

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04401

研究課題名（和文）全身の剛性と感度を可変のロボットの開発

研究課題名（英文）Development of robot for which all body parts have variable stiffness and sensitivity

研究代表者

高嶋 一登（Takashima, Kazuto）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号：30435656

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、研究代表者が開発してきた形状記憶ポリマー（SMP）の温度による剛性変化を利用したロボットアームを発展させ、SMP以外の可変剛性手法の追加や、別の要素技術へのさらなる応用により、全身の剛性と感度を可変のロボットの開発を目指した。SMPを用いた人工筋肉、触覚・力覚センサは、構造変更・精度向上・小型化をした。また、ジャミング転移現象、形状記憶合金を利用したリンクや力覚センサを新たに開発した。さらに、個別に開発した要素技術を組み合わせたロボットアームの動作を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットが柔軟だけでなく、人間より優れた剛性・感度可変の要素を持つことは、これまでのロボットにはできなかった人間以上の巧みな動きを実現するための基盤となる。そのため、剛性・感度可変のロボットは、「ソフトロボット」の次のトレンドになり得る。また、全身に拡張することで介護・福祉・産業・医療などさまざまな環境で活用できるロボットのプラットフォーム・基盤技術を創造できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a robot for which all body parts have variable stiffness and sensitivity. This robot is based on our previously developed robot arm with variable stiffness and sensitivity, which utilized the stiffness change of a shape-memory polymer based on the temperature. In this study, we improved and miniaturized shape-memory polymer parts such as artificial muscles and force and tactile sensors. Furthermore, we developed parts such as links and force sensors that utilize the jamming transition phenomenon and a shape-memory alloy. We constructed prototypes of the proposed robot arms and evaluated their performance.

研究分野：ロボット工学、医工学

キーワード：ロボティクス 可変剛性 形状記憶ポリマー ジャミング転移 形状記憶合金 人工筋肉 力覚センサ 触覚センサ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、ロボティクス分野では柔らかいロボットを扱う「ソフトロボティクス」が、国内外で注目を集めている。例えば、少子高齢化社会へと急激に進むなかで、ロボットは、介護・福祉などの分野にさまざまな形で適用され（医療福祉ロボットの国内市場は、2035年には8000億円以上と予想¹⁾）、従来の産業用ロボットと異なり、人と接したときのお互いの損傷が少ないように、柔軟な関節や皮膚が必要とされる。

しかし、ロボットを柔らかくすると、動きの精度を上げることが難しくなり、大きな力を得ようとする、柔軟性が低下する。例えば、モータとギアの組み合わせだと、大きな力を出そうとすると、関節が硬くなってしまふ。一方、ロボットの皮膚を柔らかくした場合、容易に傷ついてしまふし、関節の位置決め精度、皮膚に搭載された触覚センサなどの測定精度が悪化してしまう。さらに、従来のように工場のみで使用される場合に比べ、幅広い環境で使用されるため、さまざまな外界情報の測定も必要であるが、従来のセンサのレンジ・感度はセンサ材料によって決まっており、センサ作製後に変更することはできない。すなわち、工場と日常生活で使用するロボットには求められる仕様が異なり、異なったロボット開発が必要であった。

そのような背景から研究代表者は、形状記憶ポリマー (SMP) のロボットへの応用を研究してきた²⁾。本研究で使用する SMP は、成型加工後に力を加えて変形しても、ガラス転移温度 (T_g) 以上に加熱すると元の形状に回復するポリマーである。さらに、SMP は室温付近に設定された T_g 以上に加熱すると弾性率が大きく変化し、約 100~1000 分の 1 になる (図 1)。研究代表者は、これまで温度によって材料の柔軟性が変化する SMP に電熱線を埋め込み温度制御することによって、柔軟性と感度可変の人工筋肉、皮膚、力覚センサ、関節、さらにはそれらを組み合わせたロボットアームを開発してきた。

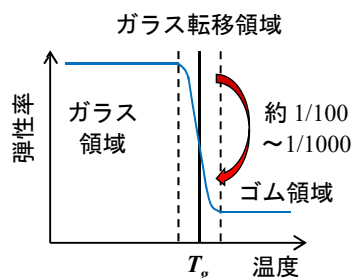


図 1 SMP の温度と弾性率の関係

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が開発してきた形状記憶ポリマー (SMP) の温度による剛性変化を利用したロボットアームを発展させ、SMP 以外の可変剛性手法の追加や、別の要素技術へのさらなる応用により、全身の剛性と感度を可変のロボット (図 2) を開発することである。特にロボットアームに注目し、開発したアームを用いて新しいロボットの動き・用途を提案・検証する。

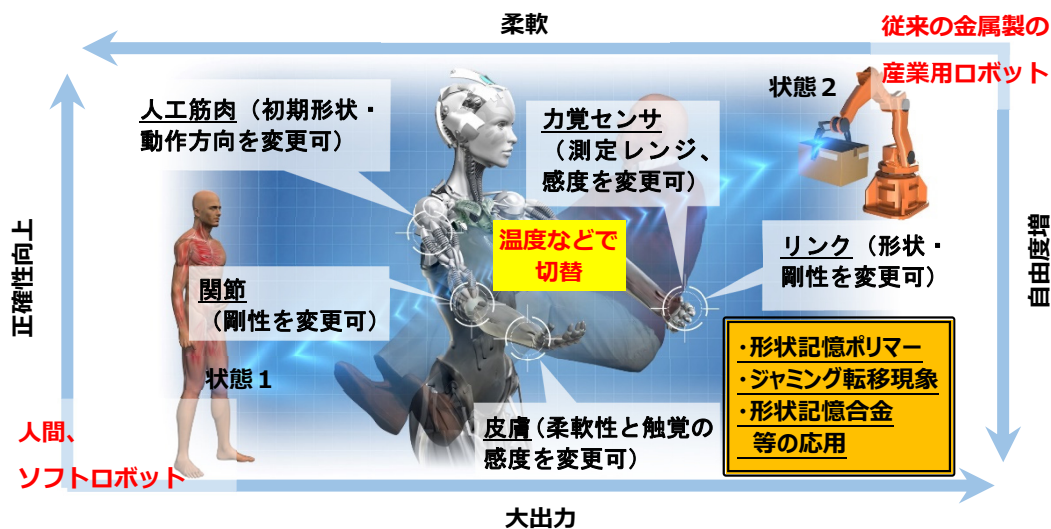


図 2 全身の柔軟性・感度可変のロボット (人間の柔軟性・多自由度と産業用ロボットの正確性・高剛性を自在に切替)

3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 項目を実施した。

(1) SMP を用いた要素技術の改良

これまで開発してきた個別の要素技術 (人工筋肉、皮膚、力覚センサ) の構造変更・精度向上・小型化などの改良をした。

(2) 新しい要素技術の開発

SMP 以外のジャミング転移現象、形状記憶合金 (SMA) などの可変剛性手法を用いた要素技術を開発した。また別の機械要素へも応用した。

(3) 個別に開発した要素技術を組み合わせたロボットアームの開発

(1)、(2) で開発した要素技術を組み合わせたアームを開発し、そのアームを用いて、ロボットの新しい動き・用途を提案・検証した。

4. 研究成果

(1) SMP を用いた要素技術の改良

① 人工筋肉

等張・等尺試験により SMP シートを用いた湾曲型空気圧ゴム人工筋肉の湾曲特性を調べた。従来の SMP を用いない人工筋肉と異なり、二方向に同等に力が発生可能であることが確認できた。

さらに SMP シートを分割してワイヤで繋ぎ、曲げやすい形状にすることによって、湾曲角度の増大を図った (図 3)。まず、作製したシートの引張試験や曲げ試験等を行い、機械的特性を評価した。さらに、実際に先行研究で作製した人工筋肉に貼り付けて評価し、湾曲角度が大きくなることを確認した。

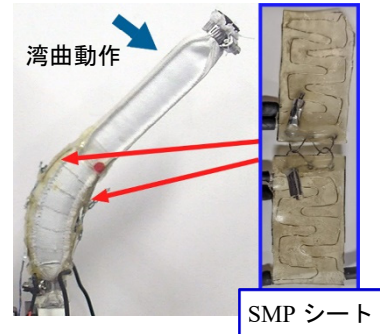


図 3 SMP を用いた人工筋肉

② ロボットの皮膚 (触覚センサ)

SMP シートを用いた皮膚 (触覚センサ) では、測定したい対象物の形状に応じて、センサ表面にセンシングしやすい形状を固定することが考えられる (図 4)。実際に表面に凹凸形状を固定することで、対象物をセンサ表面でなぞった際のセンサ出力の変化を確認できた。さらに、センサの実用化に向け、SMP シートの形状固定方法の改良や、SMP シートの厚さの影響の評価を行った。

③ 力覚センサ

SMP を用いた小型力覚センサ (図 5) では、ばねやダッシュポットの数を増やした粘弾性モデルを用いた伝達関数モデルを提案し、測定したひずみから正確な力を算出できた。さらに、実験方法やデータ処理方法、推定プログラムを改良し、適合率を上昇させた。

一方、片持ち梁構造に加え、両端固定梁構造の試作品についても評価し、どちらも温度によって感度や測定レンジを変更可能なことが分かった。

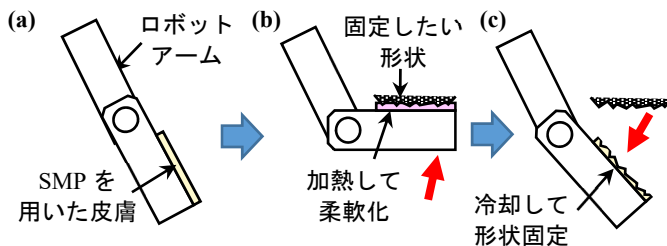


図 4 SMP シートを用いた皮膚

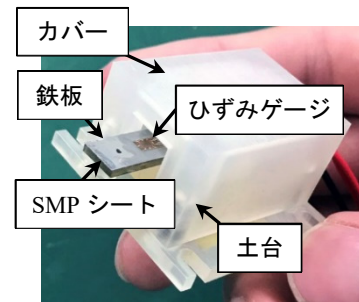


図 5 SMP を用いた力覚センサ

④ 電熱線埋め込み型 SMP シート

各要素技術には、加熱用の電熱線を埋め込んだ SMP シートを使用しているが、これまで手作業で行っていた電熱線の作製工程を数値制御加工に改良することで、電熱線間隔や加熱時の温度分布が均一になった。また、試作した SMP シートの引張・曲げ試験、さらに SMP シートを用いた人工筋肉、力覚センサを試作・評価した。

(2) 新しい要素技術の開発

これまで SMP を応用していなかったリンクにも SMP を応用した。その際、新たにジャミング転移現象を組み合わせ、可変剛性リンクを設計・作製した。さらに、SMP を SMA に置き換えた可変剛性リンクも設計・作製した (図 6)。2 種類の試

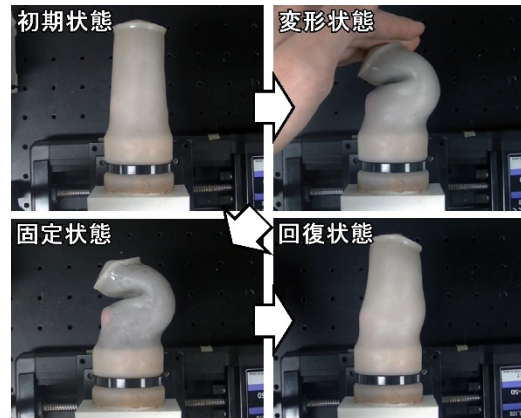


図 6 SMA とジャミング転移現象を用いた可変剛性リンク

作リンクの特性を評価し、提案したコンセプトの有効性を示せた。形状固定性能の評価実験では、長時間の負荷に耐えられることを示した。また、SMA を用いることで、SMP を用いた試作リンクと比べ、剛性、応答性ともに大幅に改善した。

さらに、構造変更により感度可変な力覚センサ (図 7) を新しく開発した。折り曲げなど構造変更によって、センサ先端に加えた力と検出されるひずみの関係が変更可能なことを示した。

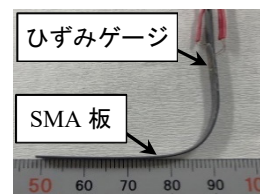


図 7 SMA を用いた構造変更により感度可変な力覚センサ

(3) 個別に開発した要素技術を組み合わせたロボットアームの開発

① 人工筋肉、皮膚、力覚センサを搭載したアーム

SMP を用いた人工筋肉、皮膚、力覚センサを搭載した人間の腕程度の大きさのロボットアームを作製し、動作を評価した (図 8)。人工筋肉を用いたロボットハンドをアーム先端に取り付け、物体の把持・持ち上げができた。皮膚を加熱することで上面に載せた物体に沿って変形し、さらに冷却することで、その物体を安定して保持できるように形状を固定できた。力覚センサによって、さまざまなゴムの圧縮剛性を計測できた。

② 可変剛性リンクを搭載したアーム

SMA ワイヤとジャミング転移現象を用いた可変剛性リンクをロボットアームに取り付け、ピックアンドプレース動作を評価した (図 9)。対象物の形状に応じてリンク形状を変更することによって、ピックアンドプレース時の位置決め精度の向上・可搬重量の増加を確認した。

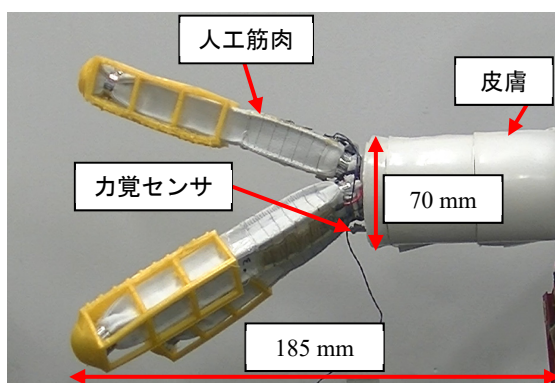


図 8 SMP を用いた人工筋肉、皮膚、力覚センサを搭載したアーム

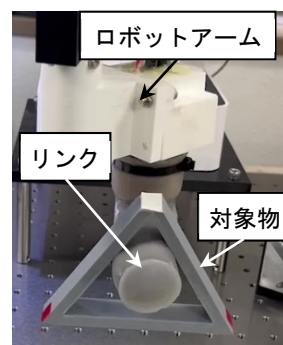


図 9 可変剛性リンクによるピックアンドプレース動作

研究期間全体の研究成果として、査読あり雑誌論文 6 件 (うちオープンアクセス 5 件)、学会発表 18 件 (うち国際学会 2 件、招待講演 3 件)、産業財産権 2 件など、「全身の剛性と感度を可変のロボット」実現のための技術を蓄積することができた。今後は、本研究をさらに発展させた基盤研究 (C) (研究課題名：全身の剛性と感度を可変のロボットの基盤技術の確立、課題番号：23K03760) を実施する予定である。

本研究の学際的な特色は、柔軟なだけでなく、その柔軟性を変えられるという点である。ロボットが人間より優れた柔軟性可変の要素を持つことは、ロボットが人間以上の巧みな動きを実現するための基盤となる。そのため、開発された剛性・感度可変のロボットは、「ソフトロボット」の次のトレンドになり得る。また、全身に拡張することで介護・福祉・産業・医療などさまざまな環境で活用できるロボットのプラットフォーム・基盤技術を創造できる。

<引用文献>

- 1) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0095A.html
- 2) 高嶋 一登：形状記憶ポリマーを用いた剛性と感度を可変のロボットアーム、計測と制御、第 59 巻、第 11 号、2020、pp. 847-851

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Takashima Kazuto, Okamura Yuta, Iwamoto Daiki, Noritsugu Toshiro, Mukai Toshiharu	4. 巻 35
2. 論文標題 Development of Pneumatic Artificial Rubber Muscle Using Segmented Shape-Memory Polymer Sheets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 113 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p0113	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 Takashima Kazuto, Ota Kengo, Cho Hiroki	4. 巻 23
2. 論文標題 Variable-Sensitivity Force Sensor Based on Structural Modification	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2077-1 ~ 2077-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23042077	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 Takashima Kazuto, Imazawa Toshiki, Cho Hiroki	4. 巻 34
2. 論文標題 Variable-Stiffness and Deformable Link Using Shape-Memory Material and Jamming Transition Phenomenon	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 466 ~ 477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0466	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 Takashima Kazuto, Kobuchi Jo, Kamamichi Norihiro, Takagi Kentaro, Mukai Toshiharu	4. 巻 8
2. 論文標題 Characterization of variable-sensitivity force sensor using stiffness change of shape-memory polymer based on temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 24-1 ~ 24-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-021-00210-8	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 Takashima Kazuto, Iwamoto Daiki, Oshiro Shun, Noritsugu Toshiro, Mukai Toshiharu	4. 巻 33
2. 論文標題 Characteristics of Pneumatic Artificial Rubber Muscle Using Two Shape-Memory Polymer Sheets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 653 ~ 664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p0653	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 高嶋 一登	4. 巻 59
2. 論文標題 形状記憶ポリマーを用いた剛性と感度を可変のロボットアーム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 847 ~ 851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.59.847	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 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた剛性と感度を可変のロボット
3. 学会等名 日本技術士会九州本部北九州地区 技術研修会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今澤 俊貴、高嶋 一登、長 弘基
2. 発表標題 形状記憶合金とジャミング転移現象を用いた可変剛性リンクの動作評価
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田 憲吾、高嶋 一登、長 弘基
2. 発表標題 構造変更により感度可変な力覚センサの研究
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口 太一、高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた力覚センサの構造改良
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村 裕太、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 空気圧ゴム人工筋に用いる電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートの構造改良
3. 学会等名 第23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 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今澤 俊貴、高嶋 一登、長 弘基
2. 発表標題 形状記憶合金とジャミング転移現象を用いた可変剛性リンクの特性評価
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashima Kazuto、Miyazaki Ryo、Mukai Toshiharu
2. 発表標題 Surface shape changeable tactile sensor using shape-memory polymer
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今澤 俊貴、高嶋 一登、長 弘基
2. 発表標題 形状記憶合金とジャミング転移現象を用いた可変剛性リンクの基礎検討
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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本 大輝、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 分割形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋の湾曲動作評価
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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小淵 稔、高嶋 一登、高木 賢太郎、釜道 紀浩、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた力覚センサのシステム同定法の改良
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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎 涼、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた形状変更可能な触覚センサの改良と評価
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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashima Kazuto
2. 発表標題 Soft actuators and sensors using shape-memory polymer
3. 学会等名 Recent Trends in Control System Engineering 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーのソフトアクチュエータへの応用
3. 学会等名 次世代アクチュエータ材料応用研究会 第4回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小淵 穰、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた小型力覚センサのパラメータ推定
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎 涼、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いた触覚センサの出力評価
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩本 大輝、高嶋 一登、則次 俊郎、向井 利春
2. 発表標題 複数枚の形状記憶ポリマーシートを用いた空気圧ゴム人工筋の特性評価
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今澤 俊貴、高嶋 一登
2. 発表標題 形状記憶ポリマーとジャミング転移現象を用いた可変剛性リンクの基礎検討
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 美貴、高嶋 一登、向井 利春
2. 発表標題 形状記憶ポリマーの温度による剛性変化を利用したロボットアームの動作評価
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 力センサ装置、力測定方法、ロードセル、ロボットハンドおよびロボットアーム	発明者 高嶋 一登	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-027370	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ロボット用構造体	発明者 高嶋 一登、今澤 俊貴	権利者 国立大学法人九 州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、2021-9698	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

九州工業大学大学院生命体工学研究科高嶋研究室ホームページ http://www.life.kyutech.ac.jp/~ktakashima/research/research.html

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

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