

釣り糸を用いた人工筋肉を動作させるための制御装置の開発

清水 智^{*1} 坂田 修一^{*1} 福田 聖斗^{*1} 辛 徳^{*2}

Development of a control device to operate artificial muscles using fishing lines

Shimizu Satoru^{*1} Sakata Shuichi^{*1} Fukuda Masato^{*1} Duk Shin^{*2}

Existing electric prostheses have problems such as poor flexibility, driving noise, and heavy weight. It is conceivable to use artificial muscles instead of electric motors for actuator as a method to solve these problems. Recently, the artificial muscles made by fishing line has attracted attention among the various types of artificial muscles. This artificial muscle has high power, low cost and high productivity, but its operation method has not been established yet. We developed a thermal control device using a peltier element and incorporated a method of twisting fishing lines as artificial muscles. We used it for actuator in robot hand. The thermal control device could control robot hand and we verified its operation.

1 序論

1.1 研究背景

既存の電動義手には柔軟性に乏しい、駆動音がする、重いといった問題がある。これらはアクチュエータに電動モータを使用しているためである。一方、人体腕内部には図1のような種々の形状の筋肉が複数密集配置され精細かつ力強い動作を発揮する。生体筋肉は最小単位の筋肉細胞が複数結束した構造をもち、筋肉細胞の組合せにより種々の形状の筋肉が形成されている。従って生体筋細胞と同様の高い柔軟性をもつ伸縮型アクチュエータを実現すれば全身の筋肉をモデルとする人工筋肉の製作が可能となり、精細かつ力強い人間親和型ロボットが実現できると考える[1]。

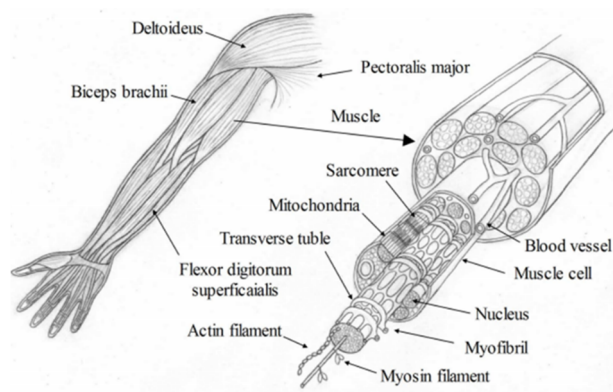


図1 人間の筋肉の構造

1.2 先行研究

人工筋肉の研究は、多くの研究機関で行われている。アクチュエータとして従来に作られた人工筋肉には、空気圧ゴム人工筋肉と化学エネルギーを機械エネルギーに変換するメカノケミカル人工筋肉の二つ方式が主に研究されていた。どちらも Marcinčin と Palko (1993) によると 1930 年頃提案され、現代に至るまで研究は続けられている[2]。人工筋肉には、はっきりとした定義は存在しないが、生体筋モデルに「柔軟性の高いかつ伸縮型のリニアアクチュエータ」と言う共通のイメージは存在する。このイメージを元に、従来金属により占められてきたアクチュエータの筐体に、ゴムや高分子電解質などの柔軟性のある素材を用いて人工筋肉の実現を目指す研究が続けられてきた[3]。ゴムチューブの空気圧を制御するマッキベンタイプ人工筋肉[4-6]は、自重に対する発生力が大きく、空気圧の印加と排出によって比較的容易に操作できることから現在人工筋肉の主流になっている。このタイプには、ゴムチューブの軸方向の伸びを繊維メッシュで拘束して収縮力を取り出すマッキベン型と、直線状の炭素繊維で拘束して収縮力を増強した軸方向繊維強化型がある。しかし、どちらも応答性が悪く空気圧コンプレッサや電磁弁が必要であり運びに不便な空気圧アクチュエータとして共通の問題がある。メカノケミカル人工筋肉は、化学反応や吸着や膨潤などによって駆動されるアクチュエータだが、反応液の供給と反応後の液回収の循環装置が必要になるうえ応答性が悪い問題がある。また高分子電解質に電圧を印加し酸やアルカリを発生させ化学反応で伸縮させるものや、水分子を吸着脱水して発生力を取り出すものもあるが、現状では

^{*1} 東京工芸大学工学部電子機械学科学部生
2020年3月25日受理

^{*2} 東京工芸大学工学部電子機械学科准教授

実用的応答速度は得られていない。

一方、近年では、以上二つの主流以外に静電気や金属の相変態を使う新しいタイプの人工筋肉が登場している。静電気を使うタイプには、積層型静電人工筋肉と電歪ゴム人工筋肉がある。積層型静電人工筋肉は、2枚の絶縁フィルム上に複数に並べ対抗させた電極間に印加する電圧をステッピングモータと同じように次々に移動させ駆動するものである[7]。フィルムを用いるため軽く応答速度が極めて高いが、アクチュエータ筐体には柔軟性がなく発生力が小さい問題がある。電歪ゴム人工筋肉は、エラストマー膜の両面に柔軟性のある電極を付け、両極に高電圧をかけることで静電吸引力によりエラストマーを圧縮し歪ませて側面方向に発生する伸びを利用するものである[8]。ただし、伸長方向以外に力を発生できず、収縮力を得るためには予め伸長させておく必要があり硬いリンク機構が必要になる問題がある。静電人工筋肉の発生力は、正・負電極間に蓄えられる静電エネルギーを変位方向に微分して得られ、電磁石のように重いコイルを必要としない長所がある。しかし、高電圧を必要とするため安全面から実用化されたことはない[9]。2014年にはこれら空気圧ゴム人工筋肉やメカノケミカル人工筋肉などと異なる新しいタイプの釣り糸人工筋肉が発表された[10]。釣り糸人工筋肉は釣り糸をコイル状に形成して作られる人工筋肉であり、加熱により収縮し、冷却によって伸長する性質がある。釣り糸筋肉は軽量で束ねることで高トルクを容易に発生できるので現在様々な研究機関によって研究されているが、効率的に釣り糸筋肉を動作させる方法についてはまだ確立されていない。

1.3 研究目的

本研究では電動義手へ釣り糸人工筋肉を搭載させるための前段階として、釣り糸人工筋肉の製作と評価を行い、人工筋肉を動作させるためにペルチェ素子を用いた制御装置を製作する。さらに、製作した装置を用いてロボットハンドの指を動作させることを目的とする。

2 釣り糸筋肉アクチュエータ

2.1 釣り糸人工筋肉

釣り糸人工筋肉とは、MITのHainesらの研究グループが2014年に発見した新型の人工筋肉である[10]。市販のナイロン繊維を図2のように荷重を加えながらひねって、コイル状に成形することで製作できる人工筋肉である。この人工筋肉は、加熱によって収縮し、冷却によって伸長する。人工筋肉を温度変化させることで図3のように伸長収縮動作を取り出すことができる。この人工筋肉は、市販のナイロン糸から製作でき、製作手順が簡単であるため、軽量性、低コスト、高い量産性を有した人工筋肉として注目されている。また、動作時に駆動音が発生しないという利点も有している。この人工筋肉を用いて様々な取り組み

がなされており、ロボットハンドやパワーアシストデバイスのようなアプリケーションへの適用や人工筋肉の位置と力を調整できるような手法の構築などが行われている[11]。また、学術研究機関だけでなくPanasonic USAのような

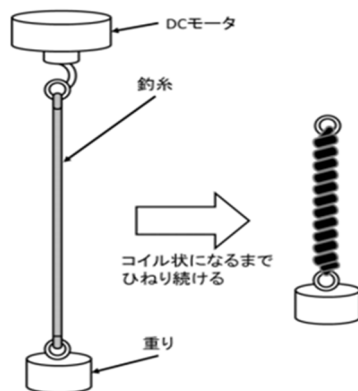


図2 製作手順

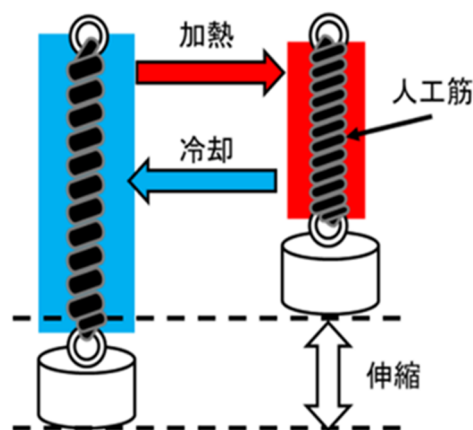


図3 温度変化による伸長、収縮

企業も釣り糸人工筋肉の研究開発に携わっており、様々な研究機関で注目されている。

2.2 使用した釣り糸

本研究ではカーボンナイロン素材の釣り糸（CN500、DUEL社）を使用した。これは釣具店等で市販されているものである。4種類の異なる号数の釣り糸を使用した。使用した釣り糸の号数とその直径の関係を表1に示す。

表1 釣り糸の号数とその直径

号数	5号	6号	8号	10号
糸の直径 [mm]	0.370	0.405	0.470	0.520

3 釣り糸人工筋肉の製作

3.1 釣り糸人工筋肉の制作方法

釣り糸人工筋肉はコイル状になるまで釣り糸を捻った後に熱処理して製作した。はじめに5号(線径0.370mm)の釣り糸を370mmに切って、両端にゼムクリップを取り付けた。この釣り糸の片側を製作したシステム(図4)のStepper motor(17HS4401)に取り付け、もう片方には水を入れて230gにしたペットボトルを錘として取り付けた。Stepper motorを使い、釣り糸が全てコイル状になるまで430回捻った後、第4章で後述する熱処理機に取り付け、180℃で1時間熱処理[12]を行い、釣り糸人工筋肉を製作した。製作した釣り糸人工筋肉の長さは100mmであった。

同様に6号(線径0.405mm)の釣り糸を400mmの長さに切り345回、8号(線径0.470mm)の釣り糸を460mmに切り380回、10号(線径0.520mm)の釣り糸を490mmに切り360回捻り、コイル状にした後熱処理を行い、釣り糸人工筋肉を製作した。製作した人工筋肉は長さが100~108mmとなったため、両端に結び目を作ることで人工筋肉の長さが100mmになるように調節した。

釣り糸人工筋肉の製作に伴い、オープンソース式マイコンボード(Arduino)でStepper motorを制御するプログラムを製作した。プログラムの内容は、回転数の指定をシリアルモニタからStepper motorに出力するものであり、任意に回転数を変えられるものである。製作に用いた釣り糸人工筋肉の材料と製作装置を表2、表3に示す。

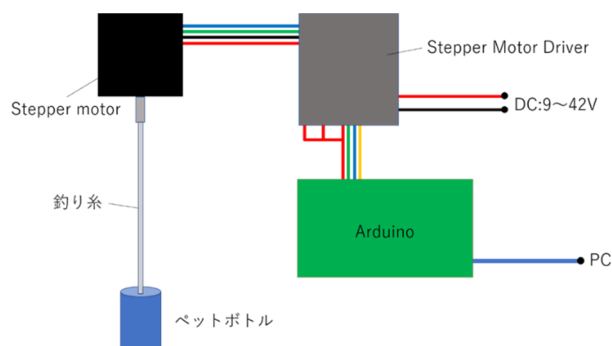


図4 釣り糸を捻る装置

表2 釣り糸人工筋肉の材料

名称	CN500 CARBONYLON
メーカー	DUEL
型番	H3455-CL(5号) H3456-B(6号) H3457-Y(8号) H3458-GR(10号)
用途	釣り糸人工筋肉の材料

表3 製作装置

名称	Stepper Motor	Stepper Motor Driver	Arduino UNO
メーカー	Longrunner	-	OSOYOO
型番	17HS4401	TB6600	-
用途	釣り糸を捻るため	Stepper Motorの制御	Stepper Motor Driverの制御

4 測定器及び熱処理機の製作

4.1 張力測定器の製作

製作した釣り糸人工筋肉の温度—張力特性を調査するに伴い、ロードセル、K型熱伝対、Arduinoを使った張力測定器を製作した(図5の左)。釣り糸人工筋肉の下端を固定式のフックに取り付け、上端はロードセルの先に付いているフックに取り付け、釣り糸人工筋肉が収縮した際にロードセルに生じる歪をArduinoが読み取る仕組みである。K型熱伝対は釣り糸人工筋肉の温度を測定するためのものである。

釣り糸人工筋肉全体に均一に熱を加えるため、図5右のように円形型加熱装置も考案し製作した。鉄パイプの表面にラバーヒータを取り付けたものであり、この円形型加熱装置は温度コントローラと半導体リレー(SSR)によって制御される。鉄パイプの中央付近には穴を開けてあり、この部分には温度コントローラのK型熱伝対が取り付けられている。ラバーヒータにより内部の空気が加熱されることにより釣り糸人工筋肉全体を均一に熱することが可能になった。

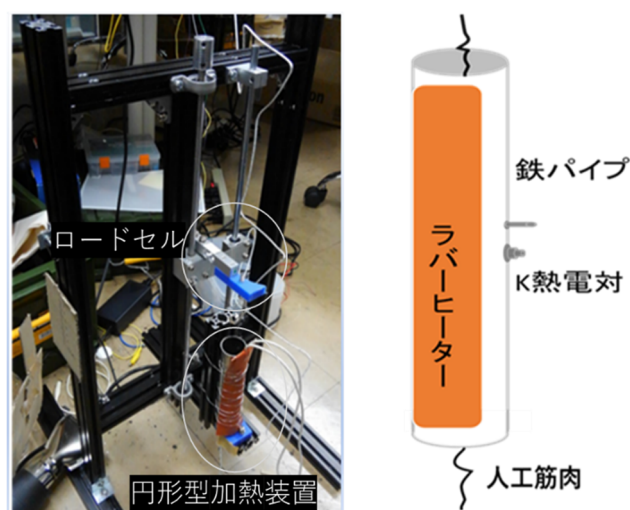


図5 張力測定器と円形型加熱装置

4.2 収縮量測定器

釣り糸人工筋肉の温度—収縮量特性を調査するため

に、ラバーヒータ代わりにペルチェ素子(TEC1-12706)を用いた収縮量測定器を使用した(図 6)。ペルチェ素子はラバーヒータと比べて制御システムが単純でコントロールがしやすい特徴を持っている。

収縮量測定器の構造について説明する。鋼材にペルチェ素子を貼り付け、その表面にアルミ板を加工した四角柱を取り付けたものであり、四角柱内の空気を熱することで釣り糸人工筋肉を動作させる。釣り糸人工筋肉の下端には紙で作ったメモリを指し示す部品を取り付け、四角柱の左にある定規のメモリを読めるようにしてある。四角柱の内部には K 型熱伝対が四角柱表面に触れないようにして、釣り糸人工筋肉近くに設置してある。この K 型熱伝対は Arduino に接続されており、シリアルモニタに温度を示す。4 つのペルチェ素子は直列に接続されており、電源装置(KIKUSUI 製 PMM35-1.2DU)から電源を供給され動作する。この収縮量測定器のプログラムは張力測定器のものを流用している。



図 6 収縮量測定器

この測定器は本研究に携わっている他のメンバーである田口氏と草野氏が製作したものを拝借した。

4.3 熱処理機の製作

捻った釣り糸の形状を固定するためにラバーヒータ、K 型熱伝対、Arduino を使用した熱処理機を製作した(図 7)。

熱処理機の構造について説明する。鋼材のレールに 2 つのボルトが取り付けられており、ボルト間にはラバーヒータが設置されている。ラバーヒータ表面には熱が釣り糸人工筋肉全体に均等に伝わるよう銅板を取り付けてある。人工筋肉はラバーヒータの上に取り付ける。人工筋肉が直接銅板に接していると加熱しすぎてしまうため、加熱時には薄い断熱材で人工筋肉を包む。ラバーヒータ一つでは 180℃に達するのに時間がかかるため、ボルト間に設置した人工筋

肉の上部にも銅板を設置し、その上にラバーヒータを設置した。そして鋼材全体を断熱材で覆った。K 型熱伝対は人工筋肉に接するように設置し、Arduino に接続されている。

熱処理機の製作に伴い、温度のモニタリングと加熱温度、加熱時間を制御するプログラムも作成した。



図 7 熱処理機

5 製作した釣り糸人工筋肉の性能調査実験

5.1 線径の違いによる温度－張力特性

製作した繊維の線径が異なる 4 種類の釣り糸人工筋肉を用いて温度－張力特性を調査した。釣り糸人工筋肉を張力測定器に設置し、室温(20℃)から 100℃まで温度を上げた。測定結果は下の図 8 のようになった。

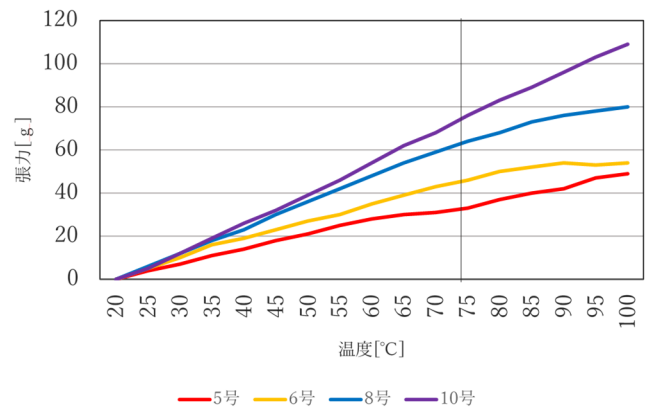


図 8 異なる線径ごとの温度－張力特性

図 8 を見ると釣り糸の線径が太いほど温度当りの張力が大きいたことが分かり、もっとも太い 10 号の釣り糸で製作した人工筋肉は 75℃で 75g の張力が発揮されていることが分かった。また各人工筋肉の温度と張力はほぼ比例関係にあることが分かった。10 号の釣り糸で製作した人工筋肉は 75℃を超える温度でも比較的溫度と張力の比例関係が保たれていることが分かった。

以上の結果を踏まえ、10 号の釣り糸を用いた人工筋肉を用いて以後の実験を行うことにした。

5.2 温度－収縮量特性

10 号の釣り糸を用いた人工筋肉を使って、温度－収縮量特性を調査した。釣り糸人工筋肉を収縮量測定器に設置し、温度を室温(25℃)から 70℃まで上げた。測定結果は下の図 9 のようになった。

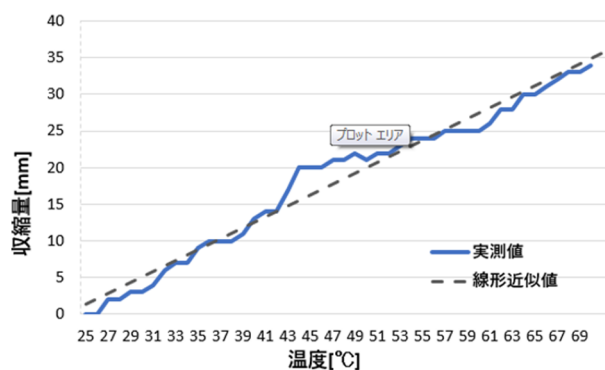


図 9 温度－収縮量特性

この釣り糸人工筋肉は 70 度で 34mm 収縮することが分かった。長さが 100mm であることから収縮率は 34%であることが分かった。人間の筋肉の収縮率が 30～40%[13]であることからそれに匹敵することが分かった。

6 ペルチェ素子制御装置の製作と評価実験

6.1 釣り糸人工筋肉制御装置の製作

釣り糸人工筋肉を動作させるためにペルチェ素子を用いた制御装置を製作した。ペルチェ素子両面に熱伝導の良い銅板で銅パイプを押さえつけるように貼り付けた(図 10)。ペルチェ素子と銅板の間には熱伝導シリコン(Thermal Grizzly 製 TG-K-001-RS)を全面に塗った。



図 10 製作した釣り糸人工筋肉制御装置

6.2 製作した制御装置を用いた動作の評価実験

市販のロボットハンドの人差し指を釣り糸人工筋肉で引っ張りあげる評価実験を行った。釣り糸人工筋肉を取り付けたロボットハンドの手と制御装置を鋼材に取り付け、電源装置を使って制御装置を動作させ、指が伸びるか実験

した。また指が伸びるまでの時間を計測した。



a) 指を動かす前



b) 指を伸ばした状態

図 11 ロボットハンドの様子

6.3 実験結果

人差し指を伸ばすことができた。人差し指が伸びるまでの時間は 239 秒であった。動作の様子を図 11 に示す。

ペルチェ素子を用いてロボットハンドの人差し指を動作させることができた。しかし、提案したロボットハンドでは指の動作に長時間がかかる問題が生じた。その理由として、ペルチェ素子から発生した熱が本体の銅板から逃げてしまい、銅パイプ内まで効率的に熱が伝わっていないため昇温・降温の速度問題が原因であると考えられる。また制御装置に用いているペルチェ素子自体の発熱量が少ないことも考えられる。

7 まとめ

本研究では釣り糸人工筋肉の製作のため釣り糸を捻る装置や熱処理機を考案し、太さが異なる 4 種類の釣り糸人工筋肉の製作を行った。人工筋肉の特性を調べるためペルチェ素子を用いた温度制御装置と張力測定器や収縮量測定装置を製作した。その結果、釣り糸人工筋肉は温度－張力特性と温度－収縮量特性がほぼ線形であることが確認できた。さらに、製作した装置を用いてロボットハンドの指を動作させることができた。しかし、動作が遅いため改良の必要があることが分かった。具体的には断熱材を用いて熱の損失を防ぐこと、パイプ径を小さくすること、ペルチェ素子の数を増やすなど釣り糸人工筋肉への熱伝達効率を高めることなど工夫が求められると考えられる。

参考文献

- [1] 高岡真幸, 鈴森康一, 脇元修一, 飯嶋一雄, 徳宮孝弘: 生体模倣ロボット機構実現に向けた多繊維構造マッキベン人工筋, 第14回システムインテグレーション部門講演会
- [2] Marcinčin J. and Palko A.: Negative pressure artificial muscle—An unconventional drive of robotic and handling systems, Transactions of the University of Košice, pp.350-354, Rieckansky Science Publishing Co, Slovak Republic, 1993.
- [3] Jakub E. Takosoglu et. al.: Determining the Static Characteristics of Pneumatic Muscles, Measurement and Control, Vol. 49(2), pp.62-71, 2016.
- [4] Hoggett, R. 1957—Artificial Muscle” —Joseph Laws McKibben. Available online at <http://cyberneticzoo.com/bionics/1957-artificial-muscle-joseph-laws-mckibben-american/> (2012, accessed 11 September 2014).
- [5] Gaylord RH. Fluid actuated motor system and stroking device. Patent 2844126, USA, 1958.
- [6] Artificial muscle, Life, pp.87-88, Mar. 14, 1960.
- [7] 奥田一雄、実吉敬二:” 厚い電極構造による積層型静電アクチュエータの伸びの低減” 第21回日本ロボット学会学術講演会、3D24, 2003.
- [8] 千葉正毅, 和氣美紀夫: アクチュエータ, 最新導電性材料 技術大全 下巻, 第1部, 第17章, pp.397-416, 技術情報協会, 2007.
- [9] 斎藤克彦, 堂埜茂, 後藤孝夫: 形状記憶合金アクチュエータ, 特許出願公開番号: 特開2005-155427 (P2005-155427A)
- [10] Carter S. Haines et al.: Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread,” Science, vol.343, no.6173, pp.868-872, 2014.
- [11] Michael C. Yip and Gunter Niemeyer: High-Performance Robotic Muscles from Conductive Nylon Sewing Thread,” Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, Washington, USA, May 2015, pp.2313-2318.
- [12] 舩屋賢, 小野秀, 高木賢太郎, 田原健二: 釣り糸人工筋肉の束を利用したアクチュエータユニットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2017 巻 (2017)
- [13] 金藤敬一: ” 高分子アクチュエータ”, 高分子, vol. 55, no. 12, pp. 956-960, 2006