

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K01598

研究課題名（和文）空気圧柔軟アクチュエータによるアクティブ補装具の開発

研究課題名（英文）Development of Active Orthosis Using Pneumatic Flexible Actuators

研究代表者

藤本 真作（FUJIMOTO, Shinsaku）

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：00278912

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：研究の目的は高齢者のQOL向上および身体的・精神的負担を軽減化するために、使用者の個別仕様化を実現したアクティブ補装具の制御方法を確立することである。  
補装具を駆動するために人間親和性の高い空気圧駆動による繊維状アクチュエータ（以降、PRAと略す。）の開発とそのモデルを構築した。本課題で開発したPRAを使用した腰部および下肢用のアクティブ補装具の開発に着手した。また、磁気式の変位センサを用いた制御法と外力推定法を提案した。この作用によって位置制御を行いつつ、人に加えるサポート力やアシスト力を推定することができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した空気圧繊維状アクチュエータ(PRA)は、通常の布にシリコンチューブを縫い合わせた極めて単純な構造である。そのためウェアラブルなアクチュエータを生成することが簡単であると考えられる。また、このアクチュエータの位置センサとして開発した磁気式変位センサは柔軟なアクチュエータの変位を計測できる利点を持っている。このセンサを発展させると変位だけではなく、その姿勢も同時に計測できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to establish a control method for active prostheses that realizes individualized user specifications in order to improve the QOL of the elderly and reduce the physical and mental burden.  
In order to drive the prosthesis, a pneumatically driven fibrous actuator (hereinafter abbreviated as PRA: Pneumatic Rubber-fiber constricted Actuator) with high human affinity has been developed. Then, a mathematical model of the actuator was constructed. An active prosthesis for the back-pain relief and the prevention while walking (lower limbs) using the PRA developed in this study has been developed. We also proposed a control method using a magnetic displacement sensor and an external force estimation method. The proposed control method has made it possible to estimate the support force and assist force applied to a person while controlling the position of the active prosthesis.

研究分野：ロボット制御工学

キーワード：空気圧アクチュエータ 補装具 QOL向上 体圧センサ 磁気式変位センサ 下肢装具 制御系設計 システム同定

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

わが国の65歳以上の高齢化人口が全人口に占める比率である高齢化率は、2015年(10月1日現在)には26.6%(3,392万人)にもなっている。特に、高齢化率の増加速度が問題であり、社会構造や制度が急速な変化に対応できず、その結果、多くの社会的なひずみが生じるものと考えられる。

これらの問題に対して、高齢者のQOL(Quality Of Life)をできるだけ高い水準に維持しながら、健康で自立した生活をおくれる社会環境と自立を支援する福祉機器の開発、すなわち高齢者の自立、看護、介護等を支援するために工学技術を積極的に活用することが重要であると考えられる。このような立場から、工学的支援を行う対象、すなわち補装具に最も適した疾患や部位を限定する必要がある。本課題では腰痛緩和と歩行支援の下肢補装具について考える。

現在これらの目的で使用されている補装具はゴムやマジックテープなどで患部をパッシブに締め付けや固定を行うものであるため、

- (a) 体格にあったサイズ、形状のサポータを選択するのが困難である。(カスタマイズ化)
- (b) 長時間の使用による血行不良や皮膚のかぶれまた、動作時にずれや痛みが生じる。
- (c) 日常レベルでの(体調や要求に応じた)形状変更が困難である。(オンデマンド化)

などの多くの問題点が挙げられる。これらの問題を解決するために、本課題では締め付け機構に柔軟アクチュエータを用いたアクティブ補装具の開発を目指す。また高齢者などのQOLの向上および、身体的・精神的負担を軽減化するために、使用者の個別仕様化を実現したアクティブ補装具の制御方法の確立を目的としている。このような補装具には、人間親和性を有する柔軟アクチュエータの開発と、アクティブ補装具の制御に必要な不可欠な柔軟アクチュエータ群の群管理制御の理論的基礎を確立することが重要であると思われる。

こうしたアクティブ補装具を開発するためには、次章の4つ問題(目的)をクリアーする必要がある。

## 2. 研究の目的

本課題で実現すべき4つの目的(課題)を以下に詳しく述べる。

### (I) 空気圧繊維状アクチュエータの開発とモデル構築

アクティブ補装具の実現には軽量・高出力、安全性、信頼性に加え、柔軟なアクチュエータが要求される。そこで、本課題では空気圧駆動のアクチュエータを採用することにした。一般に、空気圧システムは電気式モータに比べ柔軟で人間親和性に優れており、出力対重量比にも富んだアクチュエータの実現に寄与している。こうした観点から、補装具に利用可能な布繊維状の新しいアクチュエータを開発する。

### (II) 携帯可能な制御弁と体圧計測センサの開発

空気圧システムの代表的な駆動弁のひとつに比例弁が挙げられる。しかし、比例弁は流量や動作原理にもよるが一般に大型で重量も重いため、携帯用には不向きである。そのため、小型・軽量の制御弁を構成する必要がある。また、(b)を回避するための補装具と皮膚との体圧を計測するための体圧センサを開発する。

### (III) (a)(b)(c)を満足する補装具の制御系設計

開発する補装具は日常で使用されることを想定しているため、アクチュエータの負荷容量をできるだけ小さくする必要がある。しかし容量が小さい場合は応答速度が速く、駆動弁の制御が難しい(ロバスタ性が要求される)だけでなく、カスタマイズ化やオンデマンド化を実現する柔軟アクチュエータ群の制御系設計はさらに困難な課題である。

#### (IV) 補装具の高機能化

本研究の目的は使用者の個別仕様化を実現するために、腹部のみの計測では不十分である場合が多いと考えられる。そこで繊維状アクチュエータがセンサとして利用できないかを検討する。アクチュエータ自身がセンサの役目を果たせば、補装具に加えられた外力や力のアシスト量が調節でき、補装具の高機能化につながると考えられる。

#### 3. 研究の方法

高齢者などの QOL の向上および、身体的・精神的負担を軽減化するために、使用者の個別仕様化を実現した補装具の制御方法の確立を図る。そのために課題目的との対応、すなわち研究の方法論を図1とフェーズ I) からIV) に示す。

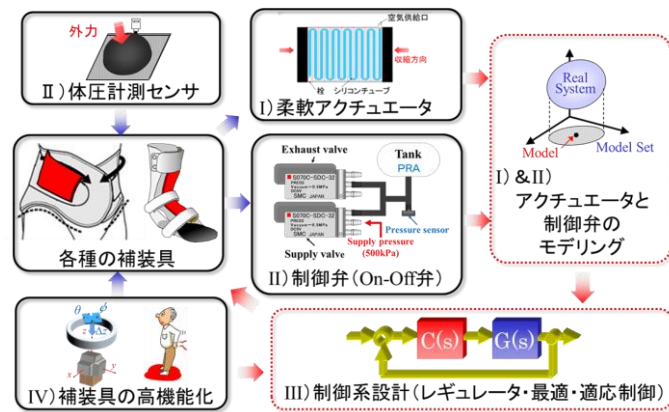


図1 システム構成と課題研究

上述のアプローチ（方法論）でハード・ソフト面での理論的基礎を確立する

#### 4. 研究成果

##### 4.1 空気圧繊維状アクチュエータの開発とモデル構築

前章で示した目的に従って、開発・試作したアクチュエータと一般的に利用できるためのモデルを提案する。

##### 4.1.1 アクチュエータの理論モデル構築

補装具に適用するために空気圧繊維状アクチュエータ（以降、PRA：Pneumatic Rubber-fiber constricted Actuatorと略す。）を開発した（右：PRAの構造図、左：試作したPRA）。図2に示すようにシリコンチューブを蛇行させながら布繊維に縫い付け、収縮方向の両端に対して伸縮しない布で固定する。なお、シリコンチューブの拘束繊維として使用するために、縫い込む繊維をゴム繊維から伸縮方向に伸びない布繊維に変更した。空気の注入口と栓はそれぞれアクチュエータを固定した布の終端に固定してある。シリコンチューブを布繊維に縫い込むことで、アクチュエータ自体が直接収縮する。

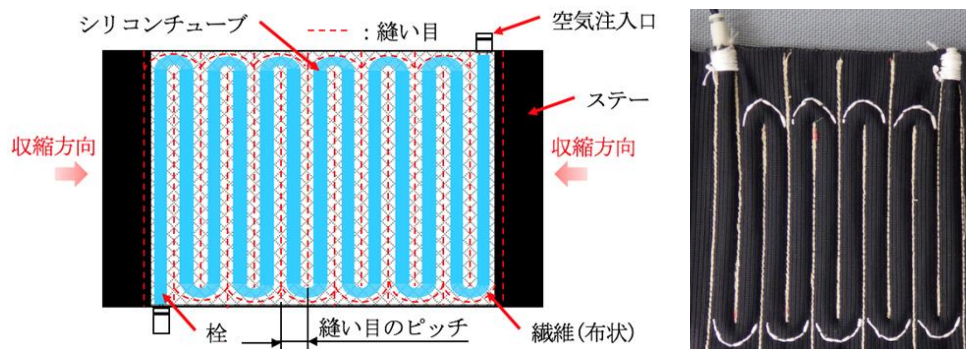


図2 開発したPRAの構造

#### 4.1.2 静特性と動特性モデルの提案と検証

提案した静特性モデルの妥当性を検証するために静特性実験を行った。そのモデル構造の妥当性についても検証を行った。静特性モデル（中央の線：赤線）はそれらの平均値をほぼ近似できるため、提案するモデルの妥当性が示唆できたと考えられる。また、提案された動特性モデル（2次系+むだ時間）は単純だが、容量（3ml から 40ml まで確認されている。）を含む実際の制御弁を表現できることが確認できた。

#### 4.1.3 試作したアクティブ補装具（腰部および下肢補装具）

腰部用アクティブ補装具の構造と5つのPRAの配置を図3に示す。補装具には腰部の不要な動作抑制と腹腔内圧上昇を可能とする構造が求められる。そこで、補装具は動作抑制のために可動部分を含むような幅広で体にフィットするベルトと、腹腔内圧を上昇させるための強い締め付けを行う細幅のベルトを組み合わせた2重締め機構を持っている。

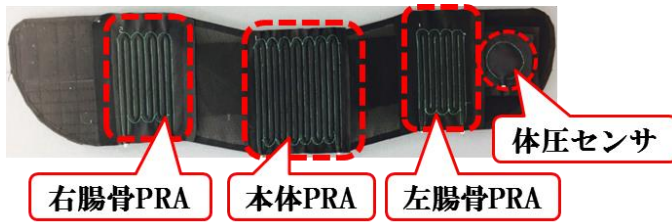


図3(a) 腰部アクティブ補装具（内側）

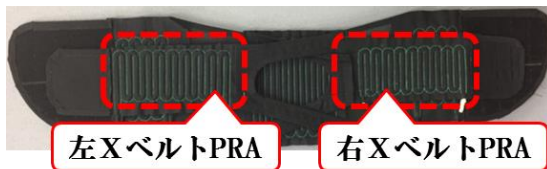


図3(b) 腰部アクティブ補装具（外側）



図4 下肢アクティブ補装具

また、歩行を支援するためのPRAを利用した図4の下肢アクティブ補装具についても開発した。本補装具は歩行時の転倒を防止するために、歩行動作センサを用いて（支援のタイミングを図る）足関節部の背屈動作を補助するように制御される。

#### 4.2 携帯可能な制御弁と体圧センサの開発

本課題で開発する補装具は日常生活な可能なほどのウェアラブル性が要求される。そこで補装具を制御するための弁やセンサおよび制御器自体も携帯可能でなくてはならない。そこで、本研究で試作した制御弁と体圧センサについて詳しく述べる。

##### 4.2.1 On/Off 弁を利用した補装具用制御弁の開発

補装具用制御弁には SMC(株)社製の On/Off 弁 S070C-SDC-32 を2個使用している。On/Off 弁を使用することで小型・軽量化が図れる。これら弁を高速に切替えることで疑似的な比例弁の動作を可能としている。詳しい制御法については4.3節で述べる。この弁の試作には本課題で購入した工作機械によって、図5の立体的な配管経路が可能となり、軽量の制御弁を試作することができた。

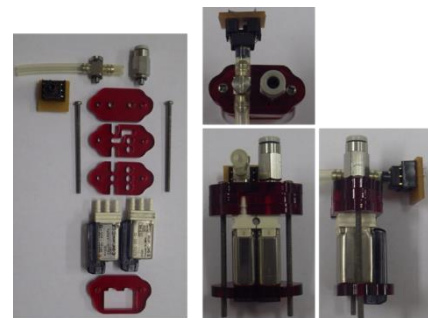


図5 補装具用制御弁

##### 4.2.2 空気圧を用いた体圧センサ

体圧センサの動作は、センサ内部の圧力を一定（褥瘡判別の圧力:32mmHg）に制御したのち

供給・排気弁の両方を Off にすることで、内力を一定圧に維持する。このとき、空気を注入された体圧センサは円の縫い目と布の性質により半球状に膨張する。ここで体圧センサにかかった外部圧力を圧力センサで読取ること、腹部の体圧を計測することができる。

#### 4.3 レギュレータ・最適・適応制御による制御系設計

2つの On-Off 弁を組み合わせることで、3つのモード（給気モード・排気モード・一定圧モード）が生成できる。これらのモードを高速にかつ適切に切替えることで所定の圧力に収束（レギュレータ問題）させる。図3より、試作した腰部アクティブ補装具には5つの PRA が使用されている。これらの空気容量は各部位によって異なるため、腹部の体圧である一つを制御する場合は明らかに冗長なアクチュエータ数である。そこで、各部位の感度と空気容量との関係から最適制御系を構成した。その結果、使用する空気量を減少させることができた。

#### 4.4 磁気式変位センサの試作と補装具の高機能化

補装具のオンデマンド化を実現するためには、腹部の体圧のみでは不十分である。そこで、アクチュエータ自体を体圧センサとして使用することを考えた。そのことで各部位に加わる詳しい外力を計測することができ、適応制御の制御量として利用することができると考えられる。

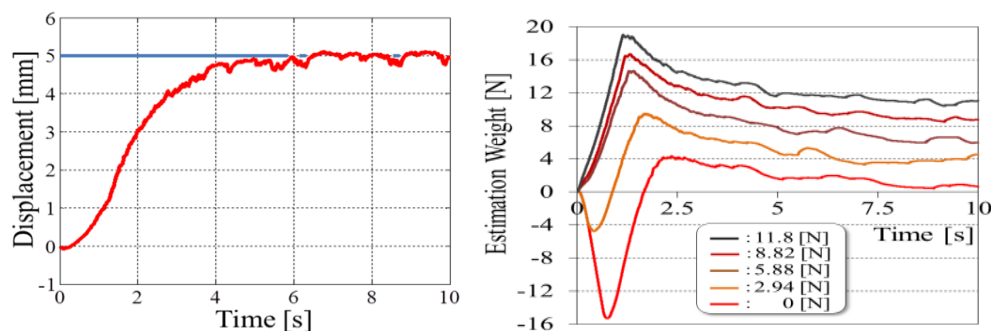
##### 4.4.1 磁気式変位センサの試作

3つの磁気式（ホール効果）センサ(A1324, 1.5×4×3mm, Allegro MicroSystems Phil Inc.)を組み合わせた位置・姿勢センサを試作した。開発する補装具は人体の複雑な形状にフィットさせるため、その変位を計測することが非常に難しい。そこで PRA の姿勢（人体の形状）を計測することで正確に変位を計測するセンサ開発を目指した。

PRA の内部に挿入されているシリコンチューブにリング状磁石を取付け、シリコンの長さから PRA 自体の変位を計測するものである。ところが、磁気式センサとリング状磁石との特性が明確でないため、そのモデルを構築した。そのモデル式の有効性を明確にするため検証実験を行った。この結果から、変位とセンサ出力の関係は指数関数で表現できることを確認した。

##### 4.4.2 磁気式変位センサと圧力センサを利用した外力推定

前小節で変位を計測できることが明らかとなったため、このセンサを利用して PRA の位置制御を実施した。また、外乱推定オブザーバを構成することで各部位に加えられた外力を推定することを考えた。その結果を図6に示す。PRA に 5.88N のおもりをぶら下げ、位置制御しつつ（図6(a)）負荷の推定を行った。位置制御が収束する5秒程度までは外力の推定値も精度が悪いが、その後は比較的精度よく外力を推定できていることがわかる。このことから、一旦、補装具を装着してしまえばその後は外力が推定できることを示唆している。このことによって、装着後は PRA がセンサとして利用できることがわかる。また、各部位の外力が計測できることでどのような動作が行われているかも推定できるものと期待している。



(a) 位置制御結果（負荷：5.88N）

(b) 外力の推定結果

図6 位置制御結果と負荷推定の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Takuya Yano, Shinsaku Fujimoto, Tetsuya Akagi, and Wataru Kobayashi	4. 巻 9-2
2. 論文標題 Development of Outer Diameter Sensor for Position Control of McKibben Artificial Actuator Using Hall-effect Sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 pp.190-196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.9.2.190-196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 So Shimooka, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Shinsaku Fujimoto, and Wataru Kobayashi	4. 巻 9-1
2. 論文標題 Development of Intelligent Rubber Artificial Muscle with Integrated Pneumatic Driving System and Built-in Inner Diameter Sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 pp.136-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.9.1.136-142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hideyuki Obayashi, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Wataru Kobayashi, Yasuko Matsui, So Shimooka, Takashi Shinohara, and Mohd Aliff	4. 巻 9-3
2. 論文標題 Development of Portable Rehabilitation Device Driven by Low-Cost Servo Valve Using Tap Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 pp. 353-359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.9.3.353-359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 SHIMOOKA So, DOHTA Shujiro, AKAGI Tetsuya, KOBAYASHI Wataru and YONEDA Masataka	4. 巻 11
2. 論文標題 Development of Portable Rehabilitation Device Using Flexible-Extension-Type Soft Actuator with Built-In Small-Sized Quasi-Servo Valve and Displacement Sensor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JFPS International Journal of Fluid Power System	6. 最初と最後の頁 pp.18-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5739/jfpsij.11.18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kayoko Uno, Shinsaku Fujimoto, Tetsuya Akagi, and Wataru Kobayashi	4. 巻 6
2. 論文標題 Development of Active Orthosis for Lumbago Relief - Modeling of Pneumatic Textile Actuator for Orthosis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 pp.413-416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.6.5.413-416	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wataru Kobayashi, Naoki Kato, Shujiro Dohta, Tetsuya Akagi and Kazuhisa Ito	4. 巻 6
2. 論文標題 Position Control of Flexible Pneumatic Cylinder Using Tiny Embedded Controller with Disturbance Observer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 pp. 318-321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.6.4.318-321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 相良 知秀, 藤本 真作, 赤木 徹也, 小林 亘
2. 発表標題 腰痛緩和のためのアクティブ装具の開発
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林卓巳, 赤木徹也, 堂田周治郎, 小林亘, 篠原隆, 大林秀幸
2. 発表標題 ゲート機構を用いた小型サーボ弁の試作
3. 学会等名 2019 年秋季フルードパワーシステム講演会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Akagi
2. 発表標題 Development of Home Rehabilitation Devices Using Various Pneumatic Soft Actuators
3. 学会等名 2019 IEEE the 5th International Conference on Mechatronics System and Robots (ICMSR 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇野 加余子, 藤本 真作, 赤木 徹也, 小林 亘
2. 発表標題 腰痛緩和のためのアクティブ装具の開発
3. 学会等名 日本機械学会中四国支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢野 琢也, 藤本 真作, 赤木 徹也, 小林 亘
2. 発表標題 外径センサ付きMcKibben型人工筋を用いたパワーアシストスーツの開発
3. 学会等名 日本機械学会中四国支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福川展弘, 赤木徹也, 堂田周治郎, 藤本真作, 小林 亘, 篠原 隆, 井上椋太
2. 発表標題 柔軟空気圧リニアステッピングクアチュエータの改良とロボットアームへ応用
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 下岡 綜, 赤木徹也, 堂田周治郎, 藤本真作, 小林 亘, 篠原 隆
2. 発表標題 弁・センサ搭載型ポータブルリハビリテーション機器の改良
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大林秀幸, 赤木徹也, 堂田周治郎, 藤本真作, 小林 亘, 篠原 隆, 松井保子
2. 発表標題 屈曲チューブを用いた4ポート型低コストサーボ弁の試作と水道圧駆動ポータブルリハビリテーション機器への応用
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上椋太, 赤木徹也, 堂田周治郎, 藤本真作, 小林 亘, 篠原 隆, 福川展弘
2. 発表標題 空気圧駆動リニアステッピングアクチュエータを用いた簡易リハビリテーション機器の試作
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Yano, Shinsaku Fujimoto, Tetsuya Akagi, and Wataru Kobayashi
2. 発表標題 Development of outer diameter sensor for position control of McKibben artificial actuator using Hall-effect sensor
3. 学会等名 2017 the International Conference on Automation and Mechatronics Engineering (ICAME 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 So Shimooka, Tetsuya Akagi, Shujiro Dohta, Shinsaku Fujimoto, and Wataru Kobayashi
2. 発表標題 Development of Intelligent Rubber Artificial Muscle with Integrated Pneumatic Driving System and Built-in Inner Diameter Sensor
3. 学会等名 2017 the International Conference on Automation and Mechatronics Engineering (ICAME 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>空気圧柔軟アクチュエータによるアクティブ補装具の開発 : OUSフォーラム2019  <a href="http://renkei.office.ous.ac.jp/wp-content/uploads/2011/09/poster2019_2.pdf">http://renkei.office.ous.ac.jp/wp-content/uploads/2011/09/poster2019_2.pdf</a>          空気圧柔軟アクチュエータによるアクティブ補装具の開発 OUSフォーラム2017  <a href="http://renkei.office.ous.ac.jp/wp-content/uploads/2017/12/welfareapparatus.pdf">http://renkei.office.ous.ac.jp/wp-content/uploads/2017/12/welfareapparatus.pdf</a></p>
---

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
研究分担者	小林 亘  (KOBAYASHI Wataru)  (00780389)	岡山理科大学・工学部・講師    (35302)	
研究分担者	赤木 徹也  (AKAGI Tetsuya)  (50311072)	岡山理科大学・工学部・教授    (35302)	

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
---------	---------