

# エネルギー自律型空気式歩行支援シューズの開発

所属：徳島大学大学院理工学研究部

助成対象者：高岩昌弘

## 概要

本研究では、高齢者のつまずきによる転倒を防止するため、遊脚初期に足関節部の背屈動作(爪先を上げる動作)を能動的に支援することで、躓きを予防する歩行支援シューズを開発する。能動的な支援を行うには何らかの外部エネルギーが必要となり、装置全体の大型化やコストの増大を招くことが懸念される。本研究では空気圧システムを介在させ、装着者自身の体重(位置エネルギー)を機械的な仕事に変換することで電気エネルギーを一切利用しない駆動方法を提案し、これを小型化することで靴に組み込んでいる。通常歩行時の支援効果ならびに長距離歩行時の疲労軽減効果を実験的に確認する。

## abstract

In spite that walking plays an important role to keep and improve Q.O.L. for elderly person, most of their injury are reported to be caused by stumbling on even a small bump due to the deterioration of their tibialis anterior muscle. In this study, we aim at developing walking support shoes, which support their dorsiflexion motion during a walking, for a purpose of prevention of falling. A wearer steps a foot pump installed in bottom of shoes and compressed pneumatic energy is temporally stored as an elastic potential energy of a elastic material. Then, torque around foot joint is generated from restoration torque of the elastic one, which support dorsiflex in swing phase. In this article, after explaining a structure of the developed supporting shoes and walking principle, we investigate support effect through some experiments.

## 研究内容

### 1. 緒言

高齢化が進む我が国において、高齢者のQOLの維持向上は重要な課題である[1]。日常の歩行動作は社会参加や健康維持に重要な要素であるが、高齢者は加齢に伴う前脛骨筋等の筋力低下により、遊脚期における背屈(爪先を上に向ける動作)角度が小さく、すり足歩行になるため、わずかな段差でもつまずきやすく転倒のリスクが高い。また、一度転倒すると、若年者に比べて骨折等の可能性も高い。このため背屈動作補助機能を備えた歩行支援装置の開発が望まれている。

歩行支援に関する研究として、MR流体を用いた粘性抵抗可変の継手を有する短下肢装具[2]や、空気圧受動要素を用いた足の尖足(爪先が鉛直下向きに垂れた状態)を防止する足関節装具[3]、ま

た、膝関節装具と空気圧シリンダにより膝関節の伸展動作を補助する装置[4]などがすすめられている。

本研究では、高齢者のつまずきによる転倒を防止するため、歩行時の遊脚期における足関節部の背屈動作を能動的に支援する歩行支援シューズを開発する。このように能動的に支援を行うには何らかのエネルギー源の確保が必要となるが、一般に装置の大型・複雑化やコストの増大を招くことが懸念される。そこで本研究では、装着者自身の体重(位置エネルギー)の一部を機械的な仕事に変換することで、電気エネルギーを一切利用しない駆動方法を提案している。具体的には足底部に設置したフットポンプを踏んで得られる空気の圧縮エネルギーをバネなどの弾性エネルギーに変換し、遊脚期となるタイミングで弾性体の復元力を利用して足関節部に背屈モーメントを生成するものである。提案する装置の有効性を実験により検証する。

## 2 歩行支援シューズの概要

### 2.1 歩行支援装置に要求される仕様

Fig. 1 に歩行時の足関節角度を示す[5]。直立状態を基準とし、背屈方向を正としている。図中H0(Heel Off)で踵が地面から離れ、図中T0(Toe Off)でつま先が地面から離れるまで急速に底屈した後、背屈動作に入る。図中Aに示すように背屈角度は約20度となるが、高齢者の場合この角度が小さく躓きの要因となる。本シューズはつま先離地のタイミングで支援を開始し、背屈角度を向上させるものである。

先行研究より、最大底屈状態から約20度の背屈角度を得るには足関節周りに約2.0Nmのモーメントが必要であることがわかっている。このため、背屈角度20度、背屈モーメント2.0Nmを支援率100%時の仕様とする。

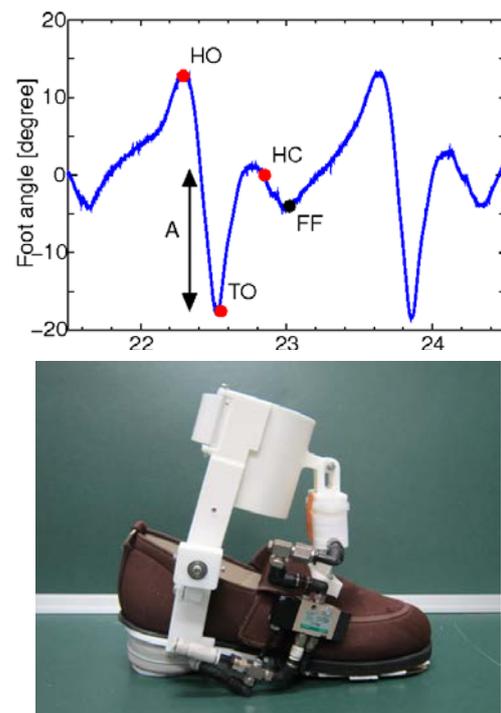


Fig.2 Overview of walking support shoes

### 2.2 支援機構の構成

開発した歩行支援シューズの外観をFig. 2 に示す。足の甲の箇所に後述するペローズ型アクチュエータを装着し、踵部にフットポンプを挿入している。装置重量は570[g]である。一般的な高齢者の外履きシューズで軽量なものは片足300g台である。さらなる軽量化が望まれるが、今後の課題とする。

Fig. 3 は足関節にモーメントを与えるペローズ型アクチュエータを足の前方部分から見たものである。ペローズと弾性体(輪ゴム)を組み合わせている。同図(b)はペローズが加圧され、ペローズの膨張力と弾性体の復元力が釣り合っている状態を示す。本歩行支援シューズでは足が地面から離れた瞬間にペローズ内の圧縮空気が一気に大気開放されるようになっており、それにより生じる

弾性体の復元力，すなわち足の甲の箇所における収縮力を利用して背屈動作を支援する．



(a) Contract state

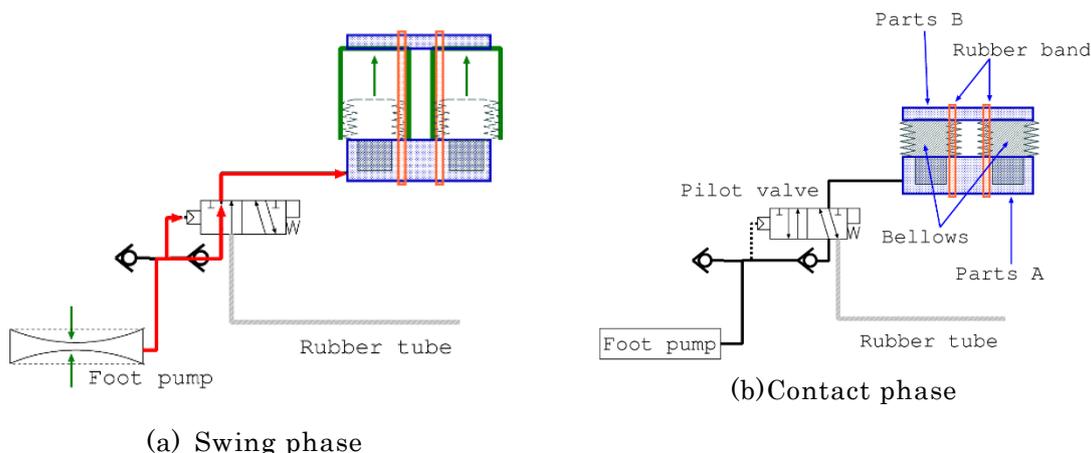


(b) Expand state

Fig.3 Bellows type actuator

### 2.3 歩行支援動作

Fig. 4 に支援装置となる空気圧駆動回路を示す．基本構成は踵部に設置したフットポンプ，ポンプで圧縮した空気を弾性エネルギーに蓄えるベローズ型アクチュエータ，流路をON-OFF 的に切り替えるための5ポートパイロットバルブ，つま先が離地した際にパイロットバルブを切り替えるためのトリガー的な役目を行うゴムチューブから構成されている．



(a) Swing phase

(b) Contact phase

Fig.4 Pneumatic Driving Circuit

同図 (b)に示すように，足が接地した際に体重によって踵部に設置したポンプを踏む．ポンプの出力ポートはパイロットポートと連結されているため，ポンプ内圧力，すなわちパイロット圧力の上昇によりバルブの位置が切り替わり，ポンプ内の圧縮空気がベローズ型アクチュエータへ移動する．アクチュエータ部ではベローズ内圧と弾性体（ゴムバンド）の復元力が釣り合った状態となる．次に踵が離地するとフットポンプの復元力により膨張し，外気を吸い込むと共にポンプ内圧力はほぼ大気圧の状態まで低下する．この時，パイロットバルブの位置が切り替わり，ベローズ内の空気はゴムチューブを介して大気へ放出されるようになるが，ゴムチューブは地面とシューズ間で押しつぶされた状態となっているため，実際にはベローズ内圧力は弾性体の復元力との釣り合いが維持されたままとなる．その後，最大底屈状態から爪先が離地すると，ゴムチューブを圧縮していた拘束がなくなり，ベローズ内の空気が一気に大気に開放されると共に，弾性力の復元力が作用し，足

の甲の箇所には収縮力が生じる。これにより足関節部に背屈モーメントが生じる。この一連の動作を歩行に合わせて行うことで、電気エネルギーを一切使用することなく遊脚初期における背屈動作を支援することができる。

### 3 実験結果および考察

相対的に前脛骨筋の筋力が低下した状態を模擬するため、約500[g] の負荷を足先につけた状態でトレッドミル上を歩行し、背屈動作を支配的に行う前脛骨筋の筋電位と足関節角度を計測した結果をFig. 5に示す。

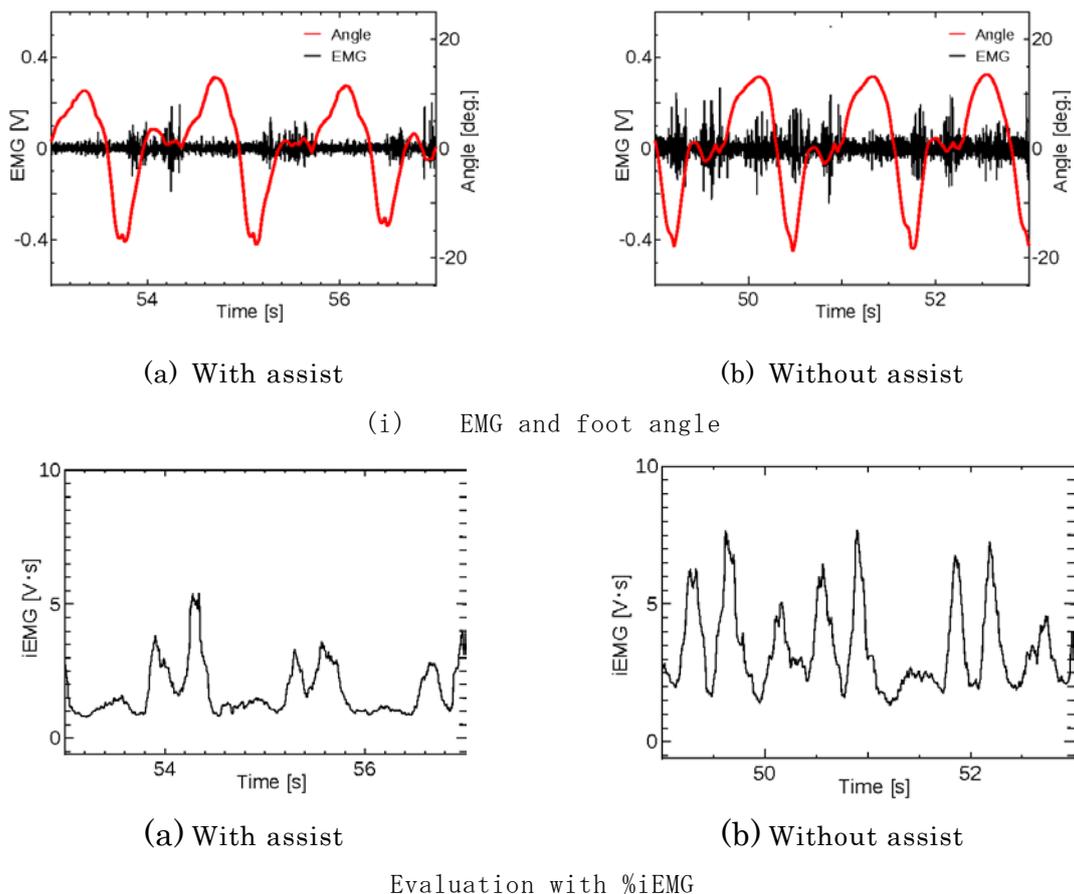
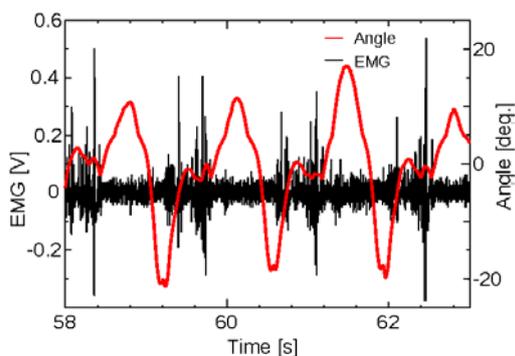


Fig.5 Assist efficiency in a standard walking

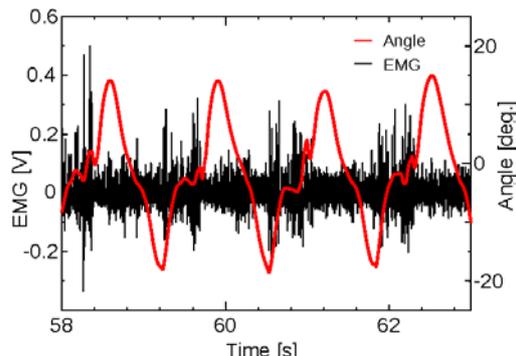
同図 (a), (b) はそれぞれ支援あり、支援なしの場合であり、(ii) は同図(a), (b) の筋電位のパーセント筋電積分(積分時間0.1秒で移動積分したもの)による評価を示す。背屈時に明らかに支援ありの方が筋電位の大きさが小さく、本装置による支援効果を確認できる。また、赤線で示す足関節角度の歩行中の時間変化をFig. 1のそれと比較すると大差ないことから、本支援装置を装着しても、不自然な歩行様態になることなく自然な歩行が得られていることも見て取れる。

同様の実験を60分歩行した後に行うことで、長距離歩行時の疲労軽減効果について検証した結果をFig. 6に示す。Fig. 5の場合と同様に前脛骨筋の筋電位が支援ありの場合の方が小さく、長距離歩行時の疲労軽減効果も有することが確認できる。また、同図(ii)は底屈動作を支配的に行う腓腹筋の筋電位を示す。支援のある無しによらず大差なく、本装置を装着しても底屈動作を阻害しないこ

とがわかる．底屈動作は足を後ろに蹴り出す動作で，これにより前方への推進力を得ている．本支援機構の最もシンプルな構成は弾性特性を有するペローズアクチュエータのみの構成となるが，この場合底屈時に負荷となり，腓腹筋の負担が増える．このことから底屈時には無拘束状態となる本機構の有用性がわかる．

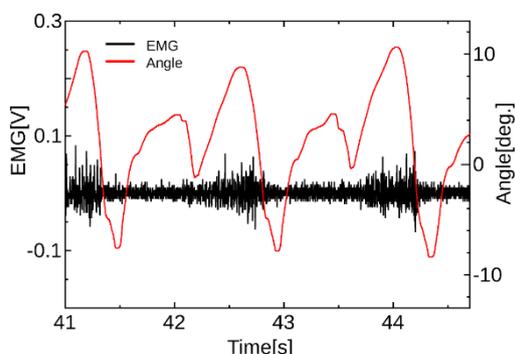


(a) with assist

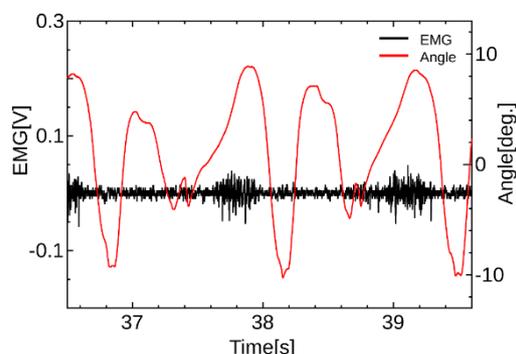


(b) without assist

(i) Tibialis anterior muscle



(a) with assist



(b) without assist

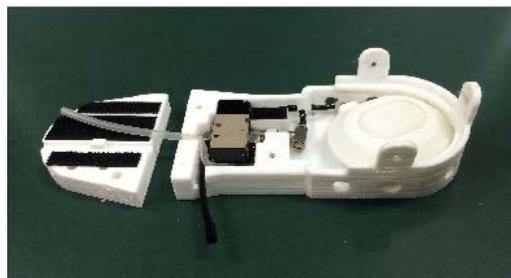
(ii) Musculus gastrocnemius muscle

Fig.6 Effectiveness for fatigue in long term walk

#### 4 実用化に向けた改良



(a) Soft foot pump



(b) Shoe sole

Fig.7 Parts made of elastic material with 3D printer

近年，3Dプリンターの発展は目覚しいが，熱可塑性エラストマーと呼ばれる柔軟材料をも扱えるようになってきた．これは空気圧アクチュエータの筐体そのものをアイデア次第で容易に具現化できることを意味し，ソフトロボティクスの分野は益々発展していくものと予想される．本装置においても，フットポンプはこれまで市販のものを流用してきたが，形状や容積を目的に応じて設計・



Fig.8 developed walking support shoes

製作したものをFig.7(a)に示す．柔軟材料にはNinjaFlexを使用している．空気漏れを排除するために表面にコーティングを施す必要があるが十分実用に耐えうると考えている．

一方，装置の軽量・コンパクト化のためには，空気圧駆動回路を鞋底に収納できることが望ましいため，鞋底自体を柔軟材料で作成し，ポンプやバルブ等の回路を組み込んだものをFig.7(b)に示す．試作したシューズ外観をFig.8に示す．最終的にはショートカット

ブーツの形状を考えており，足の甲のアクチュエータもシューズアッパー部に内含される．

## 5 結 言

本研究では，高齢者の躓きによる転倒防止のため，歩行時の背屈動作を補助する機能を備えた歩行支援シューズを開発した．本支援装置は空気圧アクチュエータを用いて能動的に背屈動作を支援するものではあるが，装着者の体重(位置エネルギー)を動力源とするため，電気エネルギーを一切利用せず，その結果，小型軽量で低コストな支援システムを構築できる．本稿では，装置の概要について述べた後，歩行動作時における支援効果を筋電位信号に基づく評価により検証し，通常歩行時の支援効果，ならびに長距離歩行時の疲労軽減効果を確認した．今後は高齢者を対象とするモニター調査を実施し，実用的観点から検証をすすめていく．

## 引用文献

- 1) 内閣府：平成23 年度版高齢社会白書第1 章高齢化の状況
- 2) 赤澤康史，中川昭夫，松原裕幸他：“メカトロニクスを導入した短下肢装具の研究開発”，平成15年度兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所報告集
- 3) 小澤隆太，平井宏明，川村貞夫他：“空気圧受動要素を利用した足関節装具の開発”，ロボティクスメカトロニクス講演会講演論文集，2005
- 4) Kazuhiro FUJISHIRO, Tadayuki ARIUMI, Osamu OYAMA：“Development of Pneumatic Assist System for Human walk”，Proc of SICE Annual Conference 2003 in Fukui
- 5) 臨床歩行分析研究会：“関節モーメントによる歩行分析”，医歯薬出版株式会社，pp.19-22, 1997 pp.155-166

## 本助成に関わる成果

### [口頭発表]

- 1) 高岩昌弘，高川裕太，ワイヤー式空気圧シリンダを用いたエネルギー自律型歩行支援シューズの開発，日本フルードパワーシステム学会平成28年秋季講演会，講演番号23

### [ポスター発表]

- 1) 高川裕太，高岩昌弘，装着者の体重を利用した空気式歩行支援シューズの開発，日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会2016，講演番号2A1-03b4