を時系列データとして得ることができた。

時系列で変化する動作の解析には、工学分野において、主成分分析を応用した方法が用いられている。特異値分解の適用範囲を拡張することで、時系列データの複数サンプル間に潜在する特徴を明らかにできるとされており²⁻⁴⁾、実際にヒトの上肢の運動解析や歩行の動作解析が行われている。本研究では、ストレッチング手技が作用力特性および患部姿勢の時系列変化で表現できるとし、この方法を用いて分析できると考えた。しかし、工学分野では、これまで複数の関節角度の時系列データしか分析対象とされていなかった。そこで我々は、この方法をさらに拡張することで、力、モーメントおよび角度で表現されるストレッチング手技を分析する方法を開発した。そして、この方法を用いて脳卒中片麻痺患者に対するストレッチング手技を分類した。これにより、これまで行われてこなかったストレッチング手技の統計的分析が可能となった。

拡張した主成分分析を行った結果、第1主成分の寄与率は68.8%、第2主成分は10.8%、第3主成分は8.3%であった。第1主成分は計測されたデータのばらつきを最も反映し、

ストレッチング手技の共通性を示す成分とみなせる。第2,3主成分については、その背後に隠れた個人差が生じる手技を示す成分とみなせる。主成分得点は、絶対値の大きさがその試行に対する各成分の影響力の大きさを示し、得点が負の場合はその成分は負の方向に影響する。第1主成分の主成分得点は全ての試行において正であった。第2,3主成分の主成分得点は試行毎にばらつきがみられたため、分布図にて図4に示す。

図5に、代表して第1主成分および第2主成分の因子負荷量を力、モーメント、角度毎に示す。因子負荷量については、その絶対値が大きい変量を各主成分の特性とみなすと、下記の通りそれぞれの成分が解釈できる。第1主成分は、わずかに踵を引きながら、爪先方向の力と背屈モーメントで足部を大きく背屈させ、徐々に外転方向の力を加えて足部を外転させるという手技を示した。全試行の第1主成分得点は正であったことから、全ての試行が第1主成分の正の影響を受ける。つまり、第1主成分の特徴は背屈と外転を同時に加えて足部を制動するという手技の共通性を示す。これは、内反尖足に対するストレッチング手技として、解剖学的にも合理的かつ標準的な手技である。ただ、本実験では踵部の制動にのみ着目していたため、今後前足部に加わる力についても計測し、前足部、踵部それぞれにどのような力やモーメントが生じ、合力として足部全体にどのように作用しているかを確認する必要がある。一方、第2主成分では、 z の因子負荷量が第1主成分の特徴と反対の特徴を示したことから、第1主成分の特徴を打ち消すため、あまり背屈せず内転モーメントと回外モーメントを加えるという特徴を示した。すなわち、主成分得点の大きさが、内反変形に抗するモーメントをどの程度加えるか、そしてどの程度背屈させるかの違いを示す個人差の成分である。あまり背屈せず内転モーメントと回外モーメントを加えるという手技は、足部の内がえしを効率的に矯正するには適さないと考えられる。同様に第3主成分の因子負荷量を確認した結果、第3主成分の因子負荷量は、足底面方向へ踵を引くという特徴を示した。すなわち、この成分は、踵を足底面方向へ引く、もしくは頭方向へ押す力の違いを示す個人差の成分であった。足底面へ踵を引く力については、距腿関節を離開し、距骨の滑りを誘導することで確実に背屈を行おうとする手技を示していると考えられる。

拡張した主成分分析を用いたことにより、ストレッチング手技の共通性および個人差を抽出することができた。これにより得られた手技の特徴は、複数の理学療法士および患者の特徴を包含している。今後、理学療法士の特徴を明らかにしたい場合は、同一の患者に対する複数の理学療法士の手技を解析し、患者の特徴を明らかにしたい場合は、同一の理学療法士の複数の患者への手技を解析す

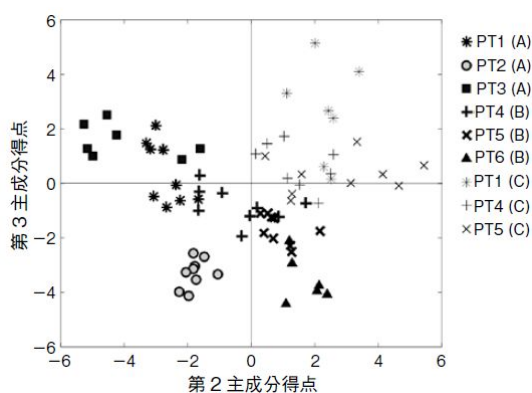


図4 全試行の第2主成分得点、第3主成分得点の分布図。6名のPT (PT1-6)が3名の患者(A, B, C)に対して行ったストレッチング全試行について、主成分分析によって得られた第2,3主成分の主成分得点を示す。

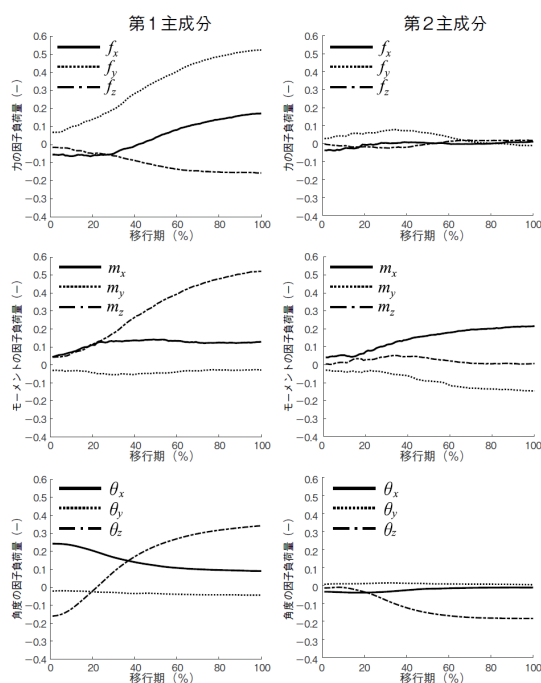


図5 第1主成分、第2主成分の因子負荷量

る必要があることに留意しなければならない。

(2) ストレッチング機器の有効性検証

図6に、試作機によるストレッチング実験中の足部3軸周りの角度の変化、およびマッキベン型アクチュエータへの加圧量を示す。はじめに外側のアクチュエータへの加圧量を増やし、外側のワイヤを引き始めると、底背屈、内外がえし、および内外転の全ての角度が増大した。これは、内反尖足であった足部が外転・外がえし・背屈方向へと制動されたことを示す。次いで内側のアクチュエータへ加圧し、内側のワイヤも合わせて引いたところ、さらに底背屈の角度が増大した。これは、両側のワイヤを同時に引くことでさらに背屈方向へ足部を押し込むことができたことを示す。また、減圧するとそれぞれの角

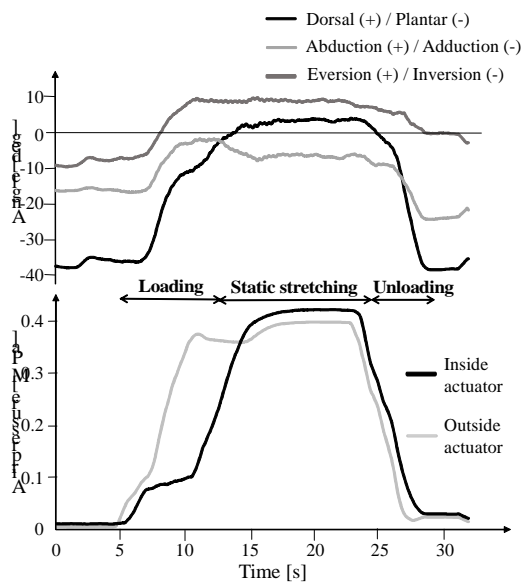


図 6 ストレッチング中の足部姿勢（上）および空気圧アクチュエータへの加圧量（下）。
 (Dorsal/Plantar: 背屈/底屈, Abduction/adduction: 外転/内転, Eversion/Inversion: 外がえし/内がえし.)

度は減少し、開始肢位へ戻った。

以上のことから、われわれが試作したストレッチング機器を用い、内外側のワイヤを適切なタイミングで引くことで足部を三次元的に制動できることが確認された。これにより、本試作機にて内反尖足を適切にストレッチングできる可能性が示唆された。今後は、内外側のアクチュエータへの加圧量を調整し、内反尖足の制動に適切な加圧比を検討する必要がある。そして、本試作機によるストレッチングの前後の足部可動域の変化や筋粘弾性の変化を計測することで効果検証を行い、本試作機の効果を明らかにしていく。

<引用文献>

- 1) Bressel E, McNair PJ: The effect of prolonged static and cyclic stretching on ankle joint stiffness, torque relaxation, and gait in people with stroke. *Physical Therapy*. vol.82, no.9, pp. 880-887, 2002.
- 2) 井手 剛, 井上恵介: 非線形変換を利用した時系列データからの知識発見. 第4回データマイニングワークショップ (DM2004) 論文集, pp.1-8, 2004.
- 3) Bokman L, Syungkwon R, Park FC: Movement primitives, principal component analysis, and the efficient generation of natural motions. *IEEE Robotics and Automation Society, ICRA*, pp.4630-4635, 2005.
- 4) Nakanishi H, Kanata S, Hattori H, et al.: Extraction of coordinative structures of motions by segmentation using singular spectrum transformation. *J Adv Comput Intell and Intell Info*, vol.15, no.8, pp.1019-1029, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

山田 南欧美, 岡本 正吾, 山田 陽滋, 磯貝 香, 宮本 靖義, 河上 敬介, “脳卒中片麻痺患者の内反尖足に対する足部ストレッチング手技の主成分分析”, *理学療法科学*, 31 巻 5 号, pp.705-710, 2016.(査読有)
 DOI: 10.1589/rika.31.705

〔学会発表〕(計2件)

山田南欧美, 岡本正吾, 秋山靖博, 磯貝香, 宮本靖義, 山田陽滋, “足部三次元制動機器の有効性検証”, 第26回愛知県理学療法学会大会, 2017年3月5日, 愛知県産業労働センター ウィンクあいち(愛知県名古屋市).

山田南欧美, 岡本正吾, 秋山靖博, 磯貝香, 山田陽滋, 宮本靖義, “内反尖足に対する三次元制動が可能な足部ストレッチング機器の開発”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月15日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市).

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 3次元制動が可能な足関節用ストレッチング機器
 発明者: 山田陽滋, 岡本正吾, 山田南欧美
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特願 2016-172168
 出願年月日: 平成 28 年 9 月 2 日
 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮本 靖義 (MIYAMOTO, Yasunori)
 中部大学・医療技術実習センター・准教授
 研究者番号: 00612665

(2)研究分担者

山田 陽滋 (YAMADA, Yoji)
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 90166744

河上 敬介 (KAWAKAMI, Keisuke)
 大分大学・福祉健康科学部・教授
 研究者番号: 60195047

磯貝 香 (ISOGAI, Kaoru)
 常葉大学・保健医療学部・教授
 研究者番号: 00549496

(3)研究協力者

山田 南欧美 (YAMADA, Naomi)