

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871041

研究課題名(和文)形状記憶合金人工筋肉アクチュエータを用いた小児用前腕動力義手の研究開発

研究課題名(英文)Development of an externally powered prosthetic hand for children using shape memory alloy actuators

研究代表者

谷口 浩成(Taniguchi, Hironari)

大阪工業大学・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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、形状記憶合金アクチュエータを用いることで、軽量で騒音がなく複数の把持動作が可能な小児用前腕動力義手の開発を目的に、以下の2項目の研究を行った。(1)小型で義手内部に搭載できる冷却機構を搭載した形状記憶合金アクチュエータを提案し、その特性を明らかにした。(2)6歳児を対象とした小児用動力義手の試作を通じて、設計および製作手法を検討した。特に指を柔軟な素材のみで構築することで安全性を高めた義手を提案した。また、義手の把持力、応答性、把持動作やジェスチャー動作、手首の可動能力などを実験により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Powered prosthetic hands for children are expected to have effects such as assistance of daily living and growth of the body. In this study, we focused on a shape memory alloy actuator and the structure of the fingers. We then prototyped a powered prosthetic hand for children with functionality and safety by fabricating fingers with flexible materials. The fingers were covered with flexible resin, and silicone rubber (hardness 50) was used for the finger joint. Especially by giving flexibility to the finger joints, we produce the structure less susceptible to harm to others and things when the prosthesis collided. In the experiment, we evaluated the performance of the prosthetic hand. As a result, we confirmed that the hand grasps some objects.

研究分野：ソフトロボティクス、ソフトアクチュエータ

キーワード：動力義手 小児 アクチュエータ ソフトロボティクス

### 1. 研究開始当初の背景

小児用動力義手の研究開発は、欧米先進諸国で盛んである。特に Bloorview MacMillan Children's Centre (カナダ) では、世界で最も多く的小児用動力義手の症例を持っている。国内においても、動力義手に関する多くの研究が実施されているが、それらの大部分は青年および成人を対象としており、小児用動力義手に関する研究は、非常に少ない。

小児用動力義手は、小型かつ軽量であることが要求され、動力義手としての動作機能も確保しなければならない。従って、成人用の動力義手で用いられているモーターなどの汎用的なアクチュエータを用いる方法では限界があると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、形状記憶合金 (以下, SMA と表記する.) 人工筋肉アクチュエータを用いることで、軽量かつ静粛性と機能性を備えた小児用前腕動力義手を試作し、本義手の有用性を立証するとともに、小児のための義手要素開発技術と駆動メカニズムを確立することであった。本動力義手は、肘から先の部分 (前腕部) からの切断に対して適用できる前腕動力義手である。駆動源として用いる SMA 人工筋肉アクチュエータは、高発生力・軽量・小型・曲げた状態でも使用できる (高柔軟性)、駆動時に騒音を発生しない (静粛性) という特徴を持つ。従って、手指に本アクチュエータを内蔵することにより、自由度が高く無音で駆動する手指の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、3つの研究項目を実施した。以下に、それぞれの項目について説明する。

#### (1) SMA 人工筋肉アクチュエータの設計と試作

小児用前腕動力義手に用いるアクチュエータとして、フッ素系不活性液体による強制冷却機構を備えた SMA 人工筋肉アクチュエータを考案した。図1に本アクチュエータの構造を示す。

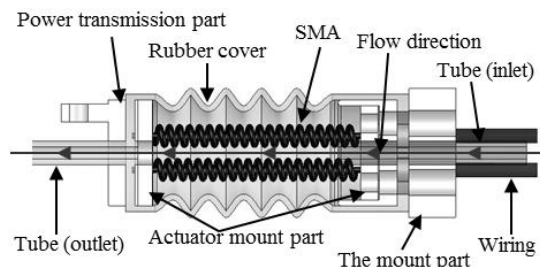


図1 アクチュエータの構造

本アクチュエータはコイル状の SMA ワイヤ、ゴムカバー、チューブ、配線等で構成されている。コイル状の SMA ワイヤは、小型軽量化のために、1本の SMA ワイヤでコイル状の SMA

を4連続成形したものである。このため両端に配線を接続するだけで、直列接続が可能である。本アクチュエータの全長は 42mm で駆動後には 32mm まで縮む。また取付け部は、1辺が 11mm の正方形の部品である。ゴムカバーは円筒形で取付け部周辺が 10mm で、蛇腹部分は最大外径が 11mm、最少外径が 9mm、蛇腹のピッチが 3mm となっている。ゴムの厚さは 0.5mm である。

#### (2) 小児用前腕動力義手の設計と試作

小児用前腕動力義手を設計するにあたり、小児が日常で行う手を使った動作を調査し、動力義手の手指・手掌、手首および前腕に必要な機能の検討を行った。手指・手掌部分で行うのは、主に物体の把持である。把持動作は、大きく分けて2種類に分類され、5指と手掌全体で物体を包み込む握り動作と、親指・人差し指・中指の3指の先端で物体を把持する摘み動作がある。これらの動作は、小児が義手を使用する上で欠かすことが出来ないため、開発する小児用動力義手で行うことのできる把持方法は握り動作と摘み動作の2つの動作とした。

親指・人差し指・中指の3指は、主に握りや摘みなど、直接事物の操作を行う役割を果たし、薬指と小指の2指は主に手や物を安定させたり、固定したりする役割を果たしている。そこで本動力義手では、把持に重要な親指・人差し指・中指のうち、人差し指と中指をアクチュエータによって駆動させることとした。また、親指は、他の指と構造が異なり、機構や制御の複雑化が考えられたため、アクチュエータを使用せず装着者自身が目的に応じて受動的に動かす仕組みとした。さらに、薬指・小指も把持した物体を安定させるのに必要なため、外力によって可動する仕組みとした。なお、人差し指と中指は単一の駆動となるので、2つの把持動作は制御の切り替えによって行われるのではなく、把持する物体が大きいものでは握みのみ、小さいものでは握みまたは摘みの動きと、物体の大きさに依存して行われる。把持できる物体の最大直径は約 50mm とした。

手首が行う動きは、物体を把持する際に内側に曲げる (掌屈)、手をついて立ち上がる時外側に曲げる (背屈)、曲げた状態を維持し続けるなどがある。従来の小児用動力義手は、指の開閉機能のみで、手首が固定されているものが多い。従って、手首の動きを実現することで機能の向上が期待できる。しかし、これらの動きをアクチュエータによって実現させる場合、義手の大型化・過重化や制御の複雑化が考えられた。従って、手首も親指と同様に装着者自身が受動的に動かす仕組みとした。なお、橈屈と呼ばれる親指方向に曲げる動き、尺屈と呼ばれる小指側に曲げる動きもあるが、元々の変位量が少ないため、今回は取り入れないこととした。

前腕が行う動きは、把持した物体を傾ける、

操作を加えるときに内外に捻る回内・回外動作がある。しかし、本動力義手では肘より先の部位を対象としているので、アクチュエータの制御回路や電源の収納スペースとして利用することとし、代わりに手首で回内・回外動作を行うことにした。図2に、小児用前腕動力義手の構造を示す。

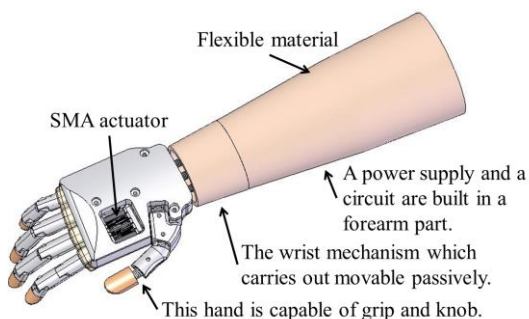


図2 小児用前腕動力義手の試作モデル

次に、義手の手指および掌について説明する。義手の手指・手掌部サイズは、言語を理解できる知的能力があるとされている6歳児程度とし、6歳児(5.5~6.49歳)の男女児平均値を参考に決定した。また、日常生活において把持を行うには5Nは必要であると考え、把持力は5N以上、応答速度は2秒以内を目標とした。図3に義手の大きさを示す。

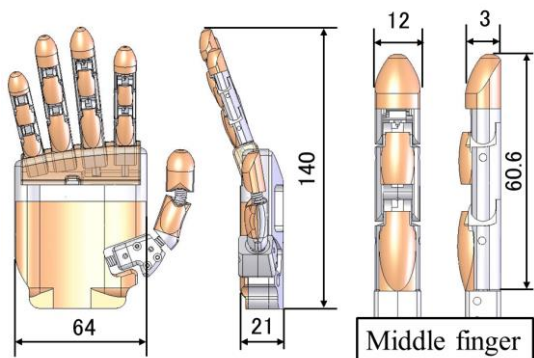


図3 義手の構造とサイズ

人間の親指以外の4指の関節は、先端からDIP関節、PIP関節、MP関節で構成されている。調査では、このうちのDIP関節、PIP関節が大きく動いていることが確認されたため、アクチュエータによって人差し指と中指のDIP関節とPIP関節を可動させることとした。図4に人差し指の外観を示す。指の外観は、9個の部品で構成されており、①から④の組み合わせでDIP関節、④から⑥の組み合わせでPIP関節が構成される。また、⑦から⑨は物体が直接触れる部分であり、人間の皮膚に近づくためゴムなどの柔軟性のある材料を用いた。DIP関節とPIP関節を可動させるアクチュエータは、縮む動作を行うことを想定し、手指の屈曲動作を超弾性SMA板ばねで行い、伸展動作にアクチュエータを用いることとした。超弾性SMA板ばねは、曲げた状態で形状記憶を行った板状のSMAで、常温

下では外力を加えて真っ直ぐに伸ばしても外力を除くと元の曲がった状態に戻る働きをする。この超弾性SMA板ばねを各関節の内部に取り付けた。また伸展動作は、アクチュエータと指先をワイヤで接続し、ワイヤがアクチュエータの駆動によって引っ張られることで行う。指の内部には、ワイヤが通る溝を設け、固定にはメガネ端子を利用した。

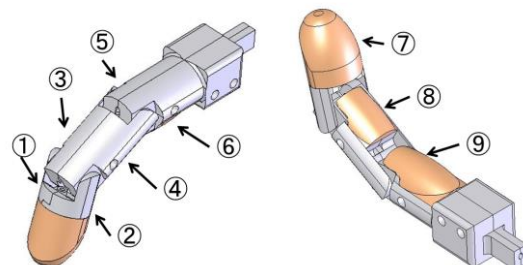


図4 人差し指の外観

(3) 柔軟な指を持つ小児用前腕動力義手の試作

各指関節に柔軟性を持たせる事で、指の屈曲・伸展方向以外の方向に対する過度な力を逃がすロバスト性のある指構造を検討した。この指の効果として、安全性や義手の破損予防、指関節にシャフトや軸受等を使用しない事での、部品点数削減などが挙げられる。柔軟性を持った指の製作に当たって使用する素材を検討した結果、シリコンゴムを採用した。図5に第1指を除く4指を対象とする指の構造を示す。指の幅および厚みは10mmとし、指の長さ(MP関節から指先端までの距離)は第2指および第4指を60mm、第3指を63mm、第5指を54mmとした。第1指は、PIP関節とDIP関節を持つ構造とし、指の幅は15mm、指の長さは36mmとした。指にはワイヤが通されており、指の先端で固定されている。このワイヤを牽引することで、指の伸展を行う。指が完全に伸展するのに必要なワイヤの牽引長さは15mmである。指の屈曲は、シリコンゴムの関節による弾性を利用した。また、指のカバーもシリコンゴムで製作し、物体と触れる指の腹部分には、滑り止めの溝を形成した。指の骨格に相当する内部の部品は硬度の高い樹脂で製作した。

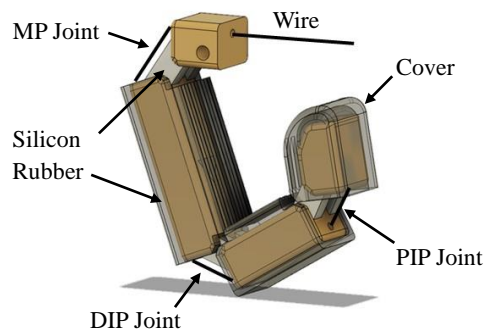


図5 拇指を除く4指の構造

#### 4. 研究成果

##### (1) SMA 人工筋肉アクチュエータの設計と試作

試作した SMA 人工筋肉アクチュエータの発生力特性および冷却特性を明らかにした。発生力特性は、冷媒がない条件で最大 46N、冷媒がある場合の条件で最大 21N の発生力が得られた。冷媒がない場合に比べて発生力は低下したが、SMA に発生する過剰な熱量を抑えられることを確認した。また冷却特性は、発生力を 10N で停止したとき、冷媒がない場合では 411.4 秒、冷媒がある場合では 69.3 秒の冷却時間が得られた。冷媒がある場合では、冷媒がない場合に比べて、約 1/6 時間で冷却されており、大幅な冷却時間の短縮が期待できることが確認できた。そのためフッ素系不活性液体を用いた強制冷却は、SMA に伝わる過剰な熱量を抑え、SMA アクチュエータの応答性の向上に有効であることを確認した。

##### (2) 小児用前腕動力義手の設計と試作

試作した義手に対し、駆動評価を行った。まず 4 指について説明する。MP 関節や薬指・小指は、外力を加えることで動作することを確認した。しかし、設計では初期状態で 4 指の各関節が 90° 屈曲するように設定したが、どの関節も 90° まで曲がらず、外力を加えて伸ばした後外力を取り除いても 90° に復元しなかった。また、図 6 に示すように、アクチュエータで可動する人差し指と中指のワイヤを手で引っ張ったが、十分に伸展動作を行うことができなかった。これらの原因として、屈曲動作に使用した超弾性 SMA 板ばねの力不足や、内部でたわんでしまい十分な駆動が行えていないことが考えられた。超弾性 SMA 板ばねの力を大きくするには、使用する枚数を増やす、厚みを大きくするなどの必要がある。しかし、手指内部のスペースは十分でなく、また、たわみの問題もある。以上のことから、超弾性 SMA 板ばねを用いた完全な屈曲動作は困難であり、屈曲方法を変更する必要があると考えられる。

次に、親指について説明する。親指に使用しているフレキシブルチューブは、指の大きさに合わせて切断したものを用いたが、切断後は切断前よりも曲がりづらくなり、手掌と垂直にすることができなかった(図 7)。この原因としては、切断したことにより、作用点の位置が変化したことなどが考えられる。

また、本動力義手では、図 8 に示すように  $\phi 52$  の空き缶(約 34g) の把持を行うことができることが確認された。このとき、指先等のゴムが滑り止めの機能を果たすことができた。本動力義手では、MP 関節は外力によって動く仕組みであるが、手掌全体による安定した把持、さらに径の小さな物体の把持を行うためには、MP 関節が内側に曲がらなければならない。従って、MP 関節の駆動も検討する必要がある。



図 6 4 指の動作確認



図 7 親指の動作確認



図 8 対象物の把持

##### (3) 柔軟な指を持つ小児用前腕動力義手の試作

義手は、握力把握、精密把握、両手動作、ジュスチャーの各動作の検証実験により評価した。なお、このときの動作はアクチュエータを搭載せず、義手に腕を固定するバンドと義手の指を伸展させる紐を使用して、手で指を動かして行った。握力把握は 5 指すべてを駆動させて行き、拇指を伸展してから 4 指を伸展して対象物に掌を押し付けながら 5 指を同時に屈曲させることで、5 指全てで対象物を包み込む。一方精密把握は、第 1 指から第 3 指のみを駆動させて行き、拇指を伸展させてから他の指を伸展させ、拇指を屈曲させる。それから拇指の指先を対象物に当ててから他の指を屈曲して、対象物を 3 つの指先で把持する。図 9 にスティックのり、ハンカチ、小さなぬいぐるみなどの対象物を握力把握した様子を示す。次に、図 10 にビー玉、消しゴム、カードなどを精密把握した様子を示す。

実験の結果、握力・精密把握では、最大把握重量は 150g であった。握力把握では指関節が柔軟な為、指が広がって対象物の形状に沿うように把握することが確認された。しかし、重量のある物や手全体で把握できない形状の物は把持できず、また重い物の把握時は指が垂れ下がり他の指に干渉した。従って、指が垂れにくい構造にするか、指がずれた分他の指も干渉しないようにずれる機構が必



要であると考えられる。精密把握では、ペットボトルキャップやビー玉のような小さいものを把持できることが分かった。一方、電池のような小さな円柱の物では精密把持を行おうとすると、形状により力が分散して対象物が滑ることにより、上手く把持する事が出来ない事が分かった。これは指先の形状・柔軟性に問題があると考えられる。



図9 握力把持の様子

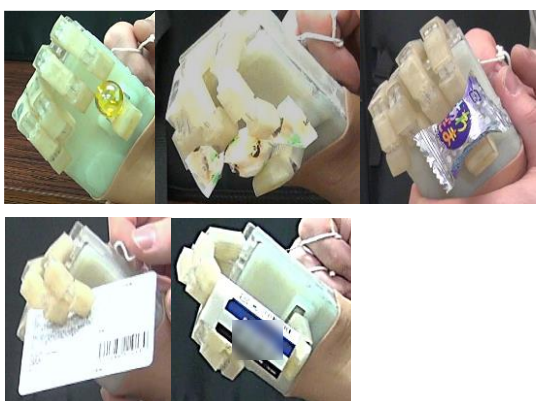


図10 精密把持の様子

本研究では、日常生活動作とコミュニケーションの2種類の動作を想定した柔軟な手指を持つ小児用義手を試作した。本義手は、手指の関節をシリコンゴムで形成することにより、安全で壊れにくい小児用義手を目指した。また、握力把握、精密把握、両手動作、ジェスチャーの各動作実験により性能を明らかにした。その結果、把持力不足により把持できない物体を確認した。今後は、柔軟性を保ちながらも把持力を向上させることが課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- (1) Hironari Taniguchi, Atsunori Hashimoto and Syunsuke Izuhara, "Design of a Functional Prosthetic Hand for Children using Novel Shape Memory Alloy Actuators", International Journal of Innovations in Engineering and Technology,

Special Issue on ACEIAT & JTSTE - Thailand 2014, pp. 57-63, DOI:10.1016, 査読あり, (2015).

- (2) 谷口造成, 神橋政士, 橋本篤徳, "不活性液体による冷却機構を有する小型 SMA アクチュエータの試作", 日本 AEM 学会誌 Volume22, Number2, pp. 274-279, 査読あり, (2014).
- (3) Hironari Taniguchi, "Flexible Artificial Muscle Actuator Using Coiled Shape Memory Alloy Wires", APCBEE Procedia, volume 7, pp. 54-59, 査読あり, (2013).

[学会発表] (計11件)

- (1) 谷口造成, 樽武和, "柔軟な指を持つ小児用前腕動力義手", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017年5月12日, ビックパレットふくしま(福島県郡山市).
- (2) 樽武和, 谷口造成, "SMA アクチュエータを用いた前腕欠損児のための動力義手の開発", SMA シンポジウム 2016, 2016年11月11日, 横浜市立大学(神奈川県横浜市).
- (3) 谷口造成, 橋本篤徳, 中川未稀, "手首の動作が可能な小児用前腕動力義手の開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2016年6月9日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市).
- (4) 中川未稀, 谷口造成, "SMA アクチュエータを用いた小児用前腕動力義手の開発", SMA シンポジウム 2015, 2015年11月13日, 金沢歌舞伎座(石川県金沢市).
- (5) Atsunori Hashimoto, Hironari Taniguchi and Syunsuke Iduhara, "Development of Shape Memory Alloy Actuator Mounted Cooling Mechanism for Externally Powered Prosthetic Hand for Children, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), 2015年4月24日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県那覇市).
- (6) 出原俊介, 谷口造成, "小児用動力義手に対応した冷却機構を備えた SMA アクチュエータの開発", SMA シンポジウム 2014, 2014年11月13日, アクロス福岡(福岡県福岡市).
- (7) Hironari Taniguchi, Atsunori Hashimoto and Syunsuke Iduhara, "Design of an externally powered prosthetic hand for children using novel shape memory alloy actuators", 1st Asian Conference on Electrical Installation, 2014年8月29日, チェンマイ(タイ王国).
- (8) 橋本篤徳, 谷口造成, 神橋政士, "フッ素系不活性液体による強制冷却機構を

- 持つ形状記憶合金アクチュエータの検討”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014 年 5 月 27 日, 富山国際会議場(富山県富山市).
- (9) 谷口造成, 神橋政士, 橋本篤徳, “駆動源に形状記憶合金を用いた小児用動力義手の開発”, 第 26 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム (SEAD26), 2014 年 5 月 22 日, アイーナ岩手県民情報交流センター(岩手県盛岡市).
- (10) 谷口造成, 神橋政士, 橋本篤徳, “不活性液体による冷却機構を有する小型 SMA アクチュエータの試作”, 第 22 回 MAGDA コンファレンス in 宮崎 (電磁現象および電磁力に関するコンファレンス), 2013 年 12 月 2 日, 宮崎観光ホテル(宮崎県宮崎市).
- (11) 神橋政士, 谷口造成, “形状記憶合金アクチュエータを用いた小児用前腕動力義手の検討”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 9 日, 岡山大学(岡山県岡山市).

[その他]

ホームページ等

<https://www.flexibleroboticslab.com/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷口 造成 (TANIGUCHI, Hironari)  
大阪工業大学・ロボティクス&デザイン工学部ロボット工学科・准教授  
研究者番号：00508955

### (2) 連携研究者

鈴森 康一 (SUZUMORI, Koichi)  
東京工業大学・工学院・教授  
研究者番号：00333451