

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00610

研究課題名（和文）確率モデルベース制御とセンサフィードバックの融合によるソフトロボティクス制御工学

研究課題名（英文）Soft Robotics Control Engineering by Combining Probabilistic Model-Based Control and Sensor Feedback

研究代表者

田原 健二（Tahara, Kenji）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：80392033

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,900,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトロボット制御体系構築を目的として、ナイロン系人工筋肉のモデル化および制御を行い、位置・力計測が困難である人工筋肉を、精度良く目標に収束させる手法を構築した。モデル化については、マイクロ・マクロ視点の両方からのアプローチを行い、それを用いた制御入力を構築した。また、センサレス制御を目的とした状態推定手法を提案し、それを用いたフィードバック制御によりセンサレス位置・力制御を実現した。

一方、ソフトロボット指のモデル化において、運動の揺らぎを実現するためにパラメータを確率変数としたモデル化を行い、実験によって分布を求め、それを用いたカルマンフィルターを構築してセンサレス指先角度推定手法を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ソフトロボティクスのモデル化・制御の体系化を目的とした研究成果であり、これまでモデル化や制御に対してほとんど手を着けられていなかったソフトロボティクス分野において、先鞭を付けた研究テーマであり、確率モデルの導入等、ソフトロボティクス特有の特性を取り入れることにより、バラツキを許容したモデル化および制御手法を構築することが可能となった。

今、モデル化や制御はまさにソフトロボティクスで最も注目を浴びる分野となりつつあり、今後益々発展していく分野である。これらの手法により制御性能が飛躍的に向上することで、産業界などでの実用化が飛躍的に高まることが期待される。

研究成果の概要（英文）：To establish a comprehensive control framework for soft robotics, this study focuses on the modeling and control of nylon artificial muscles. By addressing the challenge of accurate position and force measurement in artificial muscles, we developed a method to converge them precisely to the desired targets. The modeling approach integrates both micro and macro perspectives, and the derived models were utilized to construct control inputs. Additionally, we proposed a state estimation method aimed at sensorless control, which enabled sensorless position and force control through feedback mechanisms.

Furthermore, in modeling soft robotic fingers, we introduced a probabilistic parameterization to account for motion variability. Through experimental analysis, we determined the distribution of these parameters and developed a Kalman filter-based approach. This allowed for sensorless estimation of fingertip angles, thereby enhancing the control accuracy of soft robotic fingers.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ソフトロボティクス 人工筋肉 確率モデル 状態推定 モデル化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3Dプリンタの高機能化・低価格化により高分子柔軟材料の加工が容易になり、それらを利用したソフトロボティクスが注目されている。低コストで軽く柔らかく、機械・制御構造を簡便にできる可能性があり、学術的な注目だけでなく、工学応用についても研究が進められている。一方それらの制御では、二値制御など簡易な手法が用いられる場合が多い。それがメリットである一方で工学応用として十分とは言い難く、柔軟材料を活かした制御の体系的構築が重要となる。柔軟材料の特性は、熱などによる無視できない確率的変動を伴うため、制御系構築において考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、ソフトロボットをこれまで以上に精密に望み通り制御することを目的として、ソフトロボットが持つ曖昧さを確率的に表現した確率モデルベース制御と、従来の制御手法をベースとしたセンサーフィードバック制御の融合による、ソフトロボットシステム制御手法の体系的な構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、確率モデリングと最適化を用いた制御手法と、状態計測・推定による時間遅れやノイズに頑健なセンサーフィードバック制御手法を二つの柱として提案し、最終的に統合して一つのソフトロボティクス制御体系を構築する。得られる知見はソフトロボティクス制御の体系化に寄与するだけでなく、工学における柔軟材料の積極利用を加速させる効果が期待できる。具体的には、ソフトロボットのモデル化・制御のケーススタディとして、ナイロン糸人工筋肉アクチュエータの位置・力制御の実現、および柔軟高分子で構成されたロボット指のモデル化と制御について、確率的な手法を導入することで実現する。

4. 研究成果

- 柔軟な劣駆動多指ハンドロボットのモデル化として、まずは全体を質量、弾性、粘性の線形要素組み合わせた集中定数系として、複数のタイプのモデル化を試験的に行い、試作したグリッパにより同定試験によって複数モデルから最も近似精度が高い集中定数系モデルを構築した。また、制御手法として、センサを利用しない劣駆動柔軟ハンド用のワイヤ張力フィードフォワード制御を構築し、まずは構築したモデルを用いた数値シミュレーションによって、提案制御手法の有効性を確認した。その後、一本指柔軟グリッパを作成し、提案した制御手法を用いたワイヤ二本によるフィードフォワード姿勢制御を行い、提案手法により劣駆動グリッパの姿勢制御が行えることを実験により示した。
- ナイロン糸人工筋肉アクチュエータの拡張として、樹脂を用いた光ファイバーを人工筋肉として用いる手法を開発し、人工筋肉として収縮運動を取り出すと同時に、光センサとして筋肉の長さをセルフセンシング可能とする人工筋肉アクチュエータを課新たに開発し、その有効性を基礎実験により示した。
- ナイロン糸人工筋肉アクチュエータの可逆的な熱膨張/収縮モデルについて、ミクロな観点から構築した。これにより、ナイロン糸人工筋肉が除熱した際に何故元に戻るのかについて、その理由の解明に大きく前進した。
- 硬化阻害だけでなく、内部の骨格と外部のシリコンカバーを別々に製作して組み合わせる手法で柔軟指を作成する手法を確立し、その手法を用いて作成した柔軟指を2本用いて、物体把持を行う事に成功した。製作した指はそれぞれ3関節を拮抗筋2本で駆動する劣駆動指となっており、カメラを用いた角度計測による関節角度フィードバックを用いて、対象物を2本指でつまみ上げた。
- ヒトの手指構造を機械的に再現する場合、剛性材料(骨格)と柔軟材料(表皮)のハイブリッド構造が考えられるが、構造部品同士が摺動する際に、柔軟材料の凝着によるクーロン摩擦が力の伝達効率や制御性を低下させる問題がある。この問題に対して、表皮形成時に骨格との境界の適所に液状層を発生させることで凝着を抑制し、ロボット指の機能を向上させることに取り組んだ。
- ナイロン糸人工筋アクチュエータについて、最適な(変位量が最大となる)作製方法について検討を行い、ヒートセット前後に加える荷重の違いが、変形量に大きく寄与することを示した。これはこれまで知られておらず、またコイル形状の釣糸人工筋アクチュエータの動作メカニズムに迫るものである。
- 釣糸人工筋と誘電エラストマセンサの複合化について検討を行い、張力計測の可能性を示した。アクチュエータだけでなくセンサも含めてすべてが高分子でできた柔軟ロボットの実現に向けた初期的成果である。
- ナイロン糸人工筋肉アクチュエータなどの撚糸状高分子繊維の力学物性の発現機構について、撚糸にすることによる弾性率変化の挙動を幾何学的なモデルと実際の繊維の形状因子を用いて理論計算し、部分的定性的な機構を明らかにした。

- ナイロン系人工筋肉アクチュエータにおける，速度・温度依存性を考慮した電気的入力--温度に関する非線形モデルと，熱伝達係数の速度・温度依存性を考慮した，温度--変位に関する非線形モデルの組み合わせを制御対象として，目標値への局所漸近収束を保証する非線形制御系を構築した．
- ナイロン系人工筋肉アクチュエータの変位，速度に関する非線形オブザーバを構成し，温度情報のみから目標値への局所漸近収束を保証する非線形制御系を開発し，開発した制御系の理論的保証を与えた．
- ソフトアクチュエータのロボット応用に向けた運動増幅機構として，パンタグラフ機構を用いたひずみ・力増幅機構を開発した．
- ナイロン系人工筋肉アクチュエータの最適な作製方法に向けて作製条件が形状パラメータに与える影響を調査し，高速駆動に向けて共振の利用について一定の知見を示した．
ナイロン系人工筋肉アクチュエータの応用を目的として，柔軟外骨格を用いた手指の運動補助装具を開発した．
- 確率的な揺らぎを含むソフトロボット指モデルについて，確率モデルを基にした状態推定オブザーバを構築した．基本的にはカルマンフィルタをベースとしているが，ソフトロボットフィンガーの確率分布が正規分布ではなく対数正規分布であったことから，正規分布への変換を行うことでカルマンフィルタを適用可能な状態とし，それを基にカルマンフィルタを構築してセンサレスで指先角度の状態推定を実現した．モデルに確率的要素が含まれていることから，繰り返しの試行において，ある範囲内での推定が実現可能であることを数値的および実験的にしめした．さらに推定された状態を基にフィードバック制御を行ない，状態推定での誤差がそのまま定常偏差として残る形にはなったが，状態フィードバックが可能なことを示した．
- 樹脂の光ファイバーをセンサかつアクチュエータとして利用する人工筋肉アクチュエータを開発し，光ファイバーの計測光量と温度計測値，荷重の情報から変位推定を行う手法を構築した．
- 波形状に成形した光ファイバーを用いた伸長・屈曲センサを開発し，波形状部における光ファイバの曲げ半径が伸長に伴って変化することで，伸長を計測できること，および光ファイバを2層構造にすることで屈曲の計測が行えることを示した．
- ナイロン系人工筋肉のモデル化において，温度に加法的に正規白色雑音が印可される設定の下で確率微分方程式モデルを構築し，非線形オブザーバを利用した温度制御を実装してその有効性を示した．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Shoki Tsuboi, Hikaru Arita, Hitoshi Kino, Kenji Tahara	4. 巻 37
2. 論文標題 Variable end-point viscoelasticity control for a musculoskeletal redundant arm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1128-1141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2023.2239880	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 Ha Thang Long Doan, Hikaru Arita, Kenji Tahara	4. 巻 11
2. 論文標題 Tactile sensor-less fingertip contact detection and force estimation for stable grasping with an under-actuated hand	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-024-00273-3	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 Sumitaka Honji, Hikaru Arita, Kenji Tahara	4. 巻 37
2. 論文標題 Stochastic approach for modeling soft fingers with creep behavior	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1471-1484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2023.2279600	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 Ken Masuya, Kentaro Takagi, and Kenji Tahara	4. 巻 7
2. 論文標題 Wire-storage Pantograph Mechanism for Strain and Force Amplification of a Twisted and Coiled Polymer Fiber	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 11094-11101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3197268	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 Satoshi Hara, Akinori Tomoda, Hitoshi Kino	4. 巻 10
2. 論文標題 Improvement in rotational performance by periodic tensile change of a torque transmission wire: basic experimental verification using a single straight wire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 474-487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2060715	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 Yoshihiro Kinjo, Yuki Matsutani, Kenji Tahara, Hitoshi Kino	4. 巻 10
2. 論文標題 Basic study of sensorless path tracking control based on the musculoskeletal potential method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 10:3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-023-00242-2	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 D. Kimura, T. Irisawa, K. Takagi, K. Tahara, D. Sakurai, H. Watanabe, W. Takarada, M. Shioya	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
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Matsutani, Kenji Tahara, Hitoshi Kino	4. 巻 8
2. 論文標題 Simulation Evaluation for Methods Used to Determine Muscular Internal Force Based on Joint Stiffness Using Muscular Internal Force Feedforward Controller for Musculoskeletal System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 699792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2021.699792	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 Hitoshi Kino, Hiroaki Ochi, Kenji Tahara	4. 巻 33
2. 論文標題 Optimal Muscular Arrangement Using Genetic Algorithm for Musculoskeletal Potential Method with Muscle Viscosity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 619-628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p0619	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 木野仁	4. 巻 39
2. 論文標題 パラレルワイヤ駆動ロボットの力学と制御の基礎	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 811-814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.811	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, Kenji Tahara	4. 巻 6
2. 論文標題 Novel Twisted and Coiled Polymer Fiber Actuator Fabricated from Polymer-coated Optical Fiber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4883 ~ 4890
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3070247	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18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 入澤寿平
2. 発表標題 テニスラケットやアクチュエータへの応用を見据えた燃糸繊維の力学物性に関する研究
3. 学会等名 繊維学会東海支部若手繊維研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤蒼大, 東内裕武, 岡本岳人, 平良龍吾, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 高木賢太郎
2. 発表標題 共振を利用した釣糸人工筋の高速駆動について
3. 学会等名 ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤松駿, 岡本岳人, 東内裕武, 舩屋賢, 田原健二, 入澤寿平, 比留田稔樹, 高木賢太郎
2. 発表標題 釣糸人工筋とポリウレタン外骨格を用いた手背装着型指先補助装具の開発にむけて
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022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, 比留田稔樹, 高木賢太郎
2. 発表標題 釣糸人工筋肉の作製時荷重と駆動変位置の関係について
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤訓志
2. 発表標題 熱駆動釣糸アクチュエータの非線形オブザーバの設計と局所漸近安定化
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 舩屋 賢, 高木 賢太郎, 田原 健二
2. 発表標題 ワイヤ貯蔵型パンタグラフを用いた釣糸人工筋肉のひずみ・力増幅
3. 学会等名 ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 越智裕章, 木野仁, 永田寅臣
2. 発表標題 構造的特性に基づいて生成された筋入力パターンによるフィードバック位置決め制御
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tsuboi, H. Kino, and K. Tahara
2. 発表標題 End-Point stiffness and joint viscosity control of musculoskeletal robotic arm using muscle redundancy
3. 学会等名 IEEE/RSJ IROS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 壺井 翔貴, 木野 仁, 有田 輝, 田原 健二
2. 発表標題 筋骨格ロボットアームを用いた可変手先粘弾性楕円体による外力適応性の向上
3. 学会等名 RSJ2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 優太郎, 林 亮, 舩屋 賢, 高木 賢太郎, 有田 輝, 田原 健二
2. 発表標題 回転型釣糸人工筋肉アクチュエータの拮抗型合トルク制御
3. 学会等名 RSJ2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本司澄空、有田輝、田原健二
2. 発表標題 腱駆動ソフトフィンガの集中定数系モデル化とパラメータ推定手法
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤訓志
2. 発表標題 熱駆動釣糸アクチュエータの局所漸近安定化制御
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
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 SI2021
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 SI2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木野仁
2. 発表標題 ロボット工学からの筋骨格システム
3. 学会等名 第2回電気機器・パワーエレクトロニクス研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 舩屋 賢
2. 発表標題 高分子被膜付き光ファイバを用いた高分子繊維アクチュエータの開発
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 Ken Masuya and Kenji Tahara
2. 発表標題 Model-based control of a novel planar tendon-driven joint having a soft rolling constraint on a plane
3. 学会等名 The 2020 IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎 政仁, 田原 健二
2. 発表標題 釣糸人工筋肉を用いた多関節ロボット指の姿勢制御
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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)	岐阜大学・工学部・准教授 (13701)	
研究分担者	木野 仁 (Kino Hitoshi) (50293816)	中京大学・工学部・教授 (33908)	
研究分担者	高木 賢太郎 (Takagi Kentaro) (60392007)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13904)	
研究分担者	佐藤 訓志 (Sato Satoshi) (60533643)	大阪大学・大学院工学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	舛屋 賢 (Masuya Ken) (60796358)	宮崎大学・工学部・准教授 (17601)	

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