

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560315

研究課題名(和文) 低コスト・ウェアラブル空気圧制御機器の開発と性能改善

研究課題名(英文) Development of Low-cost Wearable Pneumatic Control Device and Improvement of Its Control Performance

研究代表者

赤木 徹也 (AKAGI, Tetsuya)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：50311072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：低コスト・ウェアラブル制御機器として、柔軟空気圧シリンダを用いた上肢のポータブルリハビリテーション機器やバイラテラル式手首のリハビリテーション装置などを開発するとともに、屈曲チューブを用いた低価格な流体制御サーボ弁やオンオフ弁を用いた疑似サーボ弁などのウェアラブル制御機器の性能改善を行った。また、これらの開発機器と組込コントローラを用いた安価なウェアラブル制御システムを実現した。

研究成果の概要(英文)：As a low-cost wearable control device, the portable rehabilitation device for upper limb and the bilateral rehabilitation device for wrist were proposed and tested. The low-cost servo valve using buckled tubes and the quasi-servo valve using on/off valves were also proposed and tested. As a result, using these devices and low-cost embedded controller, low-cost wearable control system could be realized.

研究分野：機械制御・メカトロニクス

キーワード：ソフトメカニズム ウェアラブルシステム メカトロニクス 空気圧制御機器 ソフトアクチュエータ  
組込み技術

1. 研究開始当初の背景

近年の少子高齢化社会への急激な推移に伴い、将来における介護支援者の高齢化や実質的な労働力不足は深刻な問題である。また近年、情報ネットワークが我々の生活に果たす役割は大きくなり、従来の視覚・聴覚の情報フィードバックだけではなく、触覚など力のフィードバックシステムの充実が必要不可欠となる。そこで本研究では、リハビリテーションに使用できるウェアラブル駆動システムや、情報ネットワークにおける人体への力フィードバックシステムの実現をめざし、これらのシステムに必要な機器の開発をめざす。つまり、人体に直接アクチュエータを取り付ける、もしくは接触する環境で使用しても十分安全が保たれ、かつ、安価で軽量な柔軟アクチュエータの開発と、使用者の負担を軽減するため、そのアクチュエータの制御に必要な機器の小型・軽量化をめざしたウェアラブル小型制御機器の開発とその性能改善を目的とする。また、このような柔軟構造の制御機器は、配管内検査用ロボットや探索型レスキューロボット用のアクチュエータとしても有効である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、2004年に図1に示す柔軟チューブをシリンダに用いたロッドレス型柔軟空気圧シリンダの開発を行った。シリンダは、通常のシリンダの1/20程度の重量にもかかわらず、動作中に外力により変形を生じてもプッシュプル（押し出し・引込み）動作が可能である。さらに試作アクチュエータは、圧力印加時より無印加時の摩擦が大きく、無印加時にスライドステージがその位置に留まろうとする『自己保持機能』を有している。そのため、福祉医療分野だけでなく多くの分野での応用が考えられる。さらに、2010~2011年の研究(科研課題番号：22760201)でチューブ上の特定面に形成したスリットをインクリメンタル型柔軟リニアエンコーダで読込むセンサー体型柔軟空気圧シリンダを開発した。しかし、チューブの軸方向回転によりスリット部が検出面から外れることで検出できなくなる問題を有していた。そこで本研究では、回転が生じても変位計測可能なセンサに改良するとともに、柔軟空気圧シリンダを用いたリハビリ・福祉機器の開発について検討する。

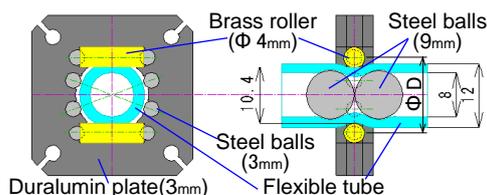


図1 柔軟空気圧シリンダ

(2) 一方、2011年には、入浴介助等のアクチュエータとして、安価な光センサでチューブ

内径を測定して、図2に示すような軸方向変位を推定する内径センサ内蔵型ゴム人工筋を開発した。この内径センサは人工筋端部付近の内径を測定することで、外界に変位センサを使うことなく軸方向変位を比較的高精度(標準偏差±0.4 mm)で推定できる利点を有するものの、湾曲等の変形が加わった場合、推定誤差が大きくなる問題を有していた。そこで、本研究では、新たな内径センサの開発について検討し、推定誤差を軽減するための組み込み技術を用いた安価な計測システムの開発をめざす。

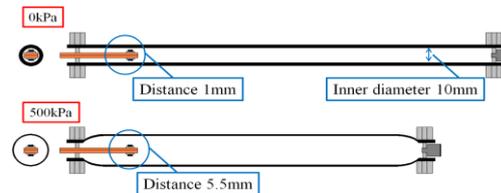


図2 内径センサ内蔵型ゴム人工筋

(3) これらのシリンダや人工筋を駆動する制御弁のウェアラブル化のため、小型のサーボ制御弁の開発が必要であり、さらに、搭載バッテリー重量の問題から弁の消費電力の低減が必要不可欠となる。つまり、電池でも数時間駆動可能な流体制御弁とその制御システムの開発である。以上のように、これら低コストのウェアラブル制御機器の開発とその性能改善が本研究課題の目的となる。

3. 研究の方法

(1) 2011年(科研課題番号：22760201)に開発した柔軟リニアエンコーダの改良として、スリットチューブが回転しても軸方向変位が計測可能な計測システムへと改良する。

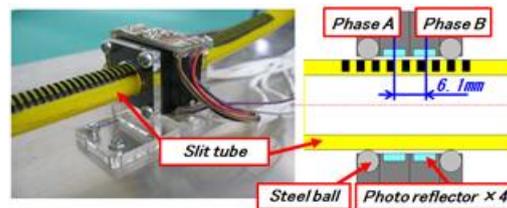


図3 柔軟リニアエンコーダ

図3に示す従来のリニアエンコーダでは、A相、B相に相当する2個のフォトリフレクタにより、チューブ表面に施したスリットを読み取ることで、相対変位の計測を行うが、シリンダが柔軟で自由に曲げることができることから、湾曲時の読み取り誤差を減らす補正が必要であった。そこで、スリット側の逆側の2個のフォトリフレクタでチューブが湾曲等により生じる隙間を検出し、誤検出を防ぐシステムを構築していた。しかし、前述のように、スリットチューブが回転しても変位計測を行うためにはリング状のスリットをチューブ表面に加工する必要がある。そこで、本研究ではまず、ロータリーアタッチメントによりチューブ円周方向にスリットパター

ンを加工できるレーザ加工機（COMNET 製 C-180）を使ってリング状スリットチューブ製作した。さらに、従来の湾曲時の補正方法が適用できないため、エンコーダの検出方法や新たに湾曲時の補正方法について検討し、それに伴う制御回路を本申請で購入したプリント基板加工機を用いて作成する。さらに、湾曲時の補正アルゴリズムと Up/Down カウンタは低価格の組込みコントローラをハードウェアとして実現する。

(2) 内径センサ内蔵型ゴム人工筋に関して、人工筋が外力により湾曲した状態でも正確に軸方向変位を推定するため、内径センサが傾斜した場合でも内径を正確に測定できるセンサに改良する必要がある。具体的には、内径センサ内での内径計測位置を増やすためフォトリフレクタを増設し、基板形状の変更やチップ抵抗等を用いた回路の小型化を行う。そのため、任意形状の回路基板を構成できるプリント基板加工機(MITS 製 AutoLab)を購入し、小型回路を製作する。また、センサ内のフォトリフレクタの距離/出力特性を考慮した人工筋の軸方向変位計測システムを低価格の組込みコントローラ (Renesas 製 H8/3664) で構成する。

(3) ウェアラブルな制御弁に関して、2009 年に(株)SMC との共同研究で開発した自己保持機能を有する流体制御弁の速応性改善をめざした解析モデルを提案し、形状パラメータの変化に対する応答変化を調べ、弁の最適設計を行う。

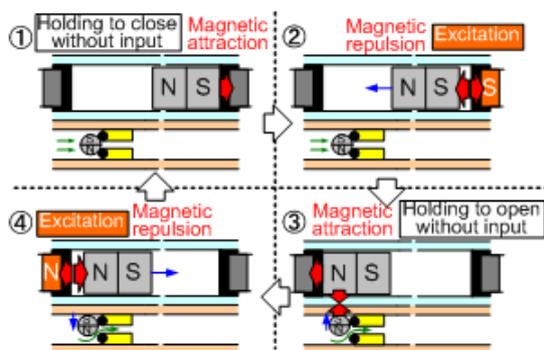


図4 自己保持機能を有する弁の動作原理

この弁は図4の動作原理に示すように、鉄心に磁着したシリンダ状磁石(①)が、右側にあるソレノイドを数 ms だけ励磁することで反発力を生じ(②)、左側の鉄心に磁着することで、弁管路を塞いでいる球状磁石を引き付け、弁を開口した状態を保持する(③)。この際、電気的な入力を加えなくても開口が保持できる。また、弁を閉める場合は同様に左側のソレノイドを励磁し、反発力を生じ(④)、円柱状磁石を右側の鉄心に磁着させることで、球状磁石を引き付ける力が外れ、チェック弁の原理による自動的に弁を閉じる。以上のように試作弁は開口や閉口に対して電気的なエネルギーを消費しないものの、円柱状磁石の動きによるむだ時間が市販の弁より遅く、改善の必要がある。そこで、この円柱状磁石や

球状磁石の動きを含めた弁の解析モデルを構築し、そのモデルを基に数値計算により速応性の改善を目指した弁の最適設計を行う。(4) また、上述の内径センサ内蔵型ゴム人工筋や変位センサー一体型柔軟空気圧シリンダを用いてリハビリテーション機器等の開発を行う。具体的には、図5に示す柔軟空気圧シリンダを用いた伸縮湾曲可能な柔軟ロボットアームに前述の変位センサー一体型柔軟空気圧シリンダを組み込み、安価なコントローラを用いた手首のリハビリテーション機器の開発および性能改善について検討する。(5) さらに余力があれば、柔軟空気圧シリンダを用いた新たなリハビリテーション機器の開発や低コストのウェアラブルサーボ弁の開発について検討する。

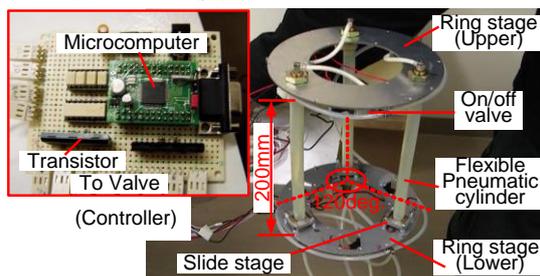


図5 柔軟ロボットアーム

#### 4. 研究成果

(1) 低コスト・ウェアラブル空気圧制御機器の開発と性能改善として、まず、湾曲や回転を生じて直動変位が計測できる柔軟なリニアエンコーダを開発した。エンコーダは図6に示す柔軟チューブにリング状のスリットを施したリニアエンコーダである。さらに、スリットをフォトリフレクタで検出し、安価な組込コントローラにより直動変位に変換する計測システムを開発した。



図6 回転動作可能な柔軟リニアエンコーダ

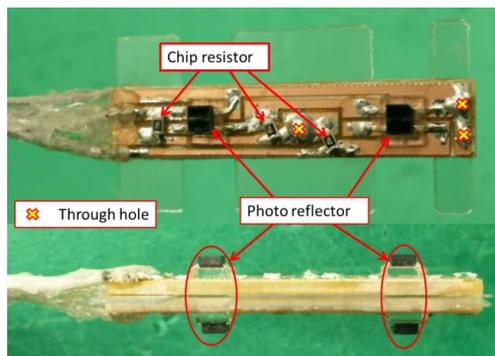


図7 傾斜角補正機能付き内径センサ

(2)次に、水中でも変位計測が可能な内径センサ内蔵型ゴム人工筋の改良を行った。具体的には、内径センサ自体のチューブ内での傾斜角を検出できるように4つのフォトフレクタを用いたセンサ(図7)に改良し、さらに低価格の組込コントローラ(㈱Renesas H8/3664)を用いて、内径センサに傾斜角の検出機能と内径計測の傾斜補正機能を加え、人工筋に湾曲等が生じた場合でも変位計測が可能なシステムを低価格で構築した。

(3)永久磁石を利用して開閉時のみに電力を消費し、開閉を保持するためのエネルギーを消費しない自己保持機能を有する流体制御弁(図4参照)では、図8に示す最適設計のための解析モデルを構築し、実験値を比較することでモデルの有効性を確認した。

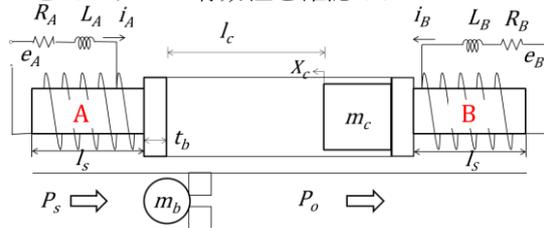


図8 自己保持機能を有する弁のモデル

(4)柔軟空気圧シリンダ(図1参照)を用いた手首や腕のリハビリテーションシステムとして、2本のリング状の柔軟空気圧シリンダを直交させた球面アクチュエータの性能改善を行った。具体的には、制御に用いる低価格のOn/off弁から構成される疑似サーボ弁に排気時の流量の補正を行い、さらに圧力制御型の制御システムを安価な組込コントローラで構成すること動特性を改善した。さらに、図9に示すようにこの球面アクチュエータをポータブルな駆動システムに改良した。開発機器は、両手で持った状態で、球面アクチュエータを動かすことで肩を含む上肢へ他動運動を与えることを狙ったものである。このシステムでは、デバイスが傾斜した場合でも二つのステージ間のなす角を計測するための計測システムも安価な組込コントローラと加速度センサで実現した。

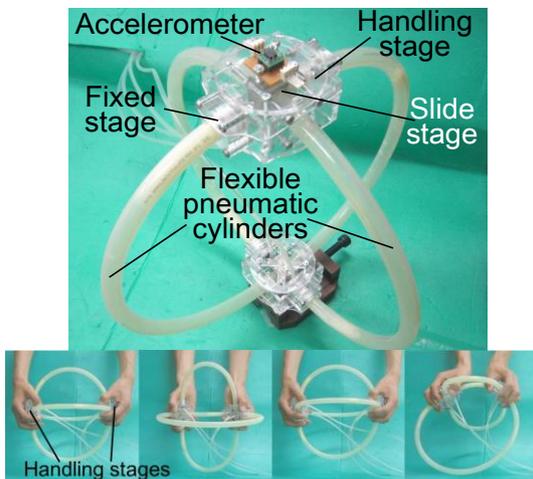


図9 ポータブルリハビリテーション装置



図10 改良した柔軟ロボットアーム

また柔軟空気圧シリンダを用いた(手首リハビリテーション用)伸縮・湾曲ロボットのコントローラに処理速度の早いマイクロコンピュータを用いることで性能改善を図った。さらに、このロボットアームを、リハビリテーション機器への応用するため、図10に示すバイラテラル方式のマスタースレーブ制御システムへ改良した。具体的には、マスター側にスレーブの状態をフィードバックできる安価なデバイスとして、バックドラバビリティを有する柔軟空気圧シリンダを開発し、組込コントローラを用いた安価な制御システムを実現した。これは各シリンダ変位の偏差が5mmを越えた場合にマスター(理学療法士)に力覚をフィードバックする簡易なシステムである。以上の開発機器に用いられるウェアラブルな制御弁の性能改善として、安価なOn/Off弁を用いて流量を疑似アナログ的に制御する疑似サーボ弁を、圧力制御型の弁に改良した(図11参照)。

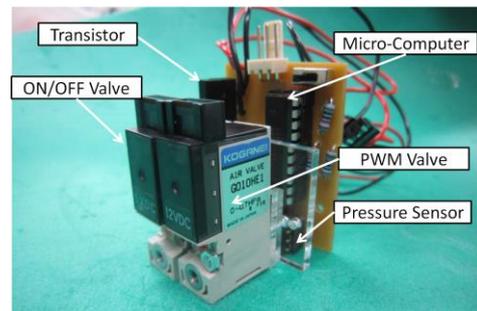


図11 圧力制御型疑似サーボ弁

さらに、排気時の流量低下を出力圧力のフィードバックにより補正する手法として給側と出力側の圧力差によって生じる流量変化の補正を提案し、圧力追従制御性能を改善した。また、この補正に加え、制御則としてスライディングモード制御を適用した。具体的には、短い制御周期を実現するため、組込コントローラを2つ用いたデュアルのコントローラを提案・試作し、解析モデルを用いたシミュレーションと実機を用いた実験によりその有効性を確認した。

(5)さらに、当初の計画になかったアナログ

的な流量・圧力を調整するウェアラブルサーボ弁の低コスト化を行った。具体的には、従来コストの高い開口面積をアナログ的に変える機構を、図 12 に示すように屈曲したチューブの屈曲角を調節することで実現し、弁全体の低コスト化を図った。この弁の角度調整機構には、玩具に使われる安価な RC サーボモータを用い、安価な組込コントローラを制御器に用いており、従来 5~20 万円程度するサーボ弁を 1,000 円程度の低コストで構成した。さらに圧力センサによる圧力フィードバック制御を行う弁の開発や、ゴム人工筋の位置決め制御に試作弁を応用し、その有効性を確認した。

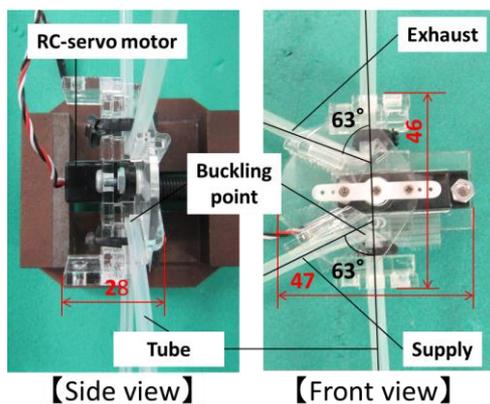


図 12 屈曲チューブを利用したサーボ弁

安価な肩のリハビリテーション機器の開発として、脇に挟むことで使える薄型の封筒形状のアクチュエータを開発した。具体的には、ラミネートフィルムと紙を用いて、比較的短時間で安価に製作できるマチを有する封筒型のアクチュエータを開発した。さらに、アクチュエータへの入力配管を削減するため、複数個のアクチュエータを直列に繋いだ多室式封筒型アクチュエータ (図 13 参照) を試作した。また、それを 2 つ用い、ロープのように交互に重ねあわせることにより加圧時に変位方向が一方向に拘束できることも確認した。



図 13 多室式封筒型アクチュエータ

さらに、この封筒型アクチュエータの駆動源として、低沸点流体を用いた流体圧力源の開発を行った。具体的には、この圧力源を封筒型アクチュエータに内封するため、薄型で柔軟性のあるヒータとして、カーボンナノチ

ューブを含む特殊な塗料を使った柔軟ヒータを開発し、電圧印可だけで膨張する柔軟アクチュエータを開発した (図 15 参照)。

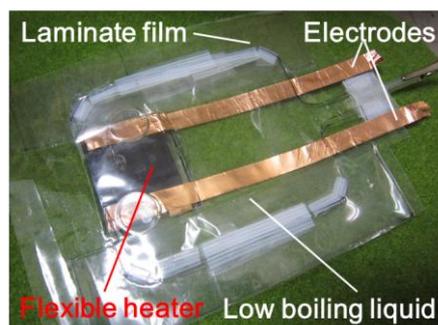


図 15 圧力源内蔵型薄型柔軟アクチュエータ。

以上、本研究では当初の計画にはなかったウェアラブルデバイスの開発を行い、本申請の目的である「低コストなウェアラブル空気圧制御機器の開発と性能改善」を十分達成できているといえる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① T.Morimoto, Mohd Aliff, T.Akagi, S.Dohta, Development of Flexible Pneumatic Cylinder with Backdrivability and Its Application, International Journal of Materials Science and Engineering, 査読有, Vol. 3, No. 1, 2015, 7-11, 10.12720/ijmse.3.1.7-11.
- ② T.Akagi, S.Dohta, S.Fujimoto, Y.Tsuji and Y.Fujiwara, Development of Flexible Thin Actuator Driven by Low Boiling Point Liquid, International Journal of Materials Science and Engineering, 査読有, Vol. 3, No. 1, 2015, 55-59, 10.12720/ijmse.3.1.55-59.
- ③ Mohd Aliff, S.Dohta and T.Akagi, Control and Analysis of Robot Arm using Flexible Pneumatic Cylinder, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol. 1, No. 5, dr0051, 1-13, 10.1299/mej.2014dr0051.
- ④ Abdul Nasir, T.Akagi, S.Dohta, and A.Ono, Development of Small-Sized Servo Valve Controlled by Using Buckled Tube and Its Application, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 7, No. 4, 2013, 516-527, 10.1299/jsdd.7.516.
- ⑤ T.Akagi, S.Dohta, C.Liu and A.Ando, Development and Control of Flexible Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinders, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 査読有, Vol. 5, No. 3, 2013, 184-192, 10.1504/IJAMECHS.2013.057441.
- ⑥ Y.Moriwake, T.Akagi, S.Dohta and F.Zhao, Development of low-cost

pressure control type quasi-servo valve using embedded controller, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol.6, No.4, 2012, 493-500, 10.1016/j.proeng. 2012.07.203.

- ⑦ T.Akagi, S.Dohta, H.Matsushita and A.Fukuhara, Development of Flexible Pneumatic Cylinder with Built-in Flexible Linear Encoder and Flexible Bending Sensor, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol.6, No.4, 2012, 359-372, 10.1299/jsdd.6.359.
- ⑧ 赤木徹也, 堂田周治郎 他, 柔軟空気圧シリンダを用いた伸縮・湾曲機構の試作と組込みコントローラによる姿勢制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 査読有, Vol.43, No.3, 2012, 55-61.

[学会発表] (計33件)

- ① Mohd Aliff, S.Dohta, T.Akagi and T.Morimoto, Control of Flexible Pneumatic Robot Arm Using Master Device with Pneumatic Brake Mechanism, The 9th JFPS Int. Symp. Fluid Power, 松江(島根), 2014.10.30.
- ② A.Ono, T.Akagi, S.Dohta and Abdul Nasir, Improvement of Low-cost Wearable Servo Valve Using Buckled Tube, The 9th JFPS Int. Symp. Fluid Power, 松江(島根), 2014.10.30.
- ③ Mohd Aliff, S.Dohta, T.Akagi and T.Morimoto, Control of Flexible Pneumatic Robot Arm Using Master Device with Pneumatic Brake Mechanism The 9th JFPS Int. Symp. Fluid Power, 松江(島根), 2014.10.31.
- ④ T.Akagi, S.Dohta and Y.Zhang, Theoretical and Experimental Analysis of Wearable Control Valve With Self-holding Function Using Permanent Magnets, The 9th JFPS Int. Symp. Fluid Power, 松江(島根), 2014.10.30.
- ⑤ K.Taniguchi, S.Dohta, T.Akagi and Y.Kenmotsu, Improvement of Rubber Artificial Muscle with Built-in Inner Diameter Sensor and Its Application, Int. Forum on Systems and Mechatronics, Tainan(Taiwan), 2014.10.13.
- ⑥ T.Akagi, S.Dohta and H.Qiu, Pipe Inspection Robot Using Flexible Pneumatic Cylinder Built-in Pneumatic Driving System, Int. Forum on Systems and Mechatronics, Tainan(Taiwan), 2014.10.13.
- ⑦ S.Dohta, T.Akagi and Y.Masago, Analysis and Improvement of Digital Servo Valve with Self-holding Function, Int. Forum on Systems and Mechatronics, Tainan(Taiwan), 2014.10.13.
- ⑧ T.Akagi, S.Dohta, Y.Moriwake, A.Ono and Abdul Nasir, Low-Cost Pressure

Control Valves Using On/Off Valves and Servo Motor Controlled by Embedded Controller, The 12th Int. Symp. Fluid Control, Measurement and Visualization, 奈良(奈良), 2013.11.22.

- ⑨ T.Akagi, S.Dohta, Y.Moriwake, A.Ono and Abdul Nasir, Low-Cost Pressure Control Valves Using On/Off Valves and Servo Motor Controlled by Embedded Controller, The 12th Int. Symp. Fluid Control, Measurement and Visualization, 奈良(奈良), 2013.11.22.
- ⑩ T.Akagi, S.Dohta, Mohd Aliff, Y.Moriwake and F.Zhao, Application and Analysis of Flexible Pneumatic Cylinder Driven by Low-cost Quasi Servo Valve, 2013 IRCET Int. Research Conf. Engineering and Technology, Singapore(Singapore), 2013.9.14.
- ⑪ S.Dohta, T.Akagi, Mohd Aliff and A.Ando, Development and Control of Simple-Structured Flexible Mechanisms using Flexible Pneumatic Cylinders, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, Wollongong (Australia), 2013.7.11.
- ⑫ T.Akagi, S.Dohta and Y.Masago, Wearable Control Valves Driven by Small Sliding Force, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, Wollongong (Australia), 2013.7.11.
- ⑬ S.Dohta, T.Akagi, Y.Masago, H.Matsushita and Y.Zhang, Improvement of Small-Sized Digital Servo Valve for Wearable Pneumatic Actuator, 5th Int. Conf. Positioning Technology 2012, Kaohsiung(Taiwan), 2012.11.15.
- ⑭ T.Akagi, S.Dohta, H.Matsushita and Mohd Aliff, Development of Flexible Pneumatic Actuator Using Sliding Mechanisms and Its Application, 5th Int. Conf. Positioning Technology 2012, Kaohsiung(Taiwan), 2012.11.15.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

赤木 徹也 (AKAGI, Tetsuya)  
岡山理科大学・工学部・教授  
研究者番号: 50311072

### (2) 研究分担者

堂田 周治郎 (DOHTA, Shujiro)  
岡山理科大学・工学部・教授  
研究者番号: 10090218

### (3) 連携研究者

久野 弘明 (KUNO, Hiroaki)  
岡山理科大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40344618