

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K10694

研究課題名(和文) 細径マッキベン型空気圧人工筋肉を用いた前腕欠損児のための動力義手の開発

研究課題名(英文) Pediatric externally powered prosthetic hand using miniature McKibben-type pneumatic actuators

研究代表者

谷口 浩成 (Taniguchi, Hironari)

大阪工業大学・ロボティクス&amp;デザイン工学部・准教授

研究者番号：00508955

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)：本研究では、小児用の前腕動力義手の試作と機械的な基本性能の評価を行った。アクチュエータに細径マッキベン型空気圧人工筋肉を用い、高い安全性と日常生活での実用性を備え、軽くて見た目も装飾義手と遜色がなく、人間らしい動きができる小児用前腕動力義手を開発した。また、開発した前腕動力義手を欠損児に使ってもらい、日常生活を想定したモデルケースにおいて、動力義手の操作性や耐久性などを総合的に評価した。これらの内容により、提案する義手の有用性を実証し、実用化への基盤を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、先天的あるいは後天的に上肢に欠損を抱える小児の日常生活の補助を目的とした、空気圧人工筋を用いた小児用動力義手を開発した。本研究成果は、ソフトロボティクスに関連する要素技術開発および応用であり、これらの分野における学術的意義は非常に高いと考えられる。また、開発した義手は、従来の筋電義手と比べて非常に動作速度が早く、使いやすいことが明らかとなった。被験者が使用している外国製の筋電義手では、把持に失敗し、把持をやり直すなど、繰り返し指の開閉動作をする際にストレスを感じると被験者は述べており、本義手は新たな義手としての可能性を示した。このことから、社会的意義も高いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a forearm power prosthesis for children and have evaluated the mechanical basic performance of the power prosthesis. A small McKibben type pneumatic artificial muscle was used as an actuator, and the forearm power prosthesis has high safety and practicability in daily life. The operability and durability of the forearm power prosthesis were synthetically evaluated in daily life by the heavy user of conventional child power prosthesis. In the test, the user succeeded in grasping several objects such as a stuffed animal, stacking blocks, and pulling out tissue paper. In addition, the user stated that the power prosthesis was easy to operate in terms of quick movements. Therefore, we verified the usefulness of the proposed artificial arm and the basis technologies for the practical application were constructed.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：動力義手 ソフトアクチュエータ ソフトロボティクス 空気圧人工筋肉 小児

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 本研究の学術的背景

前腕が欠損した小児(以下、欠損児)に対して、早い段階から動力義手(筋電義手)を使用することは、身体や心の成長にとって効果的である。しかし、欠損児が義手を導入する際、外観を補うことを目的とした装飾用義手を導入することが多く、小児用の動力義手はほとんど普及していない。この要因の1つに、動力義手が高額であることが挙げられる。小児用のものはすべてが輸入品となっており価格が150万円以上もするうえ、成長に応じて作り変える必要がある。購入の際には公的補助が受けられるが、使いこなせることが条件であり、使いこなすために必要な訓練用には公的補助が適用されないため、欠損児やその家族にとって経済的負担は大きい。

また、従来の動力義手は、アクチュエータにモータを用いることが一般的であるが、義手の機能を高めるには、モータの数を増やすことになり、これに比例して重量が増加する傾向にある。さらに、歯車や軸などの動力伝達機構も必要となり、装置の複雑化を招くだけでなく、故障の原因になりやすい。動力義手を導入しても、壊れれば修理のために時間がかかり、動力義手を使わない期間ができる。これにより欠損児は、壊れない装飾義手に移行してしまうことが多い。

これらのことから、低コストで軽く、壊れにくい欠損児のための動力義手が求められており、その実現のためにはモータに代わるアクチュエータを採用し、これまでの設計開発手法とは異なるアプローチで研究開発することが必要であると考えられた。

#### (2) 関連する国内外の研究動向

近年、利用者の皮膚表面で計測できる筋電位を駆動制御に用いた筋電義手が盛んに研究されている。国内では、基本的な把持動作ができる5指型筋電義手(横井, 2015)や、3次元プリンタを活用して製作した対抗3指義手(吉川, 2016)などがある。国外では、ドイツ・OttoBock社のミケランジェロハンドやイギリス・Touch Bionics社のiLIMBなど、モータ駆動方式の動力義手が開発されている。これらの動力義手は、青年や大人を対象としており、小児用の動力義手の開発は極めて少ない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高い安全性と日常生活での実用性を備え、軽くて見た目も装飾義手と遜色がなく、人間らしい動きができる小児用前腕動力義手を開発し、前腕欠損児への適用を通じて本義手の実用性を検証することであった。本研究期間の前半(平成30年度から31年度前期)は、動力義手の試作と機械的な基本性能の評価を行った。アクチュエータに細径マッキベン型空気圧人工筋肉を用いることで、小型かつ軽量で高い安全性と機能性の実現を目指した。本研究期間の後半(平成31年後期から32年度)では、欠損児に試作した義手を使ってもらい、日常生活を想定したモデルケースにおいて、動力義手の操作性や耐久性などを総合的に評価し、その結果を踏まえて義手の改良を行った。これらの内容により、提案する義手の有用性を実証し、実用化への基盤を構築した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 細径マッキベン型空気圧人工筋肉を用いた小児用動力義手用アクチュエータ

マッキベン型人工筋は、内部のゴムチューブの周囲を編み込んだ繊維層のスリーブで覆った構造のアクチュエータである。送気チューブから空気圧を印加することで、径方向に膨張し軸方向に収縮動作を行う。マッキベン型人工筋は、コンプライアンス性に優れ、柔軟に曲げることが出来ることから形状適応性も高い。さらに、アクチュエータ自体が軽量であり、安価に製作することが可能である。

細径マッキベン型空気圧人工筋とは、その直径が非常に小さいマッキベン型人工筋である。細径空気圧人工筋は径が小さいことにより、空圧の印加後においても柔軟に曲げることが可能である。しかし、マッキベン型人工筋の収縮力は、断面積に比例し細径化することにより低下する。そこで、細径マッキベン型空気圧人工筋を、集積化することで収縮力を増加させた。図1に製作した小児用動力義手用のアクチュエータを示す。



図1 細径マッキベン型空気圧人工筋肉を用いた小児用動力義手用アクチュエータ

外径2mmの人工筋を3本束ねた部分を90mm(図1の左側)、外径4.8mmの人工筋を90mmとし、接続部の寸法を20mmとすることでアクチュエータの全長が200mmとなるように製作した。次に、アクチュエータの収縮量について説明する。アクチュエータには、300kPaの圧力を印加した。収縮量測定実験を24回繰り返した結果、収縮量の平均値は30.3mm、標準偏差は0.25を算出した。人工筋1本あたりの収縮率が約20%であることを考えると、アクチュエータの長

さが 180 mm の場合は 36 mm 程度収縮することが想定されたが、想定した収縮量の 84%であった。これは、接続部と根元部分は、人工筋を加工する際にスリーブを接着剤で固定するため、アクチュエータの変形が制限されることが原因として考えられた。次に、アクチュエータの発生力について説明する。収縮力の測定は 3 回実施し、その平均値は 18.7N であった。これは、人工筋がその径の大きさに比例して発生力が高くなることが関係しており、直径が 4.8 mm の人工筋と組み合わせたことによって高い収縮力が実現できたと考えられる。

## (2) 小児用前腕動力義手の開発

### 義手モデル Ver.1

義手の試作 1 号機である「義手モデル Ver.1」は、シリコンゴム製の装飾用グローブの着用を前提とした。前腕部内には、空気分岐を行うためのマニフォールドのみを内蔵し、人の腕に近似した形状で製作した。4 指と拇指の形状と駆動方法の見直しにより、握力把持だけでなく精密把持も可能となった。図 2 に義手モデル Ver.1 の全体図を示す。

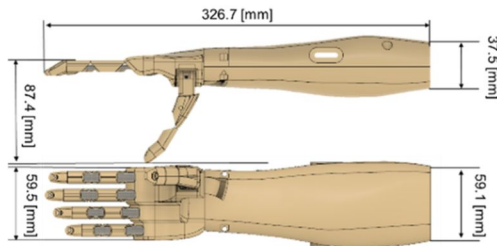


図 2 義手モデル Ver.1 の外観

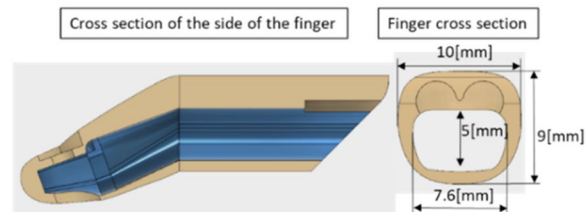


図 3 指の内部構造および断面図

4 指の関節は、指の外骨格部のパーツ同士を、シリコンゴムロッドにより接続した。指の関節部にシリコンゴムロッドを用いることで、外的要因による屈曲、伸展方向以外からの力を受けた際に、関節部が変形して力を逃がすロバスタ性を持たせた関節構造となっている。指先形状に厚みを持たせることで、アクチュエータを指先で固定できるように設計した。4 指はアクチュエータの収縮により屈曲し、関節部に用いたシリコンゴムロッドの張力により伸展動作を行う。図 3 に指の内部構造および断面図を示す。

把持可能重量の測定では、把持動作を均一化させるために義手を固定し、その状態から重量を変化させたペットボトルを把持させることによって測定した。実験時にコンプレッサから印加する圧力は 360 kPa とし、直径 86 mm の 500 ml 飲料用ペットボトルを使用した。ペットボトルの把持時間は 10 秒間落とさずに把持可能であれば達成できたと判断した。そして 10 秒間の把持を最大把持時間とし、10 回の平均把持時間を算出した。結果、最大重量 500 g での安定した把持が可能であることが示された。拇指 MP 関節部のねじれに対処したことで、500 g 時ににおいて把持動作に失敗することがなかった。

### 義手モデル Ver.2

義手モデル Ver.1 では、重い物体 (510 g 以上のペットボトル) を把持した際に安定した把持を行うことが不可能であったため、より強い把持能力を持つ義手モデル Ver.2 を開発した。また、義手モデル Ver.2 では、義手全体および指の構造やアクチュエータの配置方法を見直した。義手モデル Ver.2 の製作にあたり、グローブの再製作を依頼し、その際に 9 歳児の手の寸法を参考にした。義手の設計には、グローブを製作する際に使用する型を 3D スキャンしたものを使用して各関節部を構成した。これにより、グローブとの寸法的一致や、内部にアクチュエータユニットを配置するための大きなスペースを確保することが可能となった。

図 4 に 4 指と拇指の関節を示す。義手モデル Ver.2 の指関節構造は、義手モデル Ver.1 に採用したシリコンゴムロッドによる接続方法と同様の構造を取り入れた。これにより、関節部に柔軟性を持たせた。第 2 指から第 5 指までは同様の指関節構造となるように設計を行い、指の寸法に応じて切れ込みの角度を調整した。

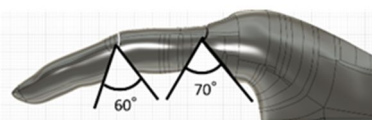


図 4 4 指の構造

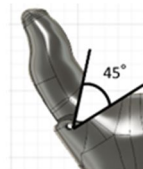


図 5 拇指の構造

図 5 に拇指の関節を示す。義手モデル Ver.2 では、駆動させる拇指関節は MP 関節部のみとした。拇指 MP 関節部は、直径が 2 mm のアルミシャフトにより接続し、拇指が伸展時に外側に反ることが出来ないように駆動を制限させた。MP 関節部は、アクチュエータにより 45 度の屈曲を行い、伸展動作は外骨格部の上から装着するシリコンゴムでできたグローブの張力によって行う。各指の厚みは 1mm とし、手掌部は強度を持たせるために厚みを 2 mm で設計した。手掌部内

は、人工筋ユニットを5指に分岐して配置できるように3枚の厚さ2mmの板によって区切るように設計した。義手の手首部分は、約30度伸展させた状態で設計した。ハンド部分が前腕部に対して平行な状態であると、義手を装着して手を自然な状態で下した際、拇指が開いた状態であるために衣服と干渉してしまう恐れがある。前腕部内には、義手モデルVer.1と同様にマニフォールドの固定部を設け、アクチュエータのテンションを調節できるように長穴を設けた。図6に前腕部を含めた義手モデルVer.2の外観を示す。

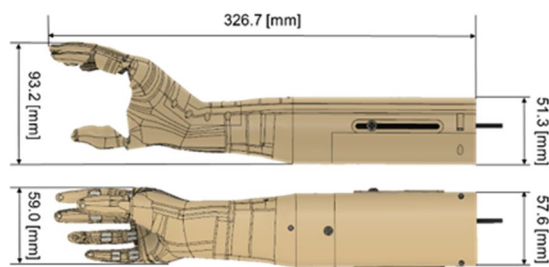


図6 義手モデルVer.2の外観

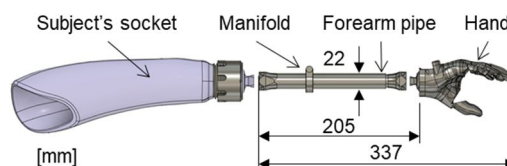


図7 ユーザ用義手モデル

#### ユーザ用義手の試作

ユーザ評価試験における被験者は、シリコンライナー、専用ソケット、ジョイントパーツを使用している。手を懸垂する方法は、切断レベルによって異なる。前腕義手の場合、肘周辺の骨突起上部にベルトやソケットを引っ掛け、懸垂するのが一般的だが、断端の長さや断端部の皮膚の状態、義手の種類によって義手用ライナーを使用する事がある。ライナーを使用すると肘関節の動きを制限されない、義手装着時の快適性が良いなどのメリットがある。今回のユーザ評価試験にあたり、既存の前腕部分のパーツのままでは被験者が使用できないため、ジョイントパーツに合わせた義手前腕部分を設計した。図7に全体の構成図と各寸法を示す。この義手は主に義手本体、前腕パイプ、マニフォールドから構成されており、すべて3Dプリンタにて製作した。専用ソケットの先端はOttobock社の義足用ジョイントを流用しており、その形状に接続できるように前腕パイプを設計した。またこのジョイントは、すべての方向に対して5度まで角度を調節することが可能で、同様の構造を手首部分にも用いた。なお、甲の部分に設けられた突起部分は、装着するシリコングローブとアクチュエータユニットの干渉を軽減するために設けた。前腕パイプは、2つのパーツに分けることで、義手全長を337から387mmの範囲で長さ調節ができるように設計した。これにより、ユーザ評価試験において被験者に合わせて長さを調節することができる。

## 4. 研究成果

### (1) 義手の評価試験

#### 義手モデルVer.1およびVer.2の評価試験結果

義手モデルVer.1とVer.2を筋電信号によって操作する把持実験を、健常な20代の男性5名と、12歳と9歳の女児各1名ずつに対して実施した。なお、本実験は大阪工業大学ライフサイエンス実験倫理委員会の承認を得て(承認番号:2019-17)実施された。本実験では、健常な上肢にハーネスを介して義手を取り付け、実験を行った。ユーザ評価実験では、デスクトップコンプレッサを用いて空気の供給を行い、印加圧は300kPaとした。評価機器としてSHAPを使用し、物体移動に要する時間の測定を実施した。6種類の形状の物体それぞれに、金属製のものと木製のものがあり、形状に差異は無いが重量が異なる12種類の物体を移動させる。義手が対象物体に触れた瞬間から、義手の指が対象物体から離れた瞬間までの時間を所要時間とし、所要時間が短いほど、良好な結果であると判断した。

20代男性においては60項目(12種類の物体×5人分)中、義手モデルVer.2の方が短い時間で移動できたか、もしくは義手モデルVer.2でしか移動できなかった項目は45項目であった。したがって75%の割合で義手モデルVer.2の方が優位であるという結果が得られた。9項目については義手モデルVer.2の方が義手モデルVer.1よりも物体の移動に時間を要し、6項目については両モデルの義手で把持が行えなかった。義手モデルVer.2の方が移動に時間を要した項目について、筋電信号が検出しやすい実験参加者と検出し辛い実験参加者がいたため、義手を想定通りに操作できなかったことが原因であると考えられた。

同様の実験を小児に対して実施した。SHAPテストでは、12種の物体を1回移動させた。その結果、12項目中6項目で義手モデルVer.2の方が優位であることが示され、1項目では義手モデルVer.1と同等の結果であった。義手モデルVer.2で移動に時間を要した原因として筋電操作による動作の不安定さが影響したと考えられた。小児では成人男性よりも筋電信号が検出され辛く、手首に力を入れて操作しないと義手が動作しない場面が確認された。次に、ペットボトルの把持を実施した。義手モデルVer.1では両実験参加者ともペットボトルを持ち上げることが出来なかった。ペットボトルの重量が重く、指が滑って把持できないことが把持失敗の要因であった。しかしながら、義手モデルVer.2では安定した把持が可能であった。把持力を増強させ

たことが、把持の成功に影響したと考えられる。図8に実験時の様子を示す。また、実験後のアンケートより、義手モデル Ver.1 と Ver.2 の共通した評価として、初めて義手に触れる実験参加者であっても簡単に動作させられる点が回答された。空圧の加圧と減圧のみで義手の指を開閉させるといふ、非常にシンプルな動作プロセスであるため、直観的に操作しやすいのではないかと考えられる。また、義手モデル Ver.2 では、Ver.1 よりも多くの物品を掴めたと評価された。

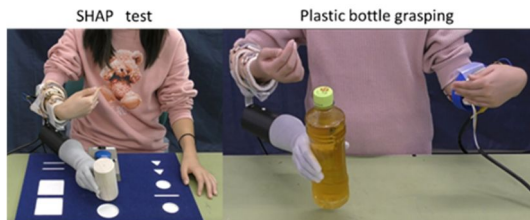


図8 義手モデル Ver.2 の把持実験

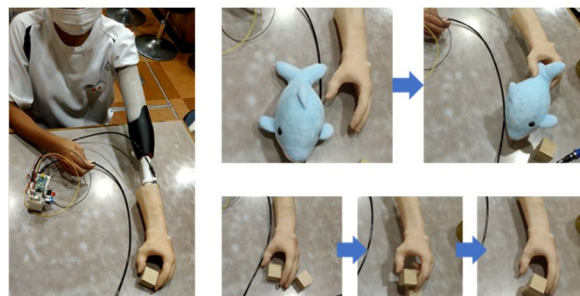


図9 ユーザ用義手による物体評価把持実験

### ユーザ用義手の評価試験結果

空圧源は、サンプロジェクト製のレギュレータと Co2 ポンプを使用し、印加圧力は 300kPa とした。空圧の加圧、減圧は電磁弁 (KOGANEI:025E1) を使用した。弁の開閉の制御は、被験者の健常手側にて手動で操作した。実施内容は、以下の日常生活を想定した物体の把持を実施した。なお本実験は、大阪工業大学ライフサイエンス委員会の承認(承認番号 2020-6)を得て実施した。

- ・イルカのぬいぐるみ(幅:80mm,高さ:90mm,重さ:39g)を把持させて移動させる。
- ・積み木(1辺:30mm,重さ:8g)を移動させ、積み重ねる。
- ・ティッシュペーパーをティッシュボックスから抜き取る。
- ・約 500g のペットボトルを持ち上げる。

評価実験の様子を図9に示す。まず、イルカのぬいぐるみの把持については、尾びれ部分をつまむような3点把持を確認し、移動させることに成功した。次に、積み木を移動させて積み重ねる動作は複数回試行し、成功させることができた。ティッシュペーパーをティッシュボックスから抜き取る動作では、積み木と同様、3点把持で抜き取る動作を実現できた。しかし、約 500g のペットボトルを把持する動作は成功させることが出来なかった。これは、シリコングローブとアクチュエータユニットが干渉し、把持力の低下を引き起こしたと考えられた。義手の甲の部分に干渉を防ぐ突起物を設けていたが、完全に干渉を防ぐことはできていないことがわかった。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究では、先天的あるいは後天的に上肢に欠損を抱える小児の日常生活の補助を目的とした、空気圧人工筋を用いた小児用動力義手を開発した。小児用義手として高い収縮力を確保するために空気圧人工筋を用いた小児用義手用のアクチュエータを開発した。開発した義手は、装飾用グローブを着用し、外観も人間と遜色がなく、自然な動きを実現できる。また、義手ユーザによる評価試験の結果、本義手の動作スピードに関しては、筋電義手と比べて非常に早く使いやすいことが明らかとなった。被験者が使用している外国製の筋電義手では、把持に失敗し、把持をやり直すなど、繰り返し指の開閉動作をする際にストレスを感じると被験者は述べており、本義手はこのストレスを軽減させることができると考えられた。

これらの成果より、これまでにない小児用の動力義手を提案することができ、その有効性を明らかにすることと共に、従来の義手に代わる新たな義手としての基盤を構築することができ、当初の予定を上回る成果が得られたと考えている。

### (3) 今後の展望

義手本体の開発について、さらなる把持力を向上させるための改良が必要であると考えている。これは、関節の構造、アクチュエータを接続するマニフォールドの固定方法を再検討することで、大幅に義手の設計を変更せずとも、把持力を向上させることが出来ると考えられる。義手の手首に関しては、回転できる機構があれば、ものを把持する際の代償運動が減少し、より使用者の負担を軽減できるという義手ユーザからの意見を確認している。この点も改良していくべきだと考えている。

次に、義手をストレスなく扱うための制御インターフェースの開発が必要である。従来の動力義手は、義手を使用している感覚を認知できるものはなく、視覚的に物体と義手をとらえながら操作するしかない。そこで感覚フィードバックシステムと、柔軟距離センサを使用しユーザの筋肉隆起による義手制御インターフェースを開発し、実用性の高い義手システムへと発展させていきたいと考えている。

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 1件）

1. 著者名 Taniguchi Hironari, Takemoto Nobuo, Yakami Ren, Wakimoto Shuichi, Oshikawa Takero, Morinaga Kosuke, Kanda Takefumi	4. 巻 32
2. 論文標題 Realistic and Highly Functional Pediatric Externally Powered Prosthetic Hand Using Pneumatic Soft Actuators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1034 ~ 1043
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p1034	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Nobuo Takemoto, Hironari Taniguchi, Shuichi Wakimoto, Kouyou Asano, Kousuke Morinaga, Takehumi Kanda
2. 発表標題 Development of an Externally Powered Prosthetic Hand for Children Using Miniature McKibben Soft Actuators
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuo Takemoto, Hironari Taniguchi
2. 発表標題 Proposal of a Pediatric Externally Powered Prosthetic Hand
3. 学会等名 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 脇元修一
2. 発表標題 製紐技術を利用した空気圧人工筋の用途開拓
3. 学会等名 第24回岡山リサーチパーク研究・展示発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野皓洋、竹本薫生、谷口浩成、脇元修一、神田岳文
2. 発表標題 細径McKibben型人工筋を使用した小児用義手の設計
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹本 薫生，浅野 皓洋，谷口 浩成，脇元 修一，森永 浩介，神田 岳文
2. 発表標題 細径マッキベン型アクチュエータを用いた小児用前腕動力義手の 試作と性能評価
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koyo Asano, Nobuo Takemoto, Shuichi Wakimoto, Hironari Taniguchi, Kosuke Morinaga, Takafumi Kanda
2. 発表標題 Fundamental design of a myoelectric prosthesis hand for children using pneumatic artificial muscles
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 八上 廉，谷口 浩成，脇元 修一，押川 丈朗，森永 浩介
2. 発表標題 装飾性と機能性を兼ね備えた小児用前腕動力義手
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

空気圧ソフトアクチュエータを用いた小児用前腕動力義手  
<https://www.flexibleroboticslab.com/phand>

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	脇元 修一  (Wakimoto Shuichi)  (40452560)	岡山大学・自然科学研究科・准教授   (15301)	
研究 分 担 者	森永 浩介  (Morinaga Kosuke)  (40734760)	広島国際大学・総合リハビリテーション学部・助教   (35413)	

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