

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03204

研究課題名(和文) 自己センシング高分子人工筋肉の開発と物理原理に基づく制御指向モデリング

研究課題名(英文) Development of self-sensing polymer artificial muscle and its control-oriented modeling based on physics

研究代表者

高木 賢太郎 (Takagi, Kentaro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60392007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：自己センシング機能を持つ釣糸人工筋アクチュエータの開発と、その動作メカニズムの解明に向けた研究を行った。

具体的には、次の4つの成果を得た。(1) 釣糸人工筋アクチュエータの動作原理解明と発生トルクのモデリング、(2) イオン導電性高分子センサのシンボリックな有限要素法を用いた制御指向モデリング、(3) 誘電エラストマーの電気加振に基づく特性評価法の開発、(4) 高分子センサをもつ自己センシング釣糸人工筋アクチュエータモジュールの開発。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物の骨格筋のような自己センシング可能なアクチュエーション機能を実現すべく、最新の高分子アクチュエータ・センサを用いて、すべて高分子だけでできた人工筋肉モジュールを開発することを目指した。学術的成果として、釣糸人工筋の動作原理と発生力(トルク)の数理モデル、イオン導電性高分子センサの使いやすい数理モデル、誘電エラストマーの特性評価手法の開発についての成果を得た。そして、誘電エラストマーセンサによって張力を計測しながら収縮力を発揮する釣糸人工筋アクチュエータを試作し、ロボットのための自己センシング高分子人工筋の実現への手がかりを得た。

研究成果の概要(英文)：This project carried out the development of a fishing-line artificial muscle actuator with a self-sensing function and modeling its operating mechanism.

Specifically, the following four results were obtained. (1) Elucidation of the operating principle of the fishing-line artificial muscle actuator and modeling of the generated torque, (2) Control-oriented modeling of ionic polymer sensors using the symbolic finite element method, (3) Development of characterization method of the dielectric elastomers based on electric excitation, (4) Development of self-sensing fishing-line artificial muscle actuator module with polymer sensor.

研究分野：アクチュエータ工学

キーワード：高分子アクチュエータ 高分子センサ 機能材料 人工筋肉 ソフトロボティクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高分子を用いた人工筋肉アクチュエータとして、電場応答性高分子(Electroactive polymer; EAP)が近年注目を集めている。EAPとは、高分子材料それ自体が印加電場によって変形する現象を利用する新しいアクチュエータの総称であり、90年代から急速に材料開発が進展してきている。これまでに開発されているEAPのうち、有望なアクチュエータとして4つのものが代表的と考えられる。イオン導電性高分子、導電性高分子、誘電エラストマー、釣糸人工筋肉である。釣糸人工筋肉は、ナイロンコイルアクチュエータ、Twisted and Coiled Polymer Actuator(TCPA)などとも呼ばれる。研究代表者(高木)は、これまでに、3つの電場応答性高分子に着目して研究を進めてきた。図1に、イオン導電性高分子と釣糸人工筋肉を示す。

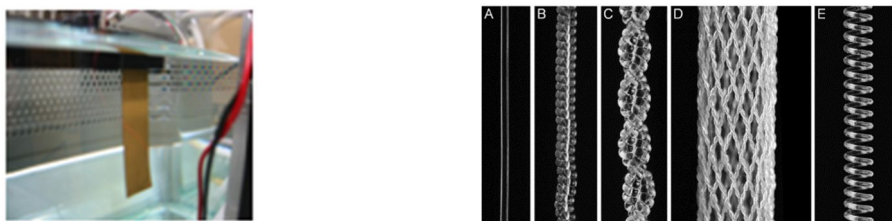


図1: 代表的なEAP。左: イオン導電性高分子(名大・理研・産総研), 右: 釣糸人工筋肉[Haines et al., *Science*, 2014]。

2. 研究の目的

本応募研究課題は、生物の骨格筋がもつ自己センシング可能なアクチュエーション機能を実現すべく、最新の高分子アクチュエータ・センサを用いて、すべて高分子だけでできた人工筋肉モジュールを開発することを目指した。アクチュエータ要素である筋線維として釣糸人工筋肉(TCPA)を用いる。また、力センサ要素であるゴルジ腱器官に相当するものとしてイオン導電性高分子を用いる。そして、複数の筋線維とそれに取り付けられた力センサからなるアクチュエータモジュールを試作し、そのアクチュエーション特性とセンシング特性を明らかにする。

本研究はモジュール開発にとどまらず、物理学に基づいてイオン導電性高分子と釣糸人工筋肉の動作原理を明らかにすることを目指した。イオン導電性高分子の物理を記述する方程式はZhuらによって明らかになってきているが、連立非線形偏微分方程式で表され工学的にはそのままでは利用しづらいため、近似と空間離散化の手法をシンボリックに用いて物理パラメータを陽に含んだ(非)線形時不変状態方程式を導くことを目指す。釣糸人工筋肉の物理については、従来の文献では熱膨張に起因すると主張しているものも見受けられる。しかしながら、われわれのグループでは実験の観察に基づき、高分子鎖の熱力学(エントロピー)に基づいて収縮が生じるという仮説を当初立てた。物理原理を明らかにするとともに、高分子の特性を変えて材料作製を行い、熱・温度・力・変位を同時に測定することによってモデルの検証を行うことを目指した。

3. 研究の方法

釣糸人工筋肉とイオン導電性高分子については、それぞれ合成繊維の専門家(入澤)とイオン導電性高分子の専門家(安積:年度途中から退職により研究協力者)を研究分担者とし、研究協力者に材料作製の依頼を行う。また研究協力者と物理についての議論を行う。また、アクチュエータのモジュール化に際してロボティクスの専門家(田原)と機械力学の専門家(井上)を研究分担者とし、制御、力学と機構についての議論を行う。研究代表者(高木)は、得られた材料をもとにアクチュエータとセンサを作製し、物理原理の考察と議論を研究分担者とともにを行い、特性計測実験を通して妥当性を確認する。そして、得られたモデルの低次元化の定式化、そのシミュレーションによる確認を行い、最終的にアクチュエータモジュールの開発を目指す。

4. 研究成果

本研究成果は、大きく分けて4つである。釣糸人工筋の動作メカニズムの解明、イオン導電性高分子センサの制御指向モデリング、誘電エラストマーの特性評価、そして高分子センサを複合した釣糸人工筋アクチュエータモジュールである。以下に、それぞれの成果概要を述べる。

(1) 釣糸人工筋の動作原理解明とモデリングについて

これまで、高延伸された高分子繊維の収縮は、特徴的な構造に起因するエントロピー弾性がその収縮の起源であると考えられてきた。また、当初の研究計画ではエントロピー弾性に基づく物理モデルを構築する予定であった。しかしナイロン(ポリアミド)繊維を用いた実験の結果、熱収縮係数は荷重に依らずほぼ一定であり、すなわち、エントロピー弾性(=荷重に比例して弾性係数が大きくなる)では説明が困難であることが明らかになった。そこで、研究協力者の塩谷教授により、高分子繊維の熱収縮を説明しうる新たな高分子構造の仮説が提案され、実験結果を説明しうるモデルが初めて明らかになった。図2は、エントロピー弾性を否定する実験結果と、提

案する高分子構造である．成果は学術誌に公表した[1]．

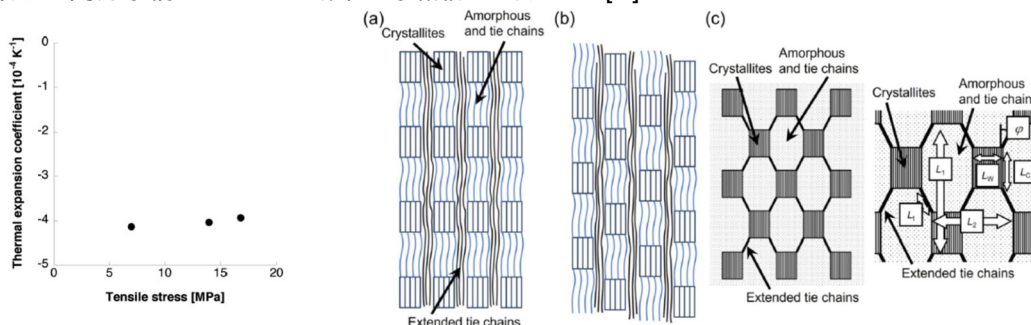


図2：エントロピー弾性だけでは説明できない高分子繊維の収縮（左）と，それを説明する新しい原理の仮説（右）．査読付学術誌にて公表[1]

また，強加撚された高分子繊維の発生トルクの物理モデルを初めて導出し，成果を学術誌に公表した[2]．図3にモデルを示す．もし発生トルクが予測できれば，回転型釣糸人工筋（Twisted Polymer Fiber, TPF）のトルクが予測でき，またコイル形状の収縮型釣糸人工筋（Twisted and Coiled Polymer Fiber, TCPF）の収縮力も将来的に予測可能となる．先行研究である Shafer らの運動学的な自由回転についてのモデルを拡張し，繊維の剛性行列を用いることで，熱収縮によって発生するねじりトルクと張力変化を予測する．提案するモデルである，剛性行列を用いた free deformation - blocking force 変換式を以下に示す．

$$\Delta\tau_{act} = \frac{GJ}{R_0} \overline{\Delta\Phi} + K_c \overline{\Delta\varepsilon_z} \tag{1}$$

$$\Delta f_{act} = AY_z \overline{\Delta\varepsilon_z} + \frac{K_c}{R_0} \overline{\Delta\Phi}.$$

興味深いことに，初期加撚回転角を増やすほどねじりトルクは増加する一方で，張力は減少し，強加撚繊維では張力はむしろ減少する（たるむ）ことがわかった．実際に実験では，加熱によって強加撚繊維の張力は増加するどころか減少することを確認した．

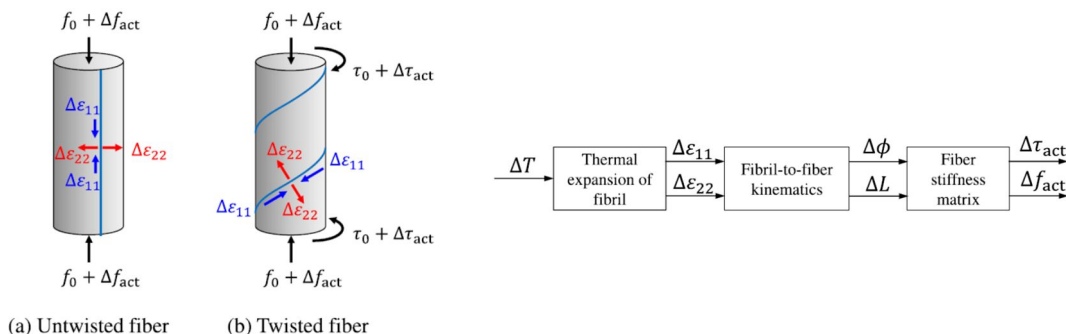


図3：アクチュエータ発生トルクのモデル化．加撚繊維のひずみ（左）とアクチュエータトルクの発生メカニズムのブロック線図（右）．査読付学術誌にて公表[2]

(2) イオン導電性高分子センサの制御指向モデリングについて

イオン導電性高分子のうち代表的なものである ionic polymer-metal composite(IPMC)は，イオン交換樹脂膜の両面に金属が接合された構造をもち，変形に伴う高分子内の水分子とイオンの移動によって生じる電場をセンサとして利用する．その複雑な動作メカニズムは複合物理原理によって表される．有力な，包括的な複合物理モデルとして，Zhuの複合物理モデルが知られており，湿度変化によるセンサの応答の違いを再現することができる．一方で，Zhuのモデルは連立偏微分方程式系で表されるため，解析やシミュレーションにコストがかかり，モデルの簡素化(simplification, model-order reduction)が求められる．

本研究は Zhu の偏微分方程式を空間離散化し，さらに低次元化することによって，低次の伝達関数・状態空間モデルを得るための系統的な手法を提案した．まず，Zhu の連立偏微分方程式に対して，「シンボリックに」有限要素離散化を行った．文字式のまま離散化を行うため，得られた状態空間モデルは物理定数を陽に含み，物理定数やサイズを考慮したままで解析やシミュレーションを簡易にできるという特長がある．図4は得られたモデルのシミュレーション結果であり，精度は COMSOL ソフトウェアを用いた直接数値計算とほとんど変わらず，計算コストを 1/1000 近く低減できるモデルを得ることに成功した．

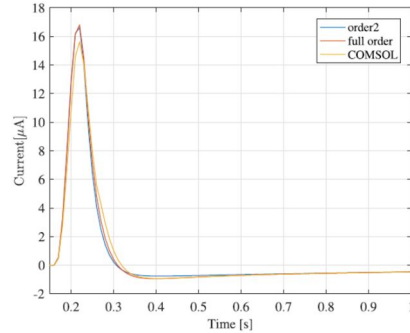
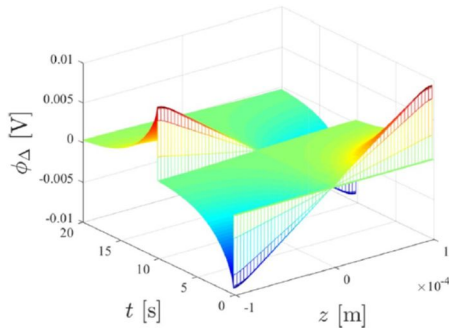


図4：IPMC センサの「シンボリックな」有限要素離散化と状態空間モデルの導出．電位の時空間分布（左）と電流応答（右）．査読付学術誌に公表[3]

(3) 誘電エラストマーの電気加振に基づく特性評価法の開発について

誘電エラストマーセンサは釣糸人工筋アクチュエータと複合化しやすいことがわかってきた．誘電エラストマーはその名の通りゴム材料でできており，とくに高速に動作させる場合には粘弾性特性を知る必要がある．これまで，動的粘弾性測定によって材料の特性評価が行われてきたが，計測にかかるコストや負担が大きかった．本研究は，誘電エラストマーがアクチュエータであることを活かし，アクチュエータ自身によって動的に加振させ強制振動させ周波数応答を計測することにより，粘弾性測定を簡便に行えることを提案した．図5の左は誘電エラストマーに錘を取り付けた写真である．右は等価機械モデルであり，周波数応答を実験によって計測することで粘弾性パラメータを推定することに成功した．

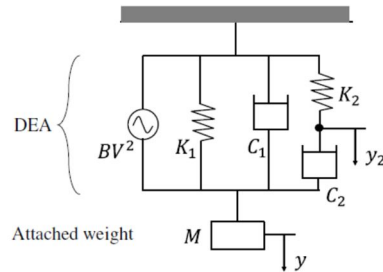
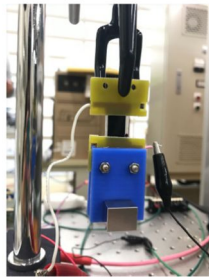


図5：誘電エラストマー材料の粘弾性測定法の開発．実験装置（左）と等価機械モデル（右）．査読付学術誌に公表[4]

(4) 高分子センサをもつ自己センシング釣糸人工筋アクチュエータモジュール開発について

図6は開発中の自己センシング釣糸人工筋アクチュエータである．釣糸人工筋が張力を発生するとともに，誘電エラストマーセンサは張力をセンシング可能である．誘電エラストマーセンサが荷重に対してほぼ線形のセンサ出力をもつことを確認した．なお，現状では，釣糸人工筋の張力変化に対して誘電エラストマーセンサの出力変化が小さくSN比が悪いため，センサの材料と機構の設計，ならびにセンサ回路の改善を今後の課題として検討している．

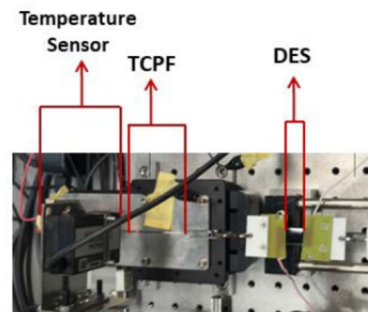
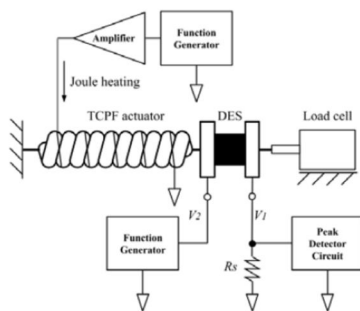


図6：DE センサをもつ釣糸人工筋アクチュエータ．実験装置の模式図（左）と写真（右）．学会口頭発表にて公表[5]

< 引用文献 >

- [1] D. Kimura *et al.*, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021.
- [2] K. Takagi *et al.*, *Smart Materials and Structures*, 2021.
- [3] K. Kondo *et al.*, *Smart Materials and Structures*, 2020.
- [4] K. Takagi *et al.*, *Actuators*, 2021.
- [5] A. Faruq *et al.*, *SICE SI 部門講演会論文集 2021*, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kimura Daisuke, Irisawa Toshihira, Takagi Kentaro, Tahara Kenji, Sakurai Daichi, Watanabe Haruhiko, Takarada Wataru, Shioya Masatoshi	4. 巻 12042
2. 論文標題 The origin of contraction of twisted polymer fiber muscles: whether the cause is entropic elasticity or thermal expansion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 124020P ~ 124020P
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2612843	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Taira Ryugo, Inoue Tsuyoshi, Iwasaki Tetsuya, Takagi Kentaro	4. 巻 12045
2. 論文標題 On integral resonant vibration control and the negative direct feedthrough term of a piezoelectric bimorph beam	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 120450D ~ 120450D
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2612755	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takagi Kentaro, Iwai Hiroki, Oiwa Chihaya, Irisawa Toshihira, Shioya Masatoshi, Masuya Ken, Tahara Kenji, Sakurai Daichi, Watanabe Haruhiko, Asaka Kinji	4. 巻 30
2. 論文標題 Modeling and characterization for straight twisted polymer fiber actuators in blocked torsion: effect of radial thermal expansion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 065023 ~ 065023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/abfc1a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kimura Daisuke, Irisawa Toshihira, Takagi Kentaro, Tahara Kenji, Sakurai Daichi, Watanabe Haruhiko, Takarada Wataru, Shioya Masatoshi	4. 巻 344
2. 論文標題 Mechanism for anisotropic thermal expansion of polyamide fibers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 130262 ~ 130262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.130262	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitazaki Yuya, Takagi Kentaro, Kondo Kota	4. 巻 11587
2. 論文標題 A method to characterize the mechanical impedance of thin stacked DEAs by suspension and electrical excitation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1158720 ~ 1158720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2584723	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kondo Kota, Takagi Kentaro, Zhu Zicai, Asaka Kinji	4. 巻 29
2. 論文標題 Symbolic finite element discretization and model order reduction of a multiphysics model for IPMC sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 115037 ~ 115037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/abb356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takagi Kentaro, Kitazaki Yuya, Kondo Kota	4. 巻 10
2. 論文標題 A Simple Dynamic Characterization Method for Thin Stacked Dielectric Elastomer Actuators by Suspending a Weight in Air and Electrical Excitation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act10030040	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 -

1. 著者名 Iwai Hiroki, Takagi Kentaro, Oiwa Chihaya, Masuya Ken, Tahara Kenji, Irisawa Toshihira, Shioya Masatoshi, Watanabe Haruhiko, Sakurai Daichi, Asaka Kinji	4. 巻 11375
2. 論文標題 On the fluctuation phenomenon of axial thermal stress of a torsional fishing-line artificial muscle (Twisted Polymer Fiber) actuator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 113751H
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2557783	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tahara Kenji, Hayashi Ryo, Masuya Ken, Takagi Kentaro, Irisawa Toshihira, Yamauchi Takuma, Tanaka Eitaro	4. 巻 4
2. 論文標題 Rotational Angle Control of a Twisted Polymeric Fiber Actuator by an Estimated Temperature Feedback	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2447 ~ 2454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2901982	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 -

1. 著者名 Hayashi Ryo, Masuya Ken, Takagi Kentaro, Irisawa Toshihira, Fujino Rui, Yamauchi Takuma, Tanaka Eitaro, Tahara Kenji	4. 巻 4
2. 論文標題 Rotational Angle Trajectory Tracking of a Twisted Polymeric Fiber Actuator by the Combination of a Model-Based Feed-Forward and Estimated Temperature Feedback	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2561 ~ 2567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2908484	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 -

1. 著者名 Kobayashi Yuichi, Harada Kentaro, Takagi Kentaro	4. 巻 118
2. 論文標題 Automatic controller generation based on dependency network of multi-modal sensor variables for musculoskeletal robotic arm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 55 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2019.04.010	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 -

1. 著者名 Ken Masuya, Shu Ono, Kentaro Takagi, Kenji Tahara	4. 巻 3
2. 論文標題 Feedforward Control of Twisted and Coiled Polymer Actuator Based on a Macroscopic Nonlinear Model Focusing on Energy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 1824-1831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2018.2801884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高木賢太郎	4. 巻 37
2. 論文標題 ソフトロボティクスのための高分子アクチュエータ・センサ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 38-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.37.38	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 舩屋賢, 高木賢太郎, 田原健二	4. 巻 48
2. 論文標題 釣糸人工筋肉のモデルベース制御に向けた巨視的モデリング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 月刊ファインケミカル	6. 最初と最後の頁 37-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ken Masuya, Shu Ono, Kentaro Takagi, Kenji Tahara	4. 巻 267
2. 論文標題 Modeling framework for macroscopic dynamics of twisted and coiled polymer actuator driven by Joule heating focusing on energy and convective heat transfer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 443-454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2017.10.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計39件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 D. Kimura, T. Irisawa, K. Takagi, K. Tahara, D. Sakurai, H. Watanabe, W. Takarada, M. Shioya
2. 発表標題 The origin of contraction of twisted polymer fiber muscles: whether the cause is entropic elasticity or thermal expansion
3. 学会等名 SPIE Smart Structures + NDE 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Taira, T. Inoue, T. Iwasaki, K. Takagi
2. 発表標題 On integral resonant vibration control and the negative direct feedthrough term of a piezoelectric bimorph beam
3. 学会等名 SPIE Smart Structures + NDE 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野澤武, 高木賢太郎, 松本荘史, 岩崎徹也, 井上剛志
2. 発表標題 負虚性と小ゲイン定理の混合特性に着目した安定判別の一考察と単純支持平板のIntegral Resonant Controlへの応用
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東内裕武, 安達悠河, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 高木賢太郎
2. 発表標題 加熱と強制空冷の切り替えを伴う釣糸人工筋の位置制御のためのモデル化について
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達悠河, 東内裕武, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 高木賢太郎
2. 発表標題 釣糸人工筋の収縮速度を10倍以上改善するフィードフォワード制御と温度制限について
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本 岳人, 東内 裕武, 入澤 寿平, 塩谷 正俊, 舩屋 賢, 田原 健二, 高木 賢太郎
2. 発表標題 釣糸人工筋肉の Coil Spring Index と作製時荷重の関係について
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Faruq Aiman, 足立 征士, 東内 裕武, 田原 健二, 舩屋 賢, 入澤 寿平, 高木 賢太郎
2. 発表標題 誘電エラストマセンサを用いた釣糸人工筋の張力計測に向けて
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Iwai, K. Takagi, C.Oiwa, K.Masuya, K.Tahara, T.Irisawa, M.Shioya, H.Watanabe, D.Sakurai, K.Asaka
2. 発表標題 On the fluctuation phenomenon of axial thermal stress of a torsional fishing-line artificial muscle (Twisted Polymer Fiber) actuator
3. 学会等名 SPIE Smart Structures+NDE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Takagi, K.Kondo, Z.Zhu, K.Asaka
2. 発表標題 Recent studies on simplification of a multi-physics model of IPMC sensors (Conference Presentation)
3. 学会等名 SPIE Smart Structures+NDE 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kitazaki, K. Takagi, K. Kondo
2. 発表標題 A method to characterize the mechanical impedance of thin stacked DEAs by suspension and electrical excitation
3. 学会等名 SPIE Smart Structures+NDE 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喜多崎湧也, 高木賢太郎, 近藤鴻多
2. 発表標題 誘電エラストマーの機械的インピーダンスを吊り下げ加振によってモデル化する手法の提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井宏樹, 高木賢太郎, 入沢寿平, 塩谷正俊, 舩屋賢, 田原健二
2. 発表標題 コイル型釣糸人工筋 (TCPF) の粘弾性の温度依存性について
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Hayashi, K. Masuya, K. Takagi, T. Irisawa, R. Fujino, T. Yamauchi, E. Tanaka, K. Tahara
2. 発表標題 Rotational Angle Trajectory Tracking of a Twisted Polymeric Fiber Actuator by the combination of a Model-based Feed-forward and Estimated Temperature Feedback
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K.Kondo, K. Takagi, Z. Zhu, K. Asaka
2 . 発表標題 A study on finite-element approximation of a multi-physical model of IPMC sensors
3 . 学会等名 International Conference on Active Polymer Materials and Soft Robotics (APMSR2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takagi, K. Kondo, J. Takeda, Z. Zhu, K. Asaka
2 . 発表標題 A recent study on simplification of a multiphysics model of IPMC sensors
3 . 学会等名 JISSE-16 Satellite Meeting: Symposium on bioinspired design of advanced materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takagi, K. Kondo, J. Takeda, Z. Zhu, K. Asaka
2 . 発表標題 A study on the fast simulation for a multi-physics model of IPMC sensors
3 . 学会等名 The 4th International Conference on Active Materials and Soft Mechatronics(AMSM2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 葛谷光平,高木賢太郎,谷崎星斗,大岩千隼,田原健二,舩屋賢,入澤寿平,安積欣志
2 . 発表標題 加熱と空冷ファンを用いた釣糸人工筋アクチュエータのPWM制御について
3 . 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 木村大輔, 木村開, 小林拓未, 塩谷正俊, 土井健太, 入澤寿平, 高木賢太郎, 田中栄太郎, 櫻井大地, 渡邊晴彦, 田原健二, 舩屋賢
2. 発表標題 ナイロンフィラメントの負の線膨張係数に関する研究
3. 学会等名 2019年度繊維学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川貴, 土居玄太, 田邊靖博, 高木賢太郎, 入澤寿平, 田中栄太郎, 櫻井大地, 渡邊晴彦, 塩谷正俊, 舩屋賢, 田原健二
2. 発表標題 高分子繊維アクチュエータの駆動モデルの検証
3. 学会等名 2019年度繊維学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷崎星斗, 高木賢太郎, 田原健二, 舩屋賢, 入澤寿平, 塩谷正俊, 安積欣志
2. 発表標題 釣糸人工筋アクチュエータの駆動時における最適荷重に関する調査
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門Dynamics and Design Conference2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井宏樹, 高木賢太郎, 大岩千隼, 入澤寿平, 塩谷正俊, 舩屋賢, 田原健二, 渡邊晴彦, 櫻井大地, 安積欣志
2. 発表標題 ねじり型釣糸人工筋 (TPF) が初期ねじれ回数によって収縮もしくは伸長する現象について
3. 学会等名 第37回ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村大輔, 木村開, 小林拓未, 舩屋賢, 塩谷正俊, 長谷川貴, 土井玄太, 入澤寿平, 高木賢太郎, 櫻井大地, 渡邊晴彦, 田中栄太郎, 田原健二
2. 発表標題 高分子フィラメントの大きな負の線膨張係数に関する研究
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tanaka, H. Watanabe, K. Takagi, K. Tahara, T. Irisawa, M. Shioya and E. Tanaka
2. 発表標題 Compact and low-noise actuator using highly twisted polymer fiber
3. 学会等名 第29回 日本MRS年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷崎 星斗, 高木 賢太郎, 九州大学 田原 健二, 舩屋 賢, 入澤 寿平, 塩谷 正俊, 産総研 安積 欣志
2. 発表標題 収縮型釣糸人工筋(TCPF) のヒステリシスを除去するためのトレーニング方法の考案
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 鴻多, 高木 賢太郎, 西安交通大学 朱 子才, 産総研 安積 欣志
2. 発表標題 IPMC センサ出力電流を予測する有限要素モデルのモデル低次元化について
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井 宏樹、高木 賢太郎、入澤 寿平、塩谷 正俊、舩屋 賢、田原 健二、渡邊 晴彦、櫻井 大地、産総研 安積 欣志
2. 発表標題 ねじり型釣糸人工筋 (TPF) のアキシャル方向の変形も考慮したモデル化に向けて
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ono, K. Masuya, K. Takagi, K. Tahara
2. 発表標題 Trajectory tracking of a one-DOF manipulator using multiple fishing line actuators by iterative learning control
3. 学会等名 IEEE RAS International Conference on Soft Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Masuya, S. Ono, K. Takagi, K. Tahara
2. 発表標題 Feedforward Control of Twisted and Coiled Polymer Actuator based on a Macroscopic Nonlinear Model Focusing on Energy
3. 学会等名 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tanizaki, K. Takagi, C. Oiwa, K. Masuya, K. Tahara, T. Irisawa, M. Shioya, K. Asaka
2. 発表標題 Experimental investigation of temperature-dependent hysteresis of fishing-line artificial muscle (twisted and coiled polymer fiber) actuator
3. 学会等名 SPIE Smart Structures/NDE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kondo, K. Takagi, Z. Zhu, K. Asaka
2. 発表標題 Finite difference method and finite element method for modeling IPMC sensor voltage
3. 学会等名 SPIE Smart Structures/NDE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤鴻多, 高木賢太郎, 武田惇, 朱子才, 安積欣志
2. 発表標題 有限差分法と有限要素法を用いたIPMCセンサ出力電圧モデルの比較
3. 学会等名 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 谷崎星斗, 大岩千隼, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 塩谷正俊, 安積欣志, 高木賢太郎
2. 発表標題 収縮型釣糸人工筋アクチュエータの温度・ひずみ履歴依存性について
3. 学会等名 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 近藤 鴻多, 高木 賢太郎, 朱 子才, 安積 欣志
2. 発表標題 有限要素法を用いたIPMC センサ出力電流のシミュレーション
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷崎 星斗, 高木 賢太郎, 大岩 千隼, 入澤 寿平, 塩谷 正俊, 舩屋 賢, 田原 健二, 安積欣志
2. 発表標題 釣糸人工筋アクチュエータの温度依存ひずみ履歴現象のモデル化に向けて
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大岩 千隼, 高木賢太郎, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 塩谷正俊, 山内拓磨, 田中順也, 渡邊晴彦, 田中栄太郎, 安積欣志
2. 発表標題 ねじり型釣糸人工筋の温度・トルク変換係数の現象論的モデル化についての研究
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Oiwa, K. Masuya, K. Tahara, T. Irisawa, M. Shioya, T. Yamauchi, E. Tanaka, K. Asaka, K. Takagi
2. 発表標題 Gray-box modeling and control of torsional fishing-line artificial muscle actuators
3. 学会等名 SPIE Smart Structures/NDE 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 舩屋 賢, 小野 秀, 高木 賢太郎, 田原 健二
2. 発表標題 温度の逆ダイナミクスをHammersteinモデルで近似した釣糸人工筋肉のフィードフォワード制御
3. 学会等名 第35回 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武田 惇, 高木賢太郎, 朱子才, 安積欣志
2. 発表標題 物理原理に基づくIPMCセンサの任意次数状態空間モデルを用いた高速シミュレーション
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大岩 千隼, 舩屋 賢, 田原 健二, 入澤 寿平, 安積 欣志, 高木 賢太郎
2. 発表標題 ねじり型釣糸人工筋アクチュエータのグレーボックスモデリング
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K. Takagi, N. Kamamichi, K. Masuya, K. Tahara, T. Irisawa, K. Asaka	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 581-596
3. 書名 Soft Actuators 2nd ed.: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives: Chapter 32: Modeling and Control of Fishing-Line/Sewing-Thread Artificial Muscles (Twisted and Coiled Polymer Fibers, TCPFs)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	入澤 寿平 (Irisawa Toshihira) (30737333)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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	井上 剛志 (Inoue Tsuyoshi) (70273258)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	田原 健二 (Tahara Kenji) (80392033)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	安積 欣志 (Asaka Kinji) (10184136)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・上級主任研究員 (82626)	2020年度より退職により研究分担者から研究協力者へ

	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
研究協力者	塩谷 正俊 (Shioya Masatoshi)	東京工業大学	
研究協力者	舛屋 賢 (Masuya Ken)	東京工業大学	
研究協力者	朱 子才 (Zhu Zicai)	西安交通大学	

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

中国	西安交通大学			
----	--------	--	--	--