

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：34314

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700675

研究課題名（和文）歩行速度に合わせて足関節の運動を自動調節する制御型短下肢装具

研究課題名（英文）Intelligently controllable ankle foot orthosis which can control of the ankle movement automatically on the basis of walking speed.

研究代表者

谷田 惣亮（TANIDA SOSUKE）

佛教大学・保健医療技術実習センター・講師

研究者番号：20584494

研究成果の概要（和文）：制御型短下肢装具（i-AFO）用の調整可能なアタッチメントを開発し、MR 流体ブレーキおよびセンサを組み込んだ継手軸調整可能短下肢装具を製作した。健常者歩行の分析により歩行速度と歩幅や足関節底屈角速度とが高い相関関係であることを明らかにした。この関係性から歩行速度を推定する方法を考案し、制御モデルを構築した。これらを用いて、健常者により制御モデルの評価を行った。さらに、障害者による臨床評価において、歩行速度が適切に推定され、推定歩行速度に応じた足関節のブレーキトルク制御が実現でき、歩行改善につながった。

研究成果の概要（英文）：We developed an adjustable attachment for intelligently controllable ankle foot orthosis (i-AFO) and produced the adjustable orthotic device which incorporated MR fluid brakes and sensors. We discovered that the relationship between walking speed and the angular velocity of ankle plantar flexion and also step length were high correlations by the analysis of the normal walk. Using this relationship, we devised a method to estimate walking speed, and built a control model. By using these devices and control model, we evaluated by a normal adult. In clinical evaluations by the handicapped person, walking speed was estimated adequately and could realize the braking torque control of the ankle which accepted estimated walking speed, and his gait was improved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：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：機械力学・制御，リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

脳卒中をはじめとして、さまざまな疾患により下肢機能に障害を持つものは多い。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、また生活の質（QOL）を向上させるものとして重要な要素である。そのため臨床では、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）**は歩行補助としてよく使用

され、その種類も多様である。

近年、電子制御によって足関節トルクを制御可能な短下肢装具の研究が多数報告されているが、アクチュエータを用いた動的な装具の場合、機器の大型化と重量の増加が問題となる。一部、空気圧アクチュエータもしくは受動素子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う。

そのような現状を踏まえ、大阪大学 古荘

研究室は 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、**制御型短下肢装具 i-AFO**を開発した(図 1)．この i-AFO には小型で高速にトルクを制御可能なコンパクト MR 流体ブレーキを搭載しており、各種センサによって歩行状態を判別し、適切なトルク制御によって歩行機能の改善を可能とした．ブレーキのみによりトルクを制御するため、安全性の高い装置となっている．

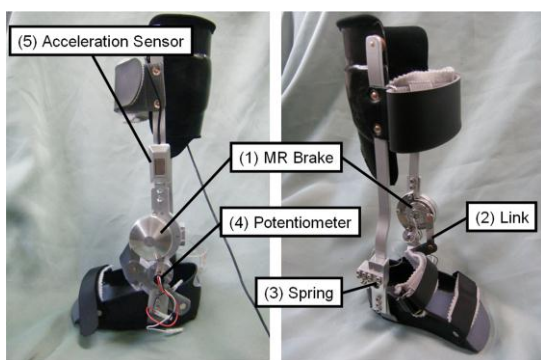


図 1 制御型短下肢装具 (i-AFO)

さらに H19-21 年に上記研究室において、「MR 流体ブレーキを用いたインテリジェント制御型歩行支援システムに関する研究」を実施した．その研究成果によって、i-AFO の軽量化と新規の制御方式の提案、さらに足関節弛緩性麻痺患者による評価実験を行った．

しかし従来の制御方法では、使用者の歩行速度に対して自動的に制御目標を調整する機能がなく、歩行速度は一定で、制御システムは事前に決められた目標で実施する必要があった．それゆえ、実際には目標歩行速度を事前に決め、歩行中はその歩行速度を維持する必要があった．

これまでの研究活動において、歩行速度と立脚初期の足関節の底屈角速度には相関があることを確認した．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．これまでそのような観点で実施された研究はなく、歩行速度と立脚初期の足関節の底屈角速度の関係性に関する報告も少ない．

そこで本研究では、まず健常者に対する上記の基礎データを計測し、これをモデル化することによって歩行速度に合わせた i-AFO の制御方法を実現する．また、開発された制御方法を足関節弛緩性麻痺患者に適用することによって提案手法の有効性を実験的に検証することとした．

2. 研究の目的

本研究の目的は、

- (1) 足関節のブレーキトルクをインテリジェント制御可能な制御型短下肢装具 i-AFO に対し、
- (2) 歩行速度に合わせた適切なブレーキトルク制御入力を決定的ことにより、
- (3) 歩行速度に応じた最適な歩容の制御を実現することである．

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、下記の事項を実施した．

- (1) i-AFO 用の調整可能なアタッチメントを開発する．
- (2) 動作解析装置により健常者歩行における歩行速度と足関節動作の関係を計測する．
- (3) (2) の結果から標準モデルを作成する．
- (4) 上記を使用することによって複数の健常者に i-AFO を装着し、提案モデルの有効性（通常の歩行を阻害しないかどうか）を検証する．
- (5) 上記モデルを障害者（対象は足関節弛緩性麻痺）に適用し、有効性を検証する．

【平成 23 年度】

平成 23 年度は次の 3 つの事項を遂行した．

- (1) **i-AFO 用の調整アタッチメントの開発**
i-AFO を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開発し、i-AFO と組み合わせた．

(2) 健常者歩行の動作解析

健常成人を対象に、歩行中の足関節動作を計測することによって歩行速度と立脚初期における足関節底屈速度の関係性を明らかにした．

対象者に様々な速度でトレッドミル歩行をさせ、その際の各種パラメータを計測した．足関節の関節角度の計測には電気式ゴニオメータ SG110 及び Flexible Goniometer System (Biometrics 社製) を使用した．本センサを対象者の右足関節の外側面に取り付け、足関節の関節角度を測定した．角度のゼロ点は、各対象者の直立時を基準とした．

また、フットスイッチ BP-R (東京センサ社製) を足底面の踵部 (1 個) および中足骨頭下 (2 個) に貼付し、中足骨頭下の 2 つのスイッチは、いずれかのスイッチが反応すればつま先接地と判別した．IC から LR までの立脚初期時間 [s]、一歩行周期 [s]については、フットスイッチのデータから計測した．立脚初期の足関節底屈角速度 [deg/s]については、IC から LR までの底屈方向への角度変化量を立脚初期時間で除した値とした．さらに、歩幅の計測のためにトレッドミルの後方に

Microsoft Kinect センサを設置した。

歩行はトレッドミル歩行とし、歩行速度は、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0km/h の7条件に設定しランダムに歩行させた。各歩行速度において30歩行周期を計測し、解析した。立脚初期の底屈角速度 [deg/s]、歩幅 [mm]に関して、歩行速度との相関の有無を調べた。

なお、対象者には実験についての十分な説明と同意をもって実施した。

(3) 標準モデルの作成

上記の複数データの解析結果から、その平均的なデータを標準モデルとして構築した。

【平成 24 年度】

平成 24 年度は次の 2 つの事項を実施した。

(4) 健常者による評価実験

(1) にて開発した調整アタッチメントを組み合わせた i-AFO を複数の健常被験者に装着し、提案する制御モデルの評価を行った。この際、健常者の歩行に対してこれを阻害しないモデルであるかどうかを検証した。検証には (1) と同じ動作解析装置を使用し、制御の有無による歩容の違いを統計的に検証した。結果を制御モデルにフィードバックし、モデルの修正を行った。

(5) 障害者による臨床評価

提案する制御モデルを障害者に適用し、その効果を臨床評価した (図 2)。

臨床評価の被験者は、ギランバレー症候群の男性 1 名 (年齢 39 歳、身長 183cm) で、下肢末梢部の随意運動が困難で足関節は弛緩性麻痺を呈している。被験者には同意書のもとに説明と同意を行い、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。

まず、歩行速度推定には歩行速度とストライド長の直線近似式が必要である。歩行速度とストライド長との関係には個人差があるため、健常者と同様の方法に従い、Microsoft Kinect センサを用いて被験者の各歩行速度でのストライド長を計測した。計測は普段被験者が使用しているプラスチック装具を着用した状態でトレッドミル上を歩行させた。歩行速度は、1.0、1.5、2.0、2.5 km/h の 4 条件で行った。ここで得られたデータから歩行速度とストライド長の関係式を導き出した。

次に、被験者に i-AFO を装着させトレッドミル歩行を行わせた。トレッドミルの速度は 1.6km/h から 2.5km/h まで 0.3km/h 間隔の 4 条件でランダムに実施した。

i-AFO による歩行時の制御目的は、①立脚初期の IC から LR での底屈制動による急激な足関節底屈の防止と、②立脚後期から全遊脚期での足関節の底屈制限による下垂足の防止の 2 点である。制御方式は、角速度フィードバックによって制御する方式をとった。制

御目的①は、経時的に得られる歩行周期[s]から推定歩行速度を算出し、その速度に応じた目標底屈角速度を決定し、角速度の目標値に合わせるように MR ブレーキを用いて底屈角速度をフィードバック制御した。なお、足関節の目標底屈角速度については、健常者から得られた基本データをもとに、歩行速度に応じた角速度となるよう制御した。制御目的②では、角速度が 0 になるように制御することで、足関節を制限した。

また、i-AFO の足関節部の角度センサにより、足関節の関節角度と底屈角速度を経時的に測定した。試行回数は各歩行速度で 3 回行い、解析には歩行が安定した後の 20 歩分のデータを用いた。なお、歩行状態の判別には i-AFO の角度センサと加速度センサを用いた。

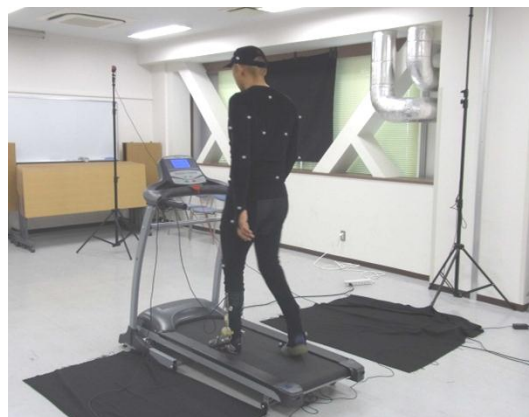


図 2 障害者による臨床評価

4. 研究成果

【平成 23 年度】

平成 23 年度の研究においては、研究方法に示した (1) ~ (3) を実施した。

(1) については、多数の被験者に対する歩行計測実験を容易に実現するために、継手軸を調整可能な計測用装具を実現した (図 3)。ここで開発した調整機構は、平成 24 年度において制御可能な短下肢装具 i-AFO へ応用した。



図 3 継手軸調整可能短下肢装具

(2) については、上記の継手軸調整可能短下肢装具（足関節角度計測用のポテンショメータ、および接地判定用のフットスイッチを含む）、Microsoft Kinect、およびトレッドミルによる簡易歩行計測システムを開発し、健常成人による歩行計測実験を行った。トレッドミルの歩行速度を 1.0km/h から 4.0 km/h まで 0.5 km/h 刻みで設定し、それぞれの歩行速度における立脚初期底屈時間、立脚初期底屈速度、歩幅を計測した。

(3) については、上記 (2) の実験結果から、下記のことになった。

①立脚初期底屈時間は歩行速度の依存性が低く、約 50 ミリ秒であった (図 4)。このことにより、立脚初期の底屈を制御するためには高速応答可能なデバイスが必要であることが確認された。

②立脚初期底屈角速度と歩行速度の間にはおおそ比例関係があった (図 5)。上記の①と合わせて考えた場合、立脚初期の底屈角度も歩行速度に比例することが示唆される。歩行速度が 1.5 km/h よりも小さい場合、底屈角度もきわめて小さくなり、装具による制御の効果が大きくは期待できない可能性が高い。

③歩幅と歩行速度の間には高い相関があることが分かった (図 6)。このことは、将来的に歩幅から歩行速度を推定できる可能性が高いことを示唆する。

以上から、歩行速度の上昇により歩幅の増加し、歩幅の増加によって立脚初期底屈角度が増加し、底屈角度の増加によって底屈速度が上昇すると考えることができた。

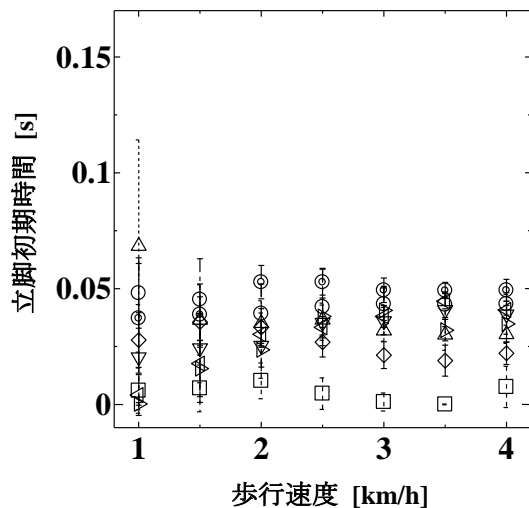


図 4 歩行速度と立脚初期時間の関係

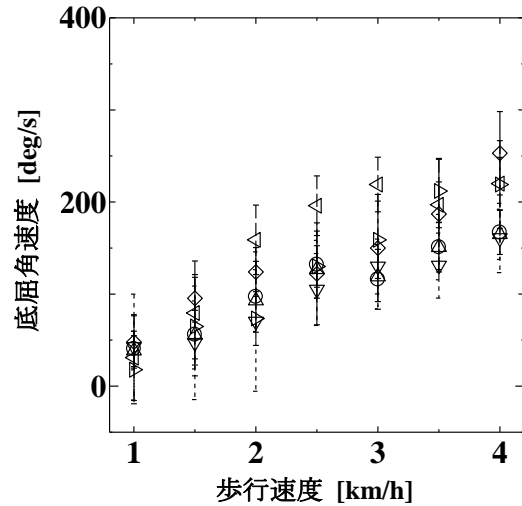


図 5 歩行速度と底屈角速度の関係

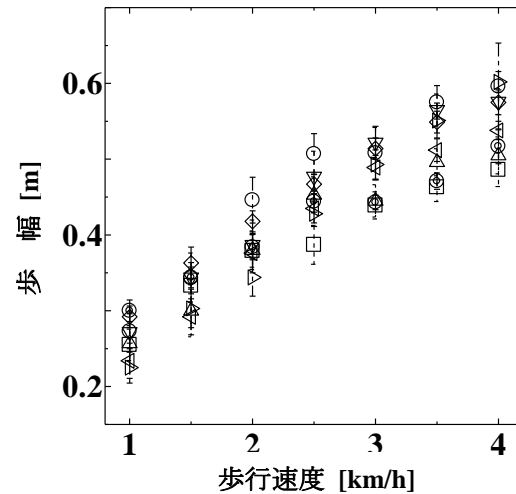


図 6 歩行速度と歩幅の関係

【平成 24 年度】

平成 24 年度は、研究方法の (4)、(5) を実施した。

(4) については、開発した調整アタッチメントを組合せた i-AFO を複数の健常被験者に装着し、提案する制御モデルの評価を行った。また、(3) についての追加実験から、歩行速度と各種パラメータ (歩行周期、歩幅、底屈角速度) の関係を明らかにし、それらをモデル化することで歩行速度を推定し、その推定歩行速度をもとに足関節を制御する方法を構築した。

本研究で課題であった歩行速度の把握であるが、i-AFO のセンサでは歩行速度の測定が困難であるため、歩行速度と歩行の各パラメータとの関係を用いることで推定する方法をとった。そのため、(2)、(4) で行った予備研究により健常人の歩行速度と各パラメータとの関係性を調べたところ、個人によりばらつきはあるが、歩行速度と歩幅および

底屈角速度との間に相関がみられた。歩行速度と歩幅との間に比例関係があるという報告もあり、歩幅やストライド長は歩行速度を反映しやすいものと考えられ、測定可能な歩行パラメータである歩行周期の時間から歩行速度を推定可能であると考えられた。この考えに基づき、被験者の事前の予備実験と歩行中の歩行周期に要する時間を測定することにより歩行速度を推定する方法を構築した。

(5) については、足関節弛緩性麻痺患者を対象に i-AFO を装着させて各歩行速度で歩行させ、臨床評価により有効性を検証した。

トレッドミルの各設定速度と推定歩行速度は 1.5km/h 以下の低速を除き、近値を示した。また、目標底屈角速度についても、トレッドミルの速度の上昇に伴い、角速度が上昇する結果となった(表 1)。

i-AFO による制御目的①の立脚初期の底屈角速度の実測値では、目標角速度よりもやや高値を示したものの、各歩行速度に応じた角速度制御が実現できていた。

以上の結果、低速での歩行を除き、歩行周期から歩行速度を概ね推定でき、歩行速度に応じた足関節のブレーキトルク制御が実現でき、歩行改善につながった。

表 1 トレッドミル速度に応じた目標底屈角速度

トレッドミル速度 [km/h]	目標底屈角速度 [deg/s]
1.6	146.0±17.2
1.9	175.6±48.8
2.2	181.4±20.1
2.5	197.6±10.0

開発してきた i-AFO は各歩行状態で足関節トルクを即座に調整可能なことから、歩行機能向上に有用な装具と考えられる。今回、歩行速度に応じて自動的に足関節を底屈制御する制御方法を構築し、障害者においても有効性が実証できた。i-AFO および制御方式により、歩行速度に応じた制御が可能となり、より応用的な歩行補助が実現できた。

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 2 件)

(1) 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 (i-AFO) による足関節制御の検証 — 歩行速度に応じた立脚初期の自動制御について —, The Journal of Clinical Physical Therapy, 査読有, vol.15, 2013, 33-38.

(2) 菊池武士, 谷田惣亮, 田中利昌, 林慧吾, 水戸部和久, 磁気粘性流体ブレーキを搭載したインテリジェント制御型歩行車, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 48 巻 1, 2012, 37-44.

[学会発表] (計 9 件)

(1) 菊池武士, 弘平谷友隆, 谷田惣亮, 安田孝志, インテリジェント短下肢装具の歩行速度に合わせた足関節底屈制御の提案と評価, 日本機械学会 2013 年ロボティクス/メカトロニクス講演会, 2013 年 5 月 24 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市).

(2) 谷田惣亮, 菊池武士, 安田孝志, 藤川孝満, 弘平谷友隆, 制御型短下肢装具による足関節制御の検証 — 歩行速度に応じた立脚初期の自動制御について —, 第 48 回日本理学療法学会大会, 2013 年 5 月 24 日, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市).

(3) 谷田惣亮, 菊池武士, 安田孝志, 藤川孝満, 制御型短下肢装具の開発と臨床評価 — 歩行速度に応じた足関節角速度制御と効果判定 —, 第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会, 2012 年 11 月 9 日, 幕張メッセ (千葉県幕張市).

(4) 弘平谷友隆, 菊池武士, 谷田惣亮, 安田孝志, インテリジェント短下肢装具の歩行速度に合わせた足関節底屈制御法の提案, 計測自動学会東北支部 第 275 回研究集会, 2012 年 10 月 26 日, 山形大学 (山形県米沢市).

(5) 菊池武士, 荘司彰人, 谷田惣亮, 加藤守匡, 制御型短下肢装具のための制御モデルの提案: 継手軸が調整可能な短下肢装具の開発及び歩行計測実験, 日本機械学会 2012 年ロボティクス/メカトロニクス講演会, 2012 年 5 月 28 日, アクオシティ浜松 (静岡県浜松市).

(6) Takehito Kikuchi, Toshimasa Tanaka, Akihito Shoji, Sousuke Tanida, Morimasa Kato, Gait measurement system to develop control model of intelligently controllable ankle-foot orthosis, Proceedings of the 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2011), 2011.12.20, Kyoto Japan.

(7) 菊池武士, 荘司彰人, 増田恭伸, 谷田惣亮, 制御型短下肢装具の歩行制御モデル開発のための基礎的検討 — 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (旧名称: 福祉工学シンポジウム 2011), 2011 年 11 月 3 日, 芝浦工業大学 (芝浦キャンパス, 東京).

(8) 荘司彰人, 菊池武士, 増田恭伸, 谷田惣亮, 制御型短下肢装具の歩行実験のための関節軸が調整可能な装具の開発, 日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演会, 2011 年 9 月, 山形大学工学部 (山形県米沢市)

(9) 谷田惣亮, 菊池武士, 安田孝志, 藤川孝満, MR 流体ブレーキを用いた制御型短下肢装具の開発 一歩行速度に応じた足関節制御と効果判定一, 第 46 回日本理学療法学会, 2011 年 5 月 28 日, シーガイアコンベンションセンター (宮崎県宮崎市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷田 惣亮 (TANIDA SOSUKE)

佛教大学・保健医療技術実習センター・講師

研究者番号: 20584494

(2) 研究協力者

菊池 武士 (KIKUCHI TAKEHITO)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 10372137

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