

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04294

研究課題名(和文) 空気式ウェアラブルアクチュエータを用いた衣服状トレーニング装置の開発

研究課題名(英文) Development of lower limb training device driven with pneumatic wearable actuator

研究代表者

佐々木 大輔 (Sasaki, Daisuke)

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：50372686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：スポーツ分野では、ウェアラブル機器によりリアルタイムでの運動の測定・分析により高度な指導が可能となった。しかし、収集した情報を訓練者にフィードバックする方法は、口頭あるいは映像などと方法が間接的かつ限定的である。そこで、本研究課題では下肢を対象とした動作教示の情報を直接的に伝達可能な着用型装置実現に要する要素技術を開発する。本装置にはアクチュエータとして柔軟軽量な空圧ソフトアクチュエータを用いるが、動作ストロークの向上や身体への負担の少ない装着方法の課題がある。本研究課題では、ソフトアクチュエータによる装置動作範囲の増加および負担の少ない装着方法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スポーツ分野では、ウェアラブル機器によりリアルタイムでの運動の測定・分析により高度な指導が可能となった。しかし、収集した情報を訓練者にフィードバックする方法は、口頭あるいは映像などと方法が間接的かつ限定的である。ウェアラブル化したアクチュエータを使用し、訓練者への直接的なフィードバックならびに自由な場所での訓練ができれば訓練の効率化が可能となる。アクチュエータにより訓練者への直接的なフィードバックならびに自由な場所での訓練ができれば訓練の効率化が可能となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the lower limb wearable device driven with the pneumatic actuator to train leg motion. The developed device is constructed with the pneumatic artificial rubber muscles and the variable stiffness frame, the pneumatic friction clutches developed in this study. The variable stiffness frame is composed of the granular jamming transition mechanism. Thus, the rigidity of proposed frame is normally low and can be increased when the device assists a subject. This frame makes it possible to apply the force from the artificial muscle to the ankle at the desired timing. The pneumatic friction clutch is composed with the friction members and bellows. The friction members can be pressed each other by the generated force from the bellows. By connecting the artificial muscle with the developed clutch, the movable range of artificial muscle can be improved.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ウェアラブルロボット アクチュエータ 空気圧

1. 研究開始当初の背景

スポーツ分野では、「ウェアラブルセンサ」と言われる装着型のセンサ技術、スマートフォンをはじめとする携帯可能な「ウェアラブルコンピュータ」と言える機器の普及により、リアルタイムでの運動の測定・分析により高度な指導が可能となった。たとえばサッカー競技では、GPSセンサを用いて選手の位置を検出する試みや、陸上競技ではスマートフォンに内蔵のセンサを用いて走行コースや距離を競技者へ提供するソフトウェアなどが商品化されている。

しかし、収集した情報を訓練者にフィードバックする方法は、口頭あるいは映像などと方法が間接的かつ限定的である。また、本研究で対象とするような機器を用いたトレーニングにおいても、クレーンで身体を釣り上げトレッドミル上で訓練するなど限定された空間での利用が現状である。これらを解決するためには、センサ、コンピュータ同様に動作を身体に伝達する「アクチュエータ」のウェアラブル化が必要であるが、現状ではサイズ、重量、装着性、安全性の面で改善の余地を残している。

2. 研究の目的

下肢を対象とした動作教示の情報を直接的に伝達可能な着用型装置実現に要する要素技術を開発する。衣服のように日常で装着負担の少ない形態の装置を実現するために、アクチュエータとして柔軟軽量の空圧ソフトアクチュエータを用いる。しかし、動作ストロークの向上や身体への負担の少ない装着方法の課題がある。本研究課題では、ソフトアクチュエータによる装置動作範囲の増加および負担の少ない装着方法の検討を目的とした。

3. 研究の方法

開発する装置には、アクチュエータとして McKibben 型空気圧ゴム人工筋を用いた。McKibben 型空気圧ゴム人工筋は、高い出力重量比を有するため軽量であることが要求される装着型装置のアクチュエータとして適している反面、動作ストロークの乏しさが技術的課題である。この技術的課題を解決するため、人工筋と同様に空圧で駆動する摩擦ダンパを開発し、これをクラッチ機構として使用した。

装置着用にとまなう身体の拘束感の低減には外骨格を使用しない方式が望ましいが、その反面アクチュエータ取り付け部位のズレや伸びによる動力の伝達損失が問題となる。そこで、装置の拘束感低減のため、フレーム剛性を变化可能なインターフェースの開発に取り組んだ。本課題では、装置の性能評価のため一部外骨格構造を採用しているが、フレーム剛性の調節機能は、外骨格を使用しない方式においても利用可能である。

4. 研究成果

(1)クラッチ機構として使用する摩擦ダンパの開発

本研究では、身体に装着することを想定し、柔軟かつ軽量の空気圧ゴム人工筋をアクチュエータとして選択した。しかし、前述の動作ストロークの乏しさに起因し、装置の発生トルク特性には人工筋の変位依存性が大きく影響をおよぼす。そこで、図1に示すように人工筋の全長を維持しながら装置全体の全長を变化可能とする調節機構を併用することでこれを解決する。

人工筋と長さ調節機構を併用した場合、両端の長さ変化に応じて、調節機構が伸長し人工筋を常に自然長に保つことができる。人工筋が収縮力を発生する場合には調節機構のワイヤー引き出しを抑制することで、人工筋は常に最大収縮力を発生可能な初期長を維持可能となる。このような動作を可能とするため、住宅や橋梁などの制震で使用される摩擦ダンパ機構を開発しこれを人工筋のクラッチとして用いる。

図2に提案した摩擦ダンパの外観とその構造を示す。本ダンパは制動力発生部とワイヤー回収部で構成される。制動力発生部はペローズと、摩擦部材 A、B ならびにギアで構成されている。

駆動時にはペローズ内部に圧縮空気を供給することでペローズの膨張力を摩擦部材 A に加えることで摩擦部材同士が押し当てられ制動トルクが発生する。また、非駆動時は装置両端に設置した押しばねにより、摩擦部材同士に 1[mm] のクリアランスが確保される構造となっている。

ワイヤー回収部は、ゼンマイばね固定用シャフトと、ゼンマイばね、ポピンで構成されている。ワイヤーの引き出し時は、ポピンが回転しシャフトの回転量に応じたゼンマイばねの復元力がポピンに印加される。ワイヤー回収時には、ゼンマイばねの復元力によりポピンが回転しワイヤーが回収される。ワイヤー回収部と制動力発生部はそれぞれ歯数 42 と歯数 14 のギアで接続されており、摩擦部材により発生した 3 倍の制動トルクをポピンに伝達する。後述の足首装着用トレーニ

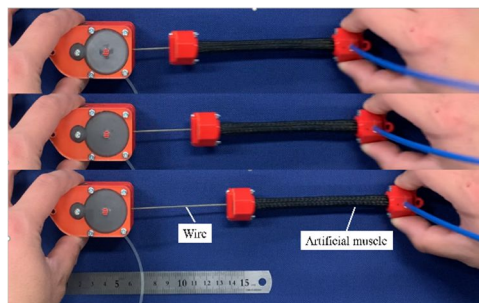


図1 クラッチ機構併用人工筋の動作

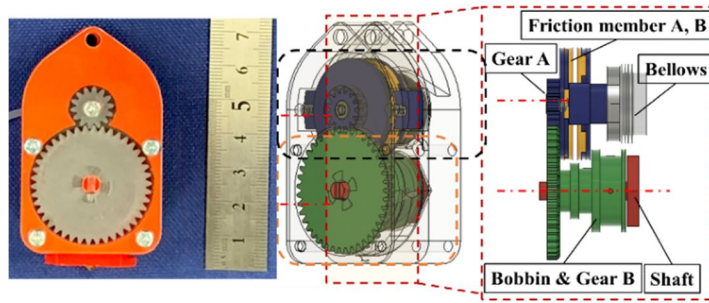


図 2 摩擦ダンパの外観と構造

ング装置に用いる人工筋の最大発生力は 150[N]であるため、摩擦部材部においては発生力に換算して 50[N]に相当する制動トルクの発生が求められる。そのため摩擦部材に押付力を印加するために使用するアクチュエータとして、変形ともなう発生力の変化が少ないペローズを用いた。

摩擦ダンパが人工筋の長さ調節機構としての役割を果たすためには、ワイヤー回収部によってワイヤーを任意の長さで調節し、任意のタイミングでワイヤー回収用ポビンに制動を与える必要がある。そのため使用するワイヤーには、回収時においてポビンに巻き付く曲げ剛性と、150[N]に耐える引張剛性が必要になる。そのため曲げ剛性が低く、引張による伸びが少ない繊維 (YGK: ザイロン X 30 号) を本装置のワイヤーとして用いる。ワイヤーの全長は、装置の可動域を $\pm 30^\circ$ 、人工筋取り付け部の間隔を 216, 266[mm]とすることから 100[mm]とした。摩擦ダンパの寸法は $28 \times 63 \times 38$ [mm]である。

製作した摩擦ダンパの制動力を測定する実験を行った。実験は図 3 に示すように試験台に装置を固定し、50[mm]引き出した状態で内蔵のペローズに 250[kPa]の圧縮空気を供給した。その後、試験台を用いてワイヤーを引き出し、その際の制動力と引き出し量を力センサとレーザ変位計により測定した。実験結果を図 4 に示す。実験結果より、摩擦ダンパの制動力はワイヤーの引き出し量の増加を伴いつつも 200[N]まで達することを確認した。なお、ギアの回転が見られないため、引き出し量の増加は摩擦部材同士の滑りではなく、ワイヤーの伸長が影響していると考えられる。要求力以上の制動性能を確認したため、摩擦ダンパを装置に応用可能であることを確認できた。以降、本ダンパを装置の機能に準じ摩擦クラッチと呼ぶこととする。

(2)剛性可変フレームの開発

本研究で開発する装置は、底背屈に対する矯正力を装着者に印加する構造とした。しかし、足首の内外反などの前額面上の回転を拘束した機構であると、非駆動時において装着者の歩行を阻害するなど、装着感が悪化する。そこで、非駆動時において底背屈以外の動作は通常歩行と同様の歩容を実現するために、前額面上の回転自由度の制限を軽減する。

この問題を解決するため、ジャミング転移を利用した可変剛性要素を開発するとともに、可変剛性フレームを用いた剛性可変フレームを製作した。製作した剛性可変要素の外観とその動作を図 5 に示す。

開発した剛性可変要素は、コーヒー粉末を楕円筒形状のシリコンゴム (Smooth-On: Ecoflex00-20) に封入している。内部の空気を吸引しジャミング転移現象を生じさせることで、本要素の剛性が変化する。非駆動時には、柔軟性を生かし伸長・圧縮、屈曲することで装着者の内外反動作を妨げず、駆動時には内部を減圧し任意の長さで剛性を増加させることで人工筋の発生力を身体に伝達することができる。製作した剛性可変要素の自然長は 42[mm]、実際に圧縮・伸長を行う部位の全長は 18[mm]であり、内部に 9.2[g]のコーヒー粉末を充填している。



図 3 評価装置の外観

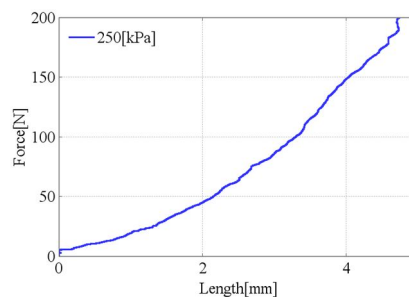


図 4 摩擦ダンパ制動力特性

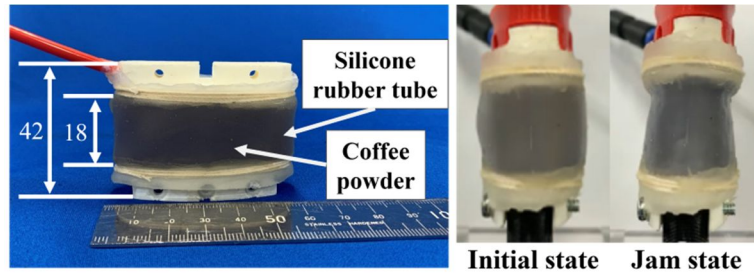


図5 剛性可変要素の外観

本要素は内部に粉末が充填されている構造上、使用時において粉末の偏りが生じてしまう。そのため剛性可変フレームには本要素 2 個を直列に接続したものを 1 ユニットとすることで粉体偏りの影響を軽減する。剛性可変フレームには、図 6 に示す概略図のように足首の前後左右に合計 4 ユニット (8 個) の剛性可変要素を使用する。これにより非駆動時における内外反方向にフレームを変形させることができる。

剛性可変フレームが底背屈方向の印加トルクに対して十分な剛性を有するかを確認する。実験装置を図 7 に示す。実験装置は剛性可変フレームと、押し付け用フレームと、力センサ(日本電産シンポ:FGP-10) で構成している。

本実験では内外反動作を行っている足首関節に対し人工筋の発生力を剛性可変フレームを介して人体に伝達することを想定する。そのため実験では、任意の内外反状態を模し、初期状態での剛性可変フレームの全長を圧縮。伸長方向に変化させ試験台に固定する。この固定長さは内外反の可動域を考慮し、自然長 78[mm]の剛性可変フレームを 70[mm]から 86[mm]まで 4[mm]刻みで変更した。次に、実験装置に固定した図中左右の剛性可変フレームのうち左側のみを減圧し駆動させる。そして T 字状の押し付けフレームの先端に引張力を印加することで、回転軸 A を中心とした反時計回りのトルクを左側の要素に伝達する。その時に印加する力と関節角度を、力センサとリニアエンコーダ(武藤工業:DX-025)により測定した。印加トルクと角度変化の結果を図 8 示す。実験結果より、角度変化が生じるものの想定しているトルクの 2 倍である約 15[Nm] トルクの印加が可能であることを確認できた。また、負圧の増加にともない剛性が向上することも併せて確認できた。

(3) 装着型装置への応用

前述の装置を組み合わせて製作した装着型装置の外観図を図 9 に示す。本装置は、下腿固定部

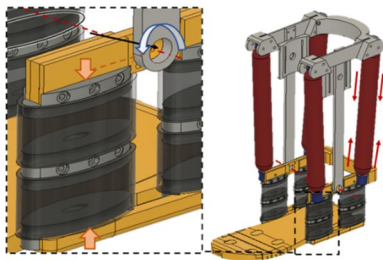


図6 剛性可変フレームの概略図

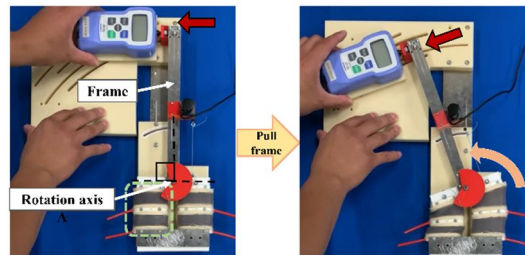
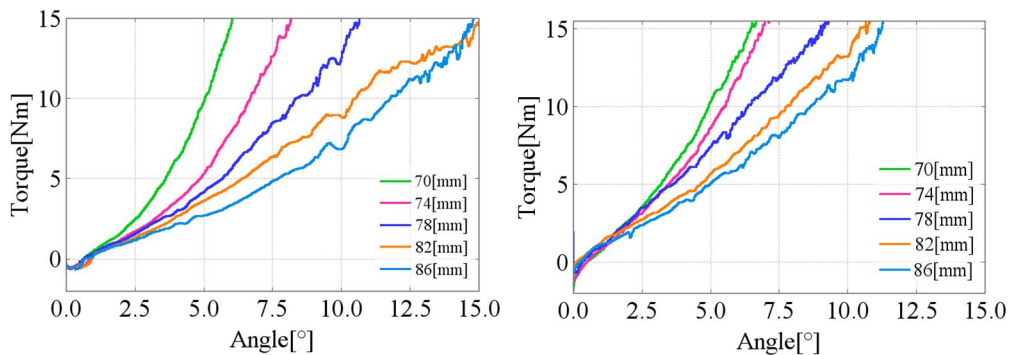


図7 底背屈方向のフレーム剛性評価装置



(a) -80[kPa]における剛性

(b) -90[kPa]における剛性

図8 底背屈方向のフレーム剛性の測定結果

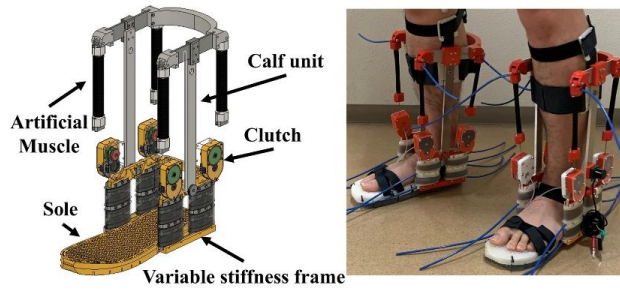


図9 装着型装置の外観と構成

と、足固定部、McKibben型空気圧ゴム人工筋、摩擦クラッチ、剛性可変フレームで構成されており、身体への固定には面ファスナーを用いる。人工筋とクラッチを併用した長さ調節可能なアクチュエータは前後左右にそれぞれ1組の合計4組使用しており、人工筋から得られる収縮力を足首底背屈方向に矯正力を作用させる。足底にはTPUで成形した靴底を使用しており、一般的な靴の靴底と同様の剛性である。なお、センサによる計測のため下腿部は金属製のフレームを使用した外骨格様の構成であるが、ブーツの下腿部などのように圧縮剛性の高い部材を使用する事で金属フレームを使用しない構成も可能であると考えている。

底背屈方向に角度を変化させたときの装置の発生トルクを測定した。角度は背屈方向を正とし、 5° 刻みで -20° から 20° に調節し実験を行った。また、自重トルクが作用しないように装置の矢状面を地面に対して水平に設置し測定を行った。装置固定後、左側の摩擦クラッチ内部のペローズに $250[\text{kPa}]$ の圧縮空気を供給し、前方の人工筋(背屈矯正用)内部を $400[\text{kPa}]$ まで加圧した。その時に発生する発生力を力センサ(日本電産シンポ: FGP-100)により測定した。またリニアエンコーダ(武藤工業: DS-025)を用いて装置関節角度を取得し、装置の幾何学的長さによりモーメントアームを求め、これにより発生トルクを算出した。発生トルクは背屈方向を正とする。実験結果を図10(a)に示す。また、 $250[\text{kPa}]$ から $400[\text{kPa}]$ まで $50[\text{kPa}]$ 間隔での発生トルクを同図(b)に示す。実験結果より人工筋の技術課題であった装置トルクの角度依存性を軽減出来ていることを確認した。

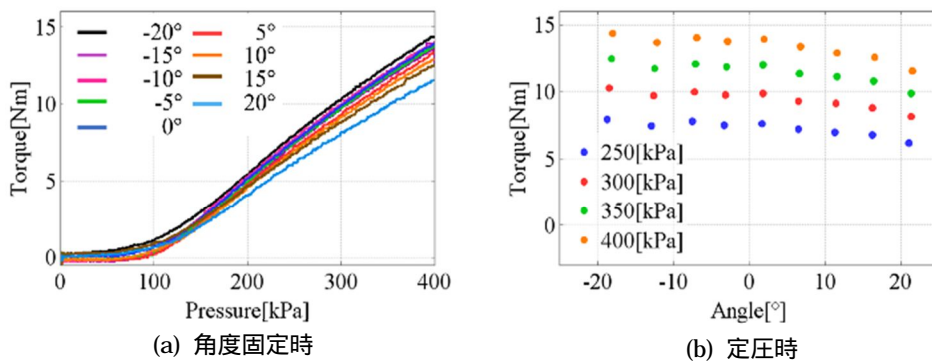


図10 装置発生トルク特性

装置に適用した可変剛性フレームによる足首の内外反動作の拘束の影響を確認する実験を行った。実験では足底部のみ、剛性可変フレーム使用時、剛性可変フレーム不使用時の3種類の状態で、 $1.2[\text{m/s}]$ の歩行を行い図12に示す位置に設置したマーカーの座標をモーションキャプチャシステム(Acuity inc.: OptiTrack V120 Trio)により測定した。実験結果を図11に示す。内外反動作を行うことができない剛性可変フレーム不使用時と比較して剛性可変フレームを使用した装置では $0.7[\text{s}]$ から $1.1[\text{s}]$ の間で、通常歩行と同様の結果となる足底部のみの場合と類似した歩容を確認することができた。よって、剛性可変フレームによる内外反の動作制限の軽減が可能であることを確認した。

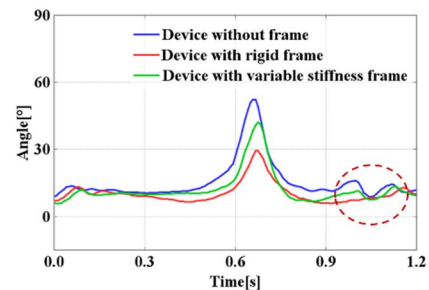


図11 装着実験の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 神村 知皓, 佐々木 大輔, 八瀬 快人, 門脇 惇	4. 巻 57
2. 論文標題 動作矯正への応用を目的とした空圧駆動式可変摩擦ダンパーの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 19~24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 日下隆太郎, 佐々木 大輔, 八瀬 快人, 門脇 惇
2. 発表標題 足首底背屈動作の矯正による下肢動作教示を目的とした装着型トレーニング装置の開発
3. 学会等名 第21回 公益社団法人 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 (SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神村知皓, 佐々木大輔, 八瀬快人, 門脇惇
2. 発表標題 運動矯正への応用を目的とした空圧駆動式可変摩擦ダンパーの開発
3. 学会等名 第20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(SI2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------