

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：34314

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350677

研究課題名(和文) 足関節制御型短下肢装具による歩行支援システムの開発と臨床評価による検証

研究課題名(英文) Development of walking support system with the ankle controllable ankle foot orthosis and inspection by clinical evaluation

研究代表者

谷田 惣亮 (TANIDA, SOSUKE)

佛教大学・保健医療技術学部・講師

研究者番号：20584494

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)：足関節を制御可能な制御型短下肢装具(i-AFO)による歩行支援システムの開発・改良と、臨床評価による検証を行うことを目的に実施した。

研究成果として、(1)新たに開発した計測システムにより歩行データを収集した。(2)得られたデータを用いてi-AFOの最適な足関節制御モデルを構築し、歩行速度に応じて自動的に制御パラメータを調整する方法を考案した。(3)有患者による臨床評価により、様々な歩行速度において足関節の自動制御が可能となった。(4)より実用性の高い簡易装具としての足関節サポータを開発し、下肢機能障害者のさらなる歩行支援を推進した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to improve a walking support system by the controllable ankle foot orthosis (i-AFO) which can control an ankle, and to inspect these by clinical evaluations. Results of research are to have collected walking data by using the instrumentation system which we developed newly. By using these walking data that we got, we made an optimal ankle control model of i-AFO. In clinical evaluations, as for the patient who attached i-AFO, the automatic control of the ankle was enabled in various walking speed. We developed a practical new walking support device.

研究分野：人間医工学，リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：リハビリテーション工学 福祉工学 歩行支援 短下肢装具

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 学術的背景

厚生労働省の身体障害児・者実態調査「障害の種類別にみた身体障害者数の推移」では身体障害者数は年々増加する傾向にあり、約400万人に達している。その内訳では、肢体不自由がその半数を占め、さらに肢体不自由のうち約1/3が下肢の機能障害を呈している。下肢の機能障害の原因としては脳卒中をはじめ様々な疾患がある。特に下肢の障害は歩行動作に影響を及ぼすことになる。人にとって移動能力としての歩行動作は日常生活活動(ADL)の自立にとって、さらには生活の質(QOL)を向上させるものとして重要な要素である。歩行障害は、患者およびその家族の日常生活における負担を大きくするため、早期の歩行リハビリテーションおよび適切な歩行補助具の使用は社会福祉の向上に欠かせない重要な課題となっている。臨床では、歩行を補助するものとして、補助具や様々な装具が開発されている。なかでも短下肢装具(Ankle foot orthosis: AFO)は歩行補助具としてよく使用され、その種類も多様である[1]。

こういった現状から、足関節を制御可能な装具として、制御型短下肢装具(Intelligent-AFO: i-AFO)を開発・改良してきた(図1)。この研究は、大阪大学古荘研究室でH17-19年度においてNEDO(人間支援型ロボット実用化基盤技術開発)の助成を受け行ってきた経緯がある[2]。従来の先行研究では、電子制御により足関節トルクを制御する短下肢装具の研究が報告されているが[3]、アクチュエータを用いた動的装具では、大型で重量が重いことが問題となる。一部、空気圧アクチュエータを用いて軽量化を図ったものもあるが、空気の弾性変形により制御性能が低下してしまい実用的でない。本研究では機能性流体であるMR流体を用い、独自に小型軽量化したブレーキを作製し、これを制御することで足関節制御を行っている点が特徴である。本研究で用いるブレーキは安全性が高い上に数ミリ秒の高速な応答が可能であり、他と比べて独創性・有効性が高い。また、健常者と足関節の制御が困難な有疾患患者では、足関節の制御機能が異なる。そのため、健常者での歩行特性を分析し、それをもとに制御モデルを構築することで、より正常に近い歩行支援を提供できると予想される。また、本研究の成果により、正常歩行における基礎的データが得られることや、制御装具だけでなく他の歩行支援に関する装置の設計や制御指針にも有益であることから学術的意義が高いといえる。

### (2) これまでの研究経緯

これまでの研究活動により、歩行速度と立脚初期の足関節の底屈角速度には強い相関があることが確認され[4]、この関係をモデル化することにより歩行速度を計測し、フィードバックすることによって歩行速度に合

わせた最適な歩容を実現できる可能性が高いことがわかった。そこで、我々は、平成23~24年度科学研究費助成事業(課題番号23700675)において、足関節のブレーキトルクをインテリジェントに制御可能なi-AFOに対し、歩行速度に合わせた適切なブレーキトルク制御入力を行うことにより、歩行速度に応じた最適な歩容の制御を実現することを目的に研究を進めてきた。この研究で、歩行速度と歩幅や足関節底屈角速度とが高い相関関係があることを明らかにした。

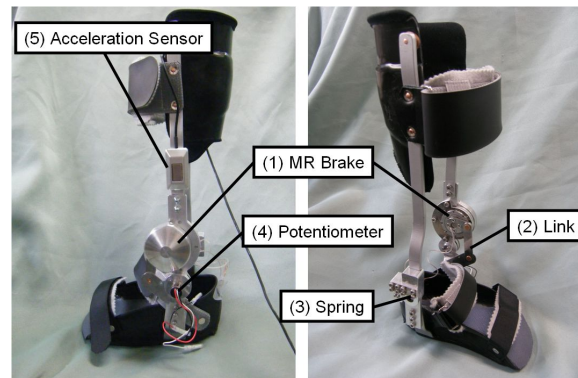


図1 制御型短下肢装具(i-AFO)

## 2. 研究の目的

本研究は、先述の学術的背景および研究経緯をふまえて、開発してきたi-AFOによる歩行支援システムの開発・改良と、その検証のための臨床評価を行うことを目的に実施した。

具体的な目的としては、(1)継手軸が調整可能な計測用短下肢装具を開発して歩行データを収集することで、(2)i-AFOの最適な足関節制御モデルを構築し、(3)有疾患患者による臨床評価からi-AFOおよび制御モデルの有効性を検証することにより下肢機能障害者の歩行改善を目指すことである。

### (1) 計測用短下肢装具の開発と歩行データ収集

先行研究による健常人を対象とした予備的実験から、歩行に関していくつかの所見を得た。これらをもとにさらに歩行データを集積することで、より正常に近い歩行支援が可能になると考えられる。しかし、現在使用している装具は障害者個人に適合した装具であるため、多くの被験者で評価実験を行うことが困難である。そこで、各被験者に応じてサイズが変更可能な短下肢装具を作製し、さらにフットスイッチや加速度、角度、圧などの計測センサを搭載した計測用短下肢装具を開発する。先行研究でも試作を行ってきているが、さらなる軽量化、小型化を図り、装着や使用に際して負担の少ない装具を開発する。

### (2) i-AFOの足関節制御モデルの構築

(1)で得られた歩行データから歩行条件によって変化する歩行パラメータを抽出し

制御モデルを構築する。また、健常者と有患者の足関節制御の違いや、各疾患や症状の程度（麻痺、随意性の程度）による足関節の制御機能の違いを分析し、各症例に応じた的確な支援機構を構築する。その中で、次の有患者を対象とした実験の基盤を作る。

#### (3) 有患者による臨床評価

i-AFO のセンサ系を整備し、実際の有患者者（足関節弛緩性麻痺）を対象に足関節制御による歩行支援を行う。歩行速度に応じた足関節制御については先行研究により有効性を実証できたが、歩行速度の把握に時間を要するため速度変化への応答が不安定となる課題があった。(1),(2)より得られた結果から、さらに精度の高い応答性に優れた歩行パラメータを抽出することで、より正常に近い足関節制御モデルを構築し、有患者者でも有効に機能するかを臨床評価から検証する。

### 3. 研究の方法

研究目的の(1)~(3)を達成するために、下記の5つの事項を実施した。

- (1) 継手軸が調整可能な計測用短下肢装具を開発する。
- (2) 健常者による歩行実験を行い、歩行データを収集する。
- (3)(2)のデータから i-AFO の制御モデルを構築する。
- (4) i-AFO を用いて、有患者者による歩行実験を行う。
- (5) i-AFO および制御モデルの構築・改善をする。

#### 【平成 26 年度】

##### (1) 計測用短下肢装具の開発

継手軸が調整可能な計測用短下肢装具を開発する（改良・改善）。先行研究での試作をもとに、複数の被験者に装着できるように調整可能な下腿部および足部アタッチメントを製作し、これに各計測センサ（フットスイッチ、加速度・角度センサ等）を搭載した計測用短下肢装具を開発する。また、より簡易に歩行データを計測・収集できる新たな計測システムについても開発を行う。

##### (2) 健常者での歩行実験による歩行データ収集

現有の3次元動作解析装置、または新たな計測システムを使用し、健常成人の被験者に対して歩行実験を行う。歩行については異なる歩行速度（通常速度、低速、高速）に対して計測を実施し、足関節に関する歩行データを収集する。

#### 【平成 27 年度】

##### (3) 制御モデルの構築

事項(2)によって得られた評価結果から i-AFO の足関節制御モデルを構築し、改良と改善を行う。制御モデルは先行研究での検証もふまえ、さらに様々な歩行パターンに応じた実用性の高いものを構築する。

##### (4) 有患者者による歩行実験

有患者者に対して i-AFO を装着させ、歩行実験を行う。評価には、現有のビデオカメラによるマルチ移動・動作分析解析システム（ICpro-Analyze：ユニメック社製）および事項(2)で用いた計測システムを使い、下肢関節角度等の計測項目より、歩行状態の改善を客観的に実証する。対象者は脳卒中や神経筋疾患、末梢神経損傷等により足関節の制御が困難な有患者者とする。

#### 【平成 28 年度】

##### (5) i-AFO および制御モデルの構築・改善

上記で実施した実験結果から、i-AFO の改良を行い、小型・軽量化を含めて負担の少ない装具の実現を行う。改良については、必要なセンサ系の設置、軽量化のための部品素材の変更を行う。同時に、最適な制御が可能となるように制御モデルについても改善をすることで、足関節制御型短下肢装具による歩行支援システムを構築する。

### 4. 研究成果

#### 【平成 26 年度】

研究の方法に示した(1),(2)の事項について実施した。

歩行データの収集のためには、歩行分析が必要である。開発・改良した計測用短下肢装具は、下肢の運動を阻害することがあることや重量があるため歩行動作に影響がある。また、測定においては一般的なモーションキャプチャは大きなスペースが必要で、さらに接地判定を行うにはフォースプレート等が必要で大掛かりになる。これらの問題を解決するために、より正常な歩行を動画撮影により簡易に計測できるシステムを考案した。そのため、ビデオカメラの動画からつま先および踵の接地状態と足関節角度の関係を容易に計測するための計測システムの開発も行った。

まず、矢状面における簡易接地判定システム（図2）を開発した。接地判定システムは足底にフットスイッチ（Toe switch, Heel switch）を装着し、スイッチの on/off によ

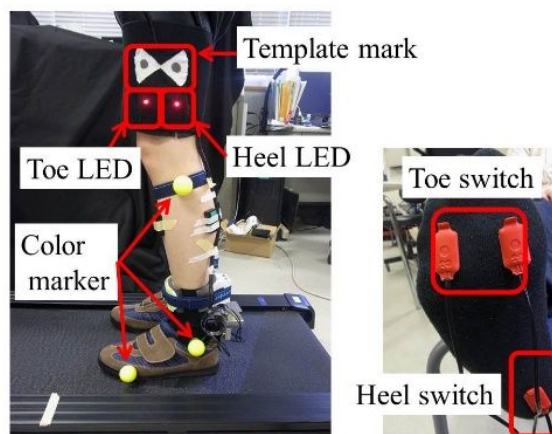


図2 計測システム

りつま先の LED (Toe LED) または踵の LED (Heel LED) が点滅しソフトウェアによって状態 0~3 (状態 0: 遊脚期, 状態 1: 踵, 状態 2: つま先・踵, 状態 3: つま先) で判定される。C 言語及び OpenCV を使用して接地判定と足関節角度を測定するソフトウェアを開発した。テンプレートマッチング法によりテンプレートマーク領域を追跡し、その下方にある LED 領域の二値化量で接地状態の判定を行う。また、図 2 のようにカラーマーカーをつま先, 足関節, 膝関節に取り付け接地判定と同時に足関節角度を分析することができるようにした。

開発した計測システムを使用し、健常被験者に対して歩行実験を行った。歩行については異なる歩行速度 (通常速度, 低速, 高速) に対して計測を実施し、特に我々の研究に必要な足関節に関する歩行データを収集した。その結果、立脚初期底屈時間は歩行速度の依存性が低いこと、立脚初期底屈角速度と歩行速度の間にはおおよそ比例関係があること、歩幅と歩行速度の間には高い相関があることなどが明らかになった。

#### 【平成 27 年度】

研究の方法に示した (3), (4) の事項について実施した。

事項 (3) については、これまでに集積・解析してきた歩行データから歩行条件によって変化する歩行パラメータを抽出した。健常者歩行において、歩行速度と各種パラメータ (歩行周期, 歩幅, 底屈角速度) の関係を解析した結果、歩行速度と歩幅および歩行の立脚初期の初期接地 (Initial Contact: IC) から荷重応答期 (Loading Response: LR) までの底屈角速度に有意な相関関係がみられ、これを制御モデルに用いることで歩容が改善できる可能性が高いことがわかった。歩行速度と歩幅ならびに底屈角速度の関係にはおよそ直線的な関係があることから、歩行周期を計測することで歩行速度を推定し、足関節を自動的に制御する制御モデルを構築した。

事項 (4) については、足関節の制御が困難な有患者を対象とした歩行実験による臨床評価を通して、歩行速度に応じて足関節を自動的に制御する制御モデルの検証を行った。

被験者は、ギランバレー症候群の男性とした。なお、被験者には同意書をもとに十分な説明と同意を行い、実験中の転倒等の事故防止のために常時サポートできる体制で実施した。

方法は、被験者に i-AFO を装着させトレッドミル上を歩行させた。トレッドミルの速度は測定者により連続的にランダムに変更し (1.3~2.5km/h), その設定された速度に応じて歩行させた。種々の歩行速度で歩行を行った際の足関節の関節角度および底屈角速度を測定することで、新たに提案する歩行速

度に応じた足関節の自動制御モデルの有効性を検証した。

結果から、i-AFO のセンサで計測された歩行周期をもとに算出した推定歩行速度は、トレッドミルの速度と近値を示したことから、歩行速度が適切に推定され、それにもとづく立脚初期の足関節底屈角速度制御が実現できた。また、立脚初期の底屈角速度の実測値においても推定歩行速度から算出された底屈角速度の目標値に近似しており、足関節の制御が裏付けられた (図 3)。さらに、各歩行速度から得られた足関節角度では、歩行速度の上昇にともなって足関節の底屈角速度のピーク値が増大する結果となったが、これには歩幅 (ストライド長) の延長が関係していると考えられた。

今回の検証から、歩行速度に応じた足関節の自動制御が実証された。このことから、歩行速度の変更が容易になり、歩行の自由度の向上につながることでより実用的な使用が可能になると考えられた。

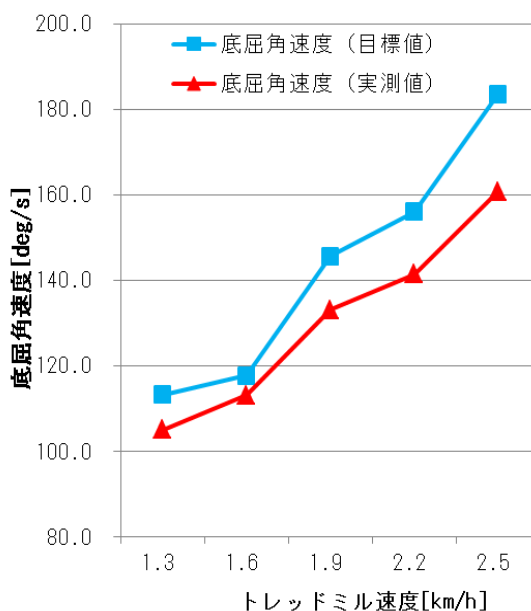


図 3 各歩行速度における足関節底屈角速度

#### 【平成 28 年度】

研究の方法の (5) の事項について実施した。

これまでの研究から、i-AFO の更なる軽量化と簡易化が改めて再認識されたことや、より適用範囲が広い装具の必要性から、身体への負担が少なく生体適合性の高い簡易装具の研究開発を実施した。そのため、これまでの成果を応用し、弾性体内蔵型柔軟関節 (elastomer-embedded flexible joint, EEFJ) を有する簡易型装具としての足関節サポータの開発を行った (図 4)。この足関節サポータは C 型板ばねと円形エラストマの組み合わせで構成され、足関節背屈方向へは、C 型板ばねの弾性力のみで柔軟に運動でき、底屈方向へは、C 型板ばねの閉構造によって円

形エラストマを締め付け、大きなトルクを発生させることで足関節の底背屈を制動するように設計した(図5)。また、矢状面内に固定された回転中心を持たないため、被験者の足関節軸の運動を妨げないという特徴を有する。足関節の制御については、フィードフォワードによる制御であるが、軽量化と簡素化を実現できるとともに、虚弱高齢者などより幅広い対象者に対して適用する事ができ、汎用性が高くなった。



図4 弾性体内蔵型柔軟関節を搭載した足関節サポータの装着図

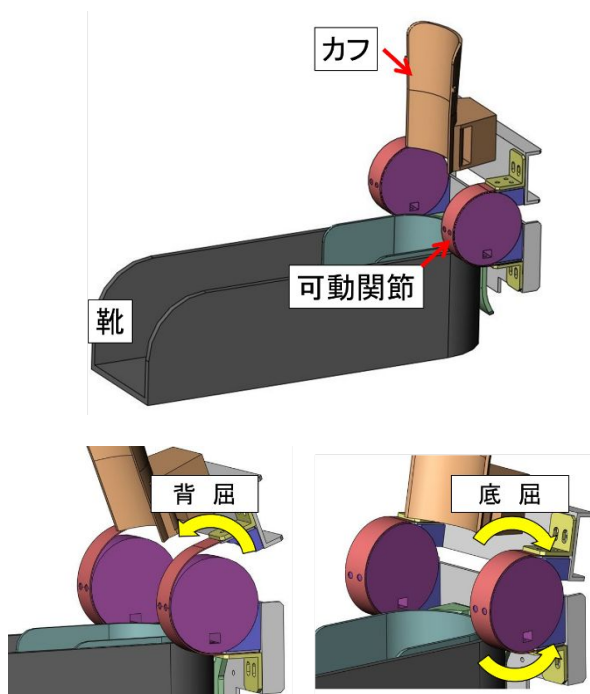


図5 足関節サポータの概念図

研究期間全体を通じて、制御型短下肢装具とその制御機構を開発・改良した。結果、足関節部のMR流体ブレーキにより、歩行立脚初期において歩行速度に応じて足関節の底屈角速度を制御することで良好な歩行が可能となった。さらに、歩行速度に応じて制御パラメータを自動的に変化させる方法を考案した。有患者による臨床評価では、様々な歩行速度に応じた足関節の自動制御が可能となり、その有効性を立証した。また、最終年度において、より実用性の高い簡易装具としての足関節サポータを開発した。今後は、さらに改良を重ねるとともに、有患者や虚弱高齢者など歩行機能の低下した者に対して臨床評価を行っていく予定である。

#### 文献

- [1] 渡辺英夫：日本義肢装具学会誌，23(2)：107-112，2007。
- [2] 古荘純次・他：日本ロボット学会誌，25(6)：867-873，2007。
- [3] Blaya JA：IEEE Transactions on Neural System and Rehabilitation Engineering.12(1)：23-31，2004。
- [4] 谷田惣亮・他：日本生体医工学会誌，48(1)：50-58，2010。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

- 1) 谷田惣亮，菊池武士，阿部功，安田孝志：足関節制御型短下肢装具による歩行支援システムの開発。The Journal of Clinical Physical Therapy,印刷中,2017(査読有)。
- 2) 阿部功，菊池武士，甲斐亮平，谷田惣亮：弾性体内蔵柔軟関節を持つ足関節サポータの開発。日本機械学会学術誌C編,82,1-12,2016(査読有)。
- 3) 谷田惣亮，安田孝志：足関節制御型短下肢装具による歩行支援システムの開発。地域ケアリング,Vol.18 No.12,2016,52-54(査読無)。
- 4) 谷田惣亮，菊池武士，安田孝志，小澤拓也，藤川孝満：制御型短下肢装具の開発と臨床評価に関する研究-足関節角度および角速度の分析による足関節自動制御の検証-。佛教大学保健医療技術学部論集 第9号,1-11,2015(査読有)。

[学会発表](計6件)

- 1) 阿部功，菊池武士，谷田惣亮：Ankle supporter with elastomer-embedded flexible joint. 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2016年12月13-15日, Sapporo Convention Center (Sapporo,

- Japan).
- 2) 菊池武士,阿部功,石谷公平,谷田惣亮,安田孝志:非線形コンプライアント関節を有する足関節サポータ.第37回バイオメカニズム学術講演会,2016年11月13日,富山県立大学(富山県射水市).
  - 3) 甲斐亮平,阿部功,菊池武士,谷田惣亮:生体適合性の高い簡易装具の研究開発および基礎評価.日本機械学会2015年ロボティクス/メカトロニクス講演,2015年5月19日,みやこめっせ(京都府京都市).
  - 4) 菊池武士,阿部功,甲斐亮平,谷田惣亮:適合性の高い装具継手のための基礎研究.第15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,2014年12月16日,東京ビッグサイト(東京都江東区).
  - 5) 甲斐亮平,阿部功,菊池武士,谷田惣亮:足関節運動データ分析のための簡易測定システムの開発.日本機械学会九州支部大分講演会,2014年9月20日,ホルトホール大分(大分県大分市).
  - 6) 阿部功,甲斐亮平,菊池武士,谷田惣亮:立脚初期に注目した新規短下肢装具の開発に関する研究.第32回日本ロボット学会,2014年9月5日,九州産業大学(福岡県福岡市).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

谷田 惣亮 (TANIDA SOSUKE)  
佛教大学・保健医療技術学部・講師  
研究者番号:20584494

### (2)研究分担者

菊池 武士 (KIKUCHI TAKEHITO)  
大分大学・工学部・准教授  
研究者番号:10372137

### (3)研究協力者

藤川 孝満 (FUJIKAWA TAKAMITSU)  
佛教大学・保健医療技術学部・教授  
研究者番号:10388697