

令和元年6月12日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06185

研究課題名(和文) 次世代空圧ソフトアクチュエータを使用した内骨格型パワーアシストウェアの開発

研究課題名(英文) Development of Endskeleton-Type Power Assist Wear using Next Generation Pneumatic Soft Actuator

研究代表者

佐々木 大輔 (Sasaki, Daisuke)

香川大学・創造工学部・准教授

研究者番号：50372686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来の空圧駆動のパワーアシストロボットでは、アクチュエータを駆動するエアバルブなどが、重量などの面においてパワーアシストウェアに最適化されておらず空気圧源全体の重量増加が課題であった。本研究ではエアチューブを狭窄させ空気の通過・遮断が可能な自己パイロット弁とアクチュエータを準一体構造とした機構を開発し、空圧源の軽量化および重量の偏在を解決した。この空圧源を用いたパワーアシストウェアによる歩行実験を行った結果、十分な性能を持つことが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

少子高齢化問題解決のため、近年介護を含む重労働作業の負担軽減を目的に、種々のパワーアシストロボットが開発されている。本研究課題では、パッシブ型同様に用途を限定し作業の軽労化を目的に、装着性と機能性を向上させた衣服状パワーアシストロボットを実現するための基礎技術を開発した。本課題により得られた知見は、実際の現場で使用が容易な空圧駆動のパワーアシストロボットの実現に寄与することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Because these elements used generally in factory are not designed optimally for wearable device, in previous pneumatic power assist robot, it has been technical issue that peripheral pneumatic elements such as air valve increases whole weight of air source. Mechanism in which the actuator and the original air operate valve are semi-integrated is developed in this study. This valve regulates air flow rate by constricting air tube put in valve. The developed mechanism realizes weight reduction of the air source and solving uneven weight distribution. In addition, the performance of power assist wear driven with developed mechanisms is verified experimentally.

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 ソフトアクチュエータ 空気圧

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

少子高齢化問題解決のため、近年介護を含む重労働作業の負担軽減を目的に、種々のパワーアシストロボットが開発されている。これらは外骨格に高出力アクチュエータを接続しているため、高いアシスト力を発生することができる。人間に対し高出力のアクチュエータを使用し積極的なアシストが可能であることから、これらのパワーアシストロボットはアクティブ型のパワーアシストロボットに分類することができる。しかし、本質的には人間の骨格自由度より少ない自由度の高剛性の外骨格を装着することで装着者の動作が拘束されるため、長時間の装着は装着者の負担となる。また、高機能であるが故に装置の重量も増加するという課題がある。

外骨格機構を使用しないあるいはアクチュエータレスとした軽量な外骨格型パワーアシストロボットも開発されている。これらは、装置により作業負担の一部を補助することで作業の“軽労化”実現を目的にしている。これらは前述のアクティブ型に対して、受動要素により装置を構成することからパッシブ型のパワーアシストロボットに分類することができる。パッシブ型パワーアシストロボットは、着用負担を軽減し長時間着用することが可能であるものの、アクティブ型と比べるとアシスト力、機能性が低いという課題がある。

### 2. 研究の目的

本研究課題で開発するパワーアシストロボットは、パッシブ型同様に用途を限定し作業の軽労化を目的とする。ここで、軽量柔軟な空圧ソフトアクチュエータと布を使用することで、パッシブ型の長所を有しつつ、アシスト力、機能性を向上させた外骨格を使用しない衣服状の“パワーアシストウェア”を実現する。

### 3. 研究の方法

本研究では、外骨格を用いない空気圧駆動のパワーアシスト装置の開発を目的として研究を行ってきた。従来の空圧駆動のパワーアシストロボットでは、アクチュエータを駆動するエアバルブなどが、重量などの面においてパワーアシストウェアに最適化されておらず空気圧源全体の重量増加が課題であった。

市販のエアバルブは電磁アクチュエータで駆動させるものが大半であり、応答性に優れるものの電磁アクチュエータの重量により全体重量が増加している。電磁駆動以外のバルブには、空圧によりバルブを駆動するパイロット弁がありアクチュエータの軽量化により全体重量の削減が可能である。パイロット弁は応答性では電磁駆動に劣るものの、重量の面において有利であり、アクチュエーターバルブ間の距離を削減することで、圧力応答の向上も可能である。

そこで、本研究ではエアチューブをベローズにより狭窄させ空気の通過・遮断が可能な自己パイロット弁を開発し、アクチュエータと準一体構造とした。これにより、バルブ全体の軽量化および分散化が可能となり空気圧源への重量集中の回避を実現できた。また、開発したバルブおよび研究代表者らがこれまでに開発し本研究でパワーアシスト装置に最適化したエネルギー特性を持つ容積可変タンクを組み合わせることでこれまでと比較し 30%程度軽量化した空圧源を実現した。この空圧源を用いたパワーアシストウェアによる歩行実験を行った結果、十分な性能を持つことが確認できた。

### 4. 研究成果

#### (1) 自己パイロット弁の開発

本バルブの構造を Fig. 1 に示す。シリコンチューブ（内径 4[mm]、外径 6[mm]）、ウレタン製ボディ、ABS・PLA 製部品、ソフトアクチュエータ（樹脂ベローズ）、圧縮ばね、Oリングによって構成されている。チューブを除いた本体寸法は、最外径 28[mm]、長さ 65.5[mm]、本体重量は約 19[g]である。樹脂ベローズが伸長することで、シリコンチューブを閉止しているニードルを押し出し、管路を開放させる N.C. の 2ポートエアオペレートバルブである。チューブそのものを管路に使用することで、開放時に良好な流量特性を得ることができる。また、配管を直線状に配置したことで管路の曲がりによる損失の低減も期待できる。さらに、樹脂ベローズを用いることでエアオペレートバルブとして機能し、同等の有効断面積を持つ電磁弁よりも軽量となることも併せて期待できる。

エアバルブの流量特性を評価する値として有効断面積を使用する。有効断面積とは、実際に流れる流量より求めた、計算上の断面積である。流量計から検出した体積流量（温度 20℃、大気圧 101.3[kPa(abs)]）と空気の密度  $\rho$  (1.204 [kg/m<sup>3</sup>]) との積から質量流量  $G$  [kg/s] を求める<sup>①</sup>。実験から求めた圧力と有効断面積の関係を Fig. 2 に示す。また、本バルブのチューブ単体と本バルブの有効断面積を Table 1 に示す。

Fig. 2 に示すように、ベローズ供給圧が増加するほど管路の有効断面積が増加し、35[kPa]以上で一定の有効断面積となる。また、Table 1 よりチューブ単体と比較して、バルブの有効断面積が減少している。チューブは交換を容易にするため、完全にバルブ本体と固定されておらず、ニードルの押し付けによって保持している。開放時にもニードルの先端がチューブを押し付けており、有効断面積が減少したと考えられる。

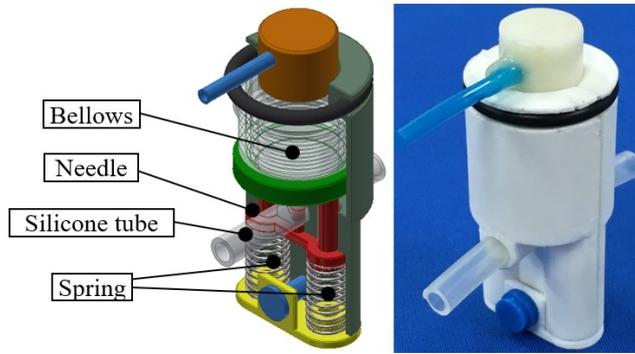


Fig. 1 Structure of developed valve

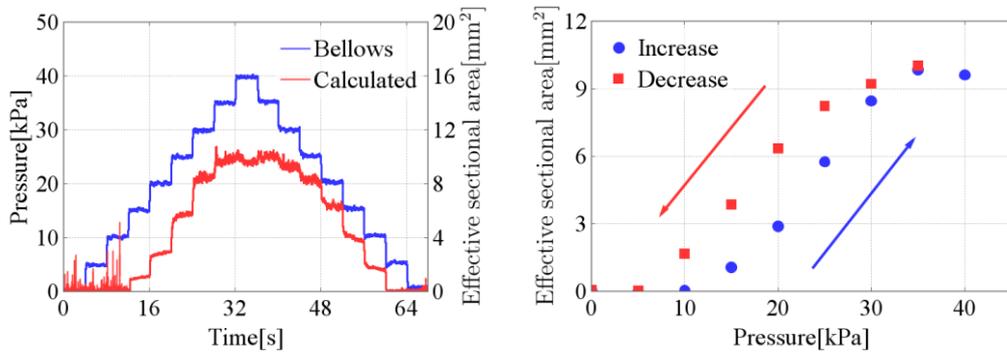


Fig. 2 Measured bellows pressure and calculated effective sectional area

Table 1 Comparison of effective sectional area

	Effective sectional area [mm <sup>2</sup> ]
Tube	11.48
Developed valve (40[kPa])	9.78

## (2) 携行型空気圧供給システムの構築と装着実験

本システムを構築するにあたり、指標として利用するエアパワー及び空気圧エネルギーを指標とする<sup>①②</sup>。空気圧エネルギーとは、大気圧の温度や圧力を基準として、圧縮された状態の空気を持つエネルギーを相対的に定義したもので、圧縮空気から取り出すことが可能な有効エネルギーである。

### ・アクチュエータの空気圧エネルギー

実験から求めた空気圧エネルギーと圧力の関係を Fig. 3 に示す。駆動圧力を 5-20 [kPa] とした場合、Fig. 4 に示すウェアで使用するアクチュエータ 1 個が消費するエネルギーは 1.4 [J] である。

### ・エアポンプのエアパワー特性

実験から求めた圧力とエアパワーの関係を Fig. 5 に示す。消費電力および吐出圧力から空気圧供給システムに最適であるとして選定した Fig. 6 に示すエアポンプ（応研精工社製 RFP32B28R）の最大エアパワーは 50 [kPa] の時に 1.31 [W] である。また、40-60 [kPa] の時にエアパワーが最大となるため、エアポンプを同圧力帯で使用する。

### ・球殻型容積可変タンク

本研究で構築する空気圧供給システムの最も重要な構成要素は、前述の自己パイロット弁ならびに容積可変タンクである。容積可変タンクはゴム材料で構成することでタンク内の圧力によりタンク容積が変化する。これにより、圧縮空気の蓄積および放出時におけるタンク内の圧力変動を緩和することが可能である。この特性を利用し上記エアポンプの最大効率圧力帯近傍にタンク圧を維持することで、システムの消費電力低減およびそれに伴うバッテリー数削減によりシステム全体の小型化・軽量化が可能となる。

構築する空気圧供給システムには 2 個の容積可変タンクを使用しており、2 個使用時における空気圧エネルギーと圧力の関係を Fig. 7 に示す。青線がタンク流入時、赤線がタンク流出時である。実験結果からもわかるように、流入・流出時ともにエアポンプの最大効率域で圧力変動を緩和できている。40-60 [kPa] 間の流入時エネルギーはサンプル A で

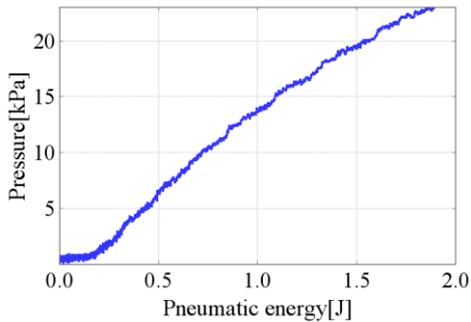


Fig. 3 Pneumatic energy of actuator



Fig. 4 Overview of actuator

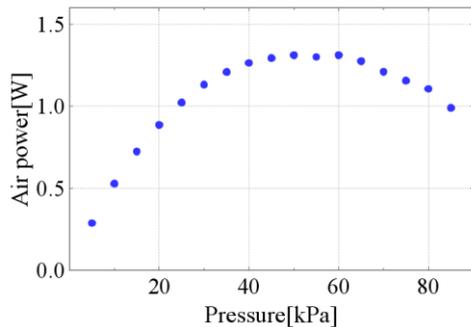


Fig. 5 Air power of air pump



Fig. 6 Overview of air pump

2.85[J], サンプル B で 3.55[J], 流出時エネルギーはサンプル A で 2.39[J], サンプル B で 2.92[J]である。

#### ・空気圧供給システムの構成

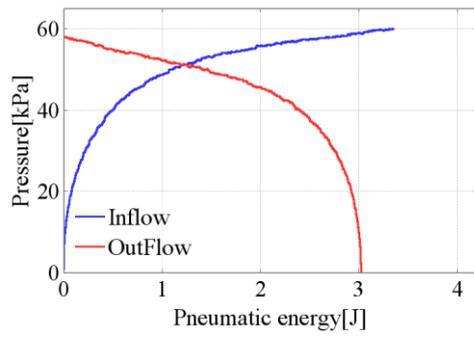
本研究で提案する携行型空気圧供給システムの構成を Fig. 8 に示す. 本システムはエアポンプ, 球殻型容積可変タンク, 給排気用 2 ポートバルブ, AVR マイコン, バッテリー, 圧力センサで構成される. 圧力センサをタンクとアクチュエータに取り付け, マイコンを用いてエアポンプや給排気用 2 ポートバルブを制御し任意の圧力に調圧する. 上記の各種構成要素の性能から供給システムにはエアポンプを 4 台, 容積可変タンクを 2 個搭載する.

#### ・装着実験結果

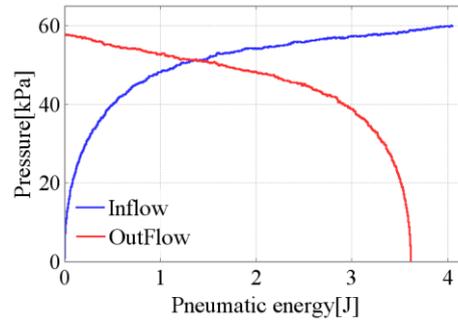
Fig. 9 にパワーアシストウェアの外観を示す. 構築したパワーアシストウェアのアクチュエータ給排気タイミングは, 接触力センサ (インターリンクエレクトロニクス社製 FSR-402) と距離センサ (シャープ株式会社製 GP2Y0A41SK) を用いて行う. 接触力センサは両足の踵にそれぞれ 1 個配置し, 踵の接地・非接地を検出する. 距離センサは立位状態で床から約 70[mm] 程度離れた靴の外側面に設置し, 床面との距離を検出する. 接触力センサのみを用いて給排気バルブを操作した場合, アクチュエータの圧力応答遅れから支援タイミングがずれる. そのため, 距離センサを用いて足が接地する前にバルブを操作し, 支援タイミングのずれを補正している. これにより適切なタイミングでアクチュエータ内圧を目標圧 20[kPa] に加圧する. そして, 接触力センサを用いて床面から足が離れたことを検出するとアクチュエータ内圧を 5[kPa] まで排気するようにバルブを操作している. この処理を両膝のアクチュエータに繰り返し行い支脚のアクチュエータを加圧, 遊脚のアクチュエータを減圧することで歩行動作を行う. この時, アクチュエータ内圧を検出するために膝前面のアクチュエータには圧力センサ (パナソニック社製 ADP5141) を取り付けている.

構築した空気圧供給システムをパワーアシストウェアに搭載し, 支援動作時においても供給システムが十分な性能を有しているか確認するために, 片足 1[s] の 2[s] 周期で直線状に歩行した. 被験者は 24 歳健康常成人男性 1 名である (身長 1650[mm], 体重 55[kg]).

実験結果を Fig. 10 に示す. 容積可変タンクの圧力は 40[kPa] 以上を維持しており. 給気後の圧力降下からおおよそ 0.8[s] で 60[kPa] まで回復している. また, 左右の膝に取り付けられたアクチュエータは加圧・減圧状態を繰り返しているが, 加圧時には目標圧力 20[kPa] よりも 2[kPa] 低い 18[kPa], 減圧時には目標圧力 5[kPa] よりも 2[kPa] 高い 7[kPa] となっている. このアクチュエータの目標圧力との誤差によって消費エネルギーが減少し, タンクの圧力回復が早まったと考えられる. また, アクチュエータへの負荷によって変形し, 容積が減少していると考えられる.



(a) Sample A



(b) sample B

Fig. 7 Pneumatic energy of variable volume tank

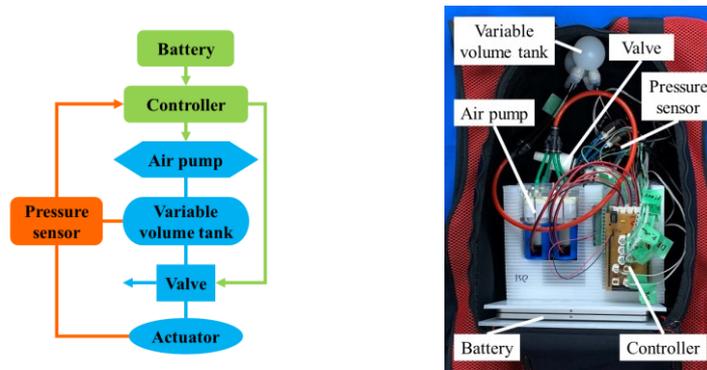
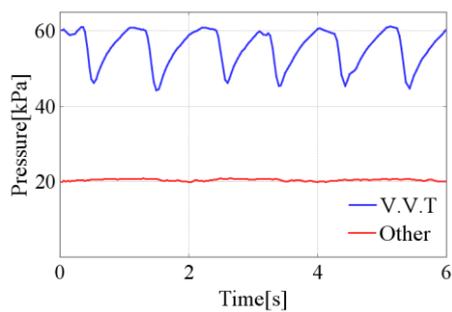


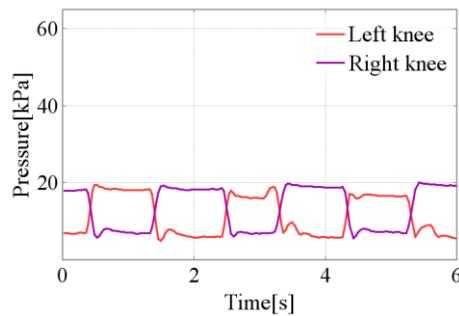
Fig. 8 Structure and overview of air supply system



Fig. 9 Overview of power assist wear



(a) V.V.T. & Actuator(other)



(b) Actuator(left knee & right knee)

Fig. 10 Pressure responses of V.V.T and actuators

<引用文献>

- ①佐々木, 高岩, 瀧: “空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための小型空気圧供給システムの開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 7, pp. 490-496, 2015
- ②蔡, 藤田, 香川: 空気圧駆動システムにおけるエネルギー消費とその評価, 日本油空圧学会論文集, vol. 32, no. 10, pp. 118-123, 2001

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 井上豊, 佐々木大輔, 高岩昌弘, 空気圧ソフトアクチュエータを用いたエアオペレートバルブの開発, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 第 54 巻, 第 1 号, pp.118-125, 2018

[学会発表] (計 3 件)

1. 井上豊, 佐々木大輔, 高岩昌弘, 空気圧ソフトアクチュエータを用いたエアオペレートバルブの開発, 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 (SI2016), 2016
2. 井上豊, 佐々木大輔, 高岩昌弘, 空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための 2 ポート型エアオペレートバルブの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2018
3. 井上豊, 佐々木大輔, 高岩昌弘, 空圧ウェアラブルデバイスに用いる供給システムの構築, 第 19 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 (SI2018), 2018

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。