

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K19820

研究課題名（和文）液体金属流路による柔硬素材分離型コイル式触覚センサのアクチュエータ実装と評価

研究課題名（英文）Actuator Implementation and Evaluation of Soft Inductive Tactile Sensor with Liquid Metal Flow Channel

研究代表者

川節 拓実（Kawasetu, Takumi）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：70868330

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、やわらかさの異なるソフトアクチュエータと柔軟触覚センサ、両者が有する柔軟性を損なうことのない組み合わせ手法の実現を目指した。まずコイル式触覚センサの柔軟/硬質素材の分離構造を応用し、液体金属流路を備える触覚センサを開発、評価した。その結果、与えた接触力を、流路内の液体金属の変位として外部に設置したコイルのインダクタンスから推定できることを示し、またソフトアクチュエータと組み合わせてソフトグリッパを作成した。加えて、イオン液体を用いた触覚センサとソフトアクチュエータから成るソフトグリッパを提案し、複数の物体を把持させて得た触覚時系列情報から把持物体の識別が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトと共存するロボットへやわらかな身体を与えることは、本質的に安全なインタラクションを実現する上で、環境への多様な働きかけとそこから生まれる豊かな環境情報を得るために重要である。これまで多数の柔軟触覚センサが開発されてきたが、力検出箇所から硬さを取り除き、柔らかなアクチュエータと本来の柔らかさを損なわないように組み合わせることは困難であった。本提案では、力検出箇所には一切硬い素材を埋め込む必要が無く、柔らかな素材のみでセンサ及びアクチュエータを構成できる。この構造は、やわらかなロボットを実現する上で柔軟/硬質素材の構造的分離に極めて有用であり、本分野発展に資するものである。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to realize a method of combining soft actuators and flexible tactile sensors with different softnesses that does not compromise the softness of both. First, we developed and evaluated a soft tactile sensor equipped with a liquid metal flow channel by applying the separation structure of soft and hard materials of an inductive tactile sensor. As a result, we confirmed that the contact force can be estimated from the inductance of the coil installed outside as the displacement of the liquid metal in the flow channel. In addition, we proposed a soft gripper consisting of an ionic liquid tactile sensor and a soft actuator, and showed that the gripped objects can be classified from the tactile time series information obtained by grasping multiple objects.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：柔軟触覚センサ ソフトアクチュエータ ソフトロボット 液体金属 イオン液体 ソフトグリッパ  
物体認識

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。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットの身体をやわらかくすることで、本質的に安全な接触インタラクションを実現でき、また高度な制御をせずとも環境に高い適応性を示す、やわらかいロボットに着目したソフトロボティクスが注目されている。これまでにやわらかなセンサ、やわらかなアクチュエータ、そしてやわらかなロボットが数多く提案されてきた。例えば空気圧ソフトアクチュエータを組み合わせることでソフトハンドを構成した場合、接触力を調整せずともそのハンドのやわらかさがなじみや逃げを生み精緻な位置決めや把持力の調整無しに、オープンループ制御で物体把持ができる。一方で、ロボットと環境の間で交わされる情報を取得することはより高度なタスクに取り組む場合重要となるため、やわらかな身体にセンサを埋め込むことはソフトロボティクスにおける大きな課題の一つである。

センサ埋め込みで生じるソフトロボティクスにおける極めて核心的な問いの一つは、剛性、伸縮性といったやわらかさが異なる素材同士を両者の特性を損なうことなく組み合わせることができるかどうかである。例えば、やわらかなゴムで構成されたソフトアクチュエータに、硬いセンサ素子や配線を埋め込んだ場合、ソフトアクチュエータ自身が本来持つやわらかさを阻害してしまう。また、埋め込まれたセンサ自身はやわらかな材料中で大変形を繰り返す内に材料から剥離しさらには破損する。一つの解決策として、単にセンサそのものを埋め込んだり貼り付けたりせずセンサとしての機能を柔軟素材に付与することができれば、柔軟素材・センサ両者の特性を損なうことなく組み合わせることができるのではないかと。

### 2. 研究の目的

やわらかさの異なるソフトアクチュエータと柔軟触覚センサ、両者の特性を損なうことの無い組み合わせ手法の実現を目指し、コイル式触覚センサの柔軟/硬質素材の分離構造に着目した「液体金属流路を備える触覚センサ」を提案する。さらに空気圧ソフトアクチュエータへの提案センサ実装を試み、アクチュエーションとセンサ応答の関係性を評価する。また、構築したセンサ・アクチュエータを用いて触覚情報を用いた実応用タスクに取り組み、やわらかさがもたらす複雑な触覚時系列情報の活用手法について議論する。

### 3. 研究の方法

コイルと液体金属流路を用いて柔軟素材に硬質素材の実装が必要ない触覚センサを考案して実装、その応答特性を実験的に明らかにし空気圧ソフトアクチュエータにセンサを実装する。これらの実現のため、研究期間内に以下を実施した。

1. 液体金属流路を備えるコイル式触覚センサの構造パラメータの違いによる接触力への応答特性変化を明らかにする。
2. 屈曲や伸縮といったセンサ自体が柔軟であることに起因するセンサ変形への応答特性を明らかにする。
3. 空気圧ソフトアクチュエータへセンサを組み込むためのセンサ構造パラメータの決定と、アクチュエーションがセンサ応答に与える影響を実験的に明らかにする。
4. 上記によって構成したアクチュエータを用いて、ソフトロボットハンドを構築し触覚情報を用いた物体把持性能を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 液体金属流路を用いた触覚センサの提案と応答特性の測定、およびアクチュエータ実装

提案する液体金属流路を埋め込んだ触覚センサを図 1 左に示す。提案センサは液体金属を埋め込んだシリコンゴムおよび測定用コイルから構成される。液体金属は流路形状に埋め込まれており、接触部の円形の液だまりとコイル上部にある検出部の半円型の液だまりを直線的な流路で結んだ形状である。この構造において、接触部に力を与えると液体金属が検出部液だまりに向かって移動し、液だまりが膨張する。その結果、上面から見た際にコイルを覆う検出部液だまりの面積が増加する。ここでコイルは渦電流効果を用いてコイル周辺の金属量をインダクタンスの値で測定できるため、インダクタンス変化から検出部液だまり付近の金属量変化、つまり接触力を推定できる。

この構造において、センサ応答特性は流路形状に依存する。そこで、液体金属の流路構造パラメータとセンサ応答特性との関係を明らかにするため、図 1 右のような流路形状を様々に変更した複数の試験片を作成した。ここでは接触部液だまりの直径および流路厚みを変化させ、その際の接触力や曲げに対するセンサ応答の変化を調査した。図 2 に示すように、接触力に対するセンサ応答は 3 軸ロボットステージを用いて定量的に測定し、曲げに対する応答は曲率の異なる治具を用意し、重力の影響を受ける方向と受けない方向の 2 条件で曲率に対するセンサ応答を測定した。

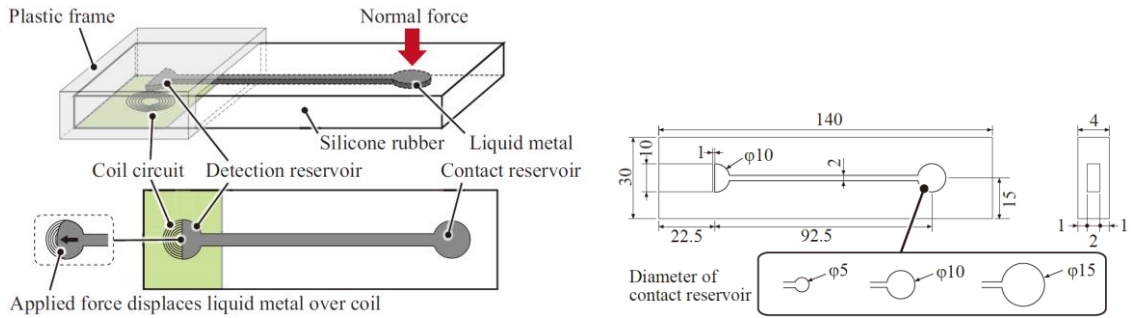


図1 提案センサの動作原理と作成したセンサの構造パラメータ

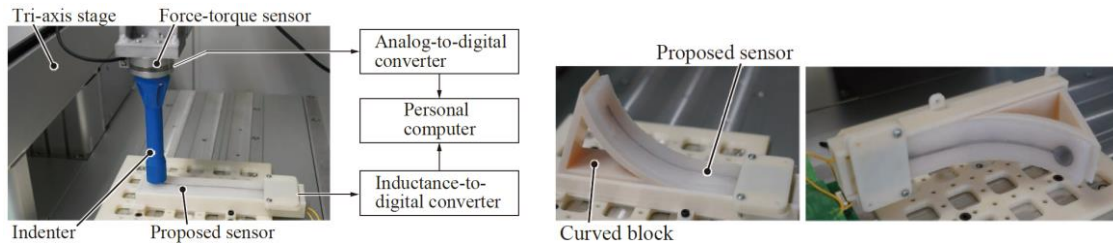


図2 実験環境。左が接触力に対するセンサ応答測定で、右が曲げに対する応答測定。

接触力に対するセンサ応答測定の結果を図3に示す。接触力に応じてインダクタンスが減少することがわかり、渦電流効果によって液体金属の変位から接触力を測定できることを確かめた。また、接触部液だまり直径の増加および流路厚みの増加につれてセンサの感度が増大する傾向を得た。これは接触により移動する液体金属の量が多くなるためであると考えられる。曲げに対する応答を図4に示す。この図からは流路厚みが増すにつれて曲げに対する感度が向上することが読み取れ、重力の影響を受けない方向ではほとんどセンサ値が変化しないことがわかる。これは重力に逆らう方向にセンサが変形した際、流路内部で液体金属が検出部液だまりに向かって移動するためである。従って、センサの感度を向上させるには移動する液体金属の量を増大するように流路構造を工夫すれば良いが、一方で曲げや重力によるセンサ値変動の感度も増大するため、単に接触力センサとしてのみ利用したい場合はトレードオフの関係にあることを確かめた。提案センサをソフトアクチュエータに埋め込む際、センサには接触力のみでなく曲げやその姿勢が様々に変化することが予想される。したがって、これらの影響を受けないセンサ構造を考案することや補正・キャリブレーション手法の構築が重要となる。

提案センサを空気圧曲げアクチュエータの表面に組み込み、接触力およびアクチュエータの変形（主に曲げや伸び）によってどのようにセンサが応答するかを確認した。図5に構築したセンサ・アクチュエータとその応答を示す。無負荷の状態からアクチュエータに空気を供給し、一定角度曲がった状態でセンサ表面に接触力を与えた。結果より、曲げによってセンサ値が徐々に変化し、接触力によって大きくセンサ値が変化することを確認した。以上の結果より、提案手法によってやわらかな素材に硬い素材を一切埋め込むこと無く、その変形や外力を測定可能なソフトアクチュエータが作成可能なことを確認した。

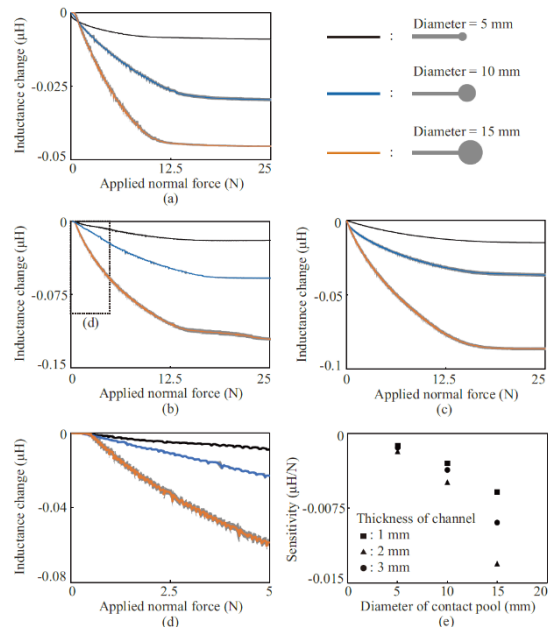


図3 接触力に対するセンサ応答。(a), (b), (c)は流路厚み1, 2, 3mmの応答。(d)は(b)の点線で囲った箇所の拡大図。(e)は初期感度の計算結果。

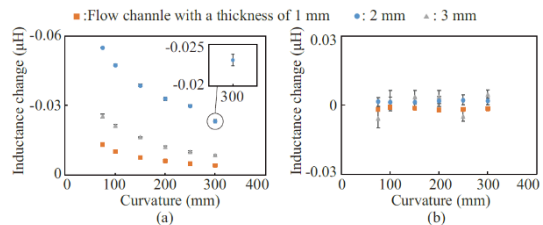


図4 曲げに対するセンサ応答。(a)は鉛直上方向、(b)は水平方向にセンサを曲げた際の応答。

硬いロボットにおいては、センサは通常単一の機械刺激（例えば接触力）に応答するように設計し、他の機械刺激によるクロストークは極力抑えていることが望ましい。一方で、今回の結果からもやわらかなセンサとやわらかなアクチュエータを組み合わせると、様々な機械刺激が重畳されることがわかる。これは硬いロボットの価値観においてはノイズとも見なすことができるが、一方でその情報には外力のみならずアクチュエータの姿勢や重力方向の向きなど様々な情報が複雑に重畳されているとも考えられる。この情報を活用することで、例えば把持物体などの識別といった物体把持タスクの性能向上を狙える可能性がある。

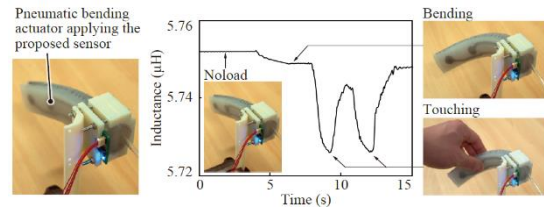


図 5 空気圧曲げアクチュエータへの実装例とそのセンサ応答。

(2) センサ埋め込みソフトグリップによる把持物体識別

上述したソフトセンサ・アクチュエータで測定される、様々な機械刺激が重畳された触覚時系列情報を活用するため、2指対向グリップを作成し把持物体の識別タスクを試みた。空気圧曲げアクチュエータにイオン液体を用いた柔軟触覚センサシートを貼り付け、前項と同様にやわらかさを損なわないセンサ・アクチュエータ構造を持つソフトグリップを試作した（図 6）。センサに加わった変形は、イオン液体のインピーダンス変化として測定できる。

図 7 に示す、形状やサイズが似通った身の回りにある様々な物体を 11 種類用意し、これらの物体をグリップで 3 回握った際の触覚時系列情報を 30 セット測定した。時系列情報の分類には時系列パターン認識に適した機械学習手法であるリザーブコンピューティングの一種として知られるエコステートネットワーク（以下、ESN）を利用した。ESN は、リカレントニューラルネットワークと同様に、入力層、リザバ、出力層の三層から構成されている。学習対象が出力結合重みのみであること、および学習アルゴリズムが勾配法より計算量の小さい線形学習器であることから、簡便で高速な学習が可能である。ESN の分類性能を評価するために、混同行列と正解率を用いた。目標出力を、11 個のクラスラベルを one-hot ベクトルとして表したものとする。各テストデータに対するモデル出力のうち、最大値をとる回数が最も多かった出力ノードのラベルを予測ラベルとして、目標出力のラベル（正解ラベル）と一致するかを調べた。正解率は、全試行の中で正しく分類された回数の割合を示している。

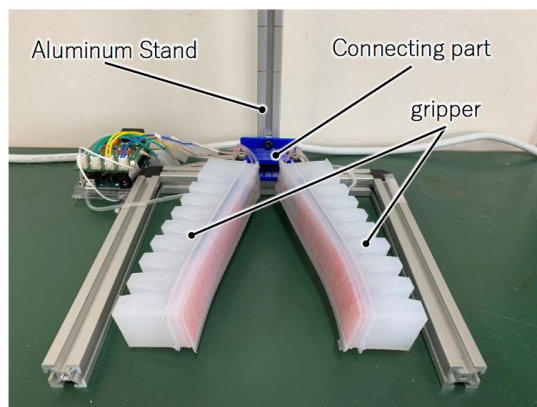


図 6 2指対向ソフトグリップ



図 7 把持物体

得られた時系列情報を ESN で識別した結果を示す。図 8 は、識別結果を混同行列としてヒートマップ表示したものである。縦軸は正解ラベル、横軸は予測ラベルである。グラフタイトルに全体の正解率を示している。行列の対角要素は、モデルが正しく分類できている場合に対応する。全体の正解率は 95.5% であり、センサアレイなどの従来手法と同程度の識別性能を実現した。一方で、四角柱や球など、形状が類似している物体に対して複数回誤認識していることが分かった。

以上より、やわらかなセンサ・アクチュエータから測定される様々な機械刺激が重畳され

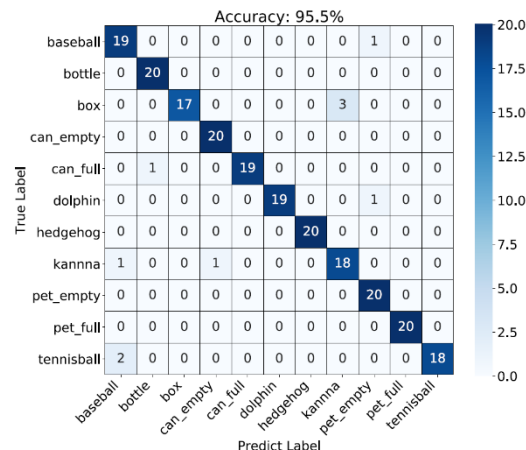


図 8 混同行列

た触覚時系列情報に基づき、把持物体の識別が可能であることを確かめた。提案手法では4つのセンサをグリップに埋め込んだのみであり、類似する形状の物体を高精度に識別可能なことが確かめられた。グリップが物体に接触した際に、グリップと物体の硬さの違い、物体形状などに応じて、グリップが十分やわらかいが故に様々な変形の様相を見せることが予想される。提案手法ではグリップのやわらかさを損なわずセンサ埋め込みが可能であるため、このやわらかさがもたらす複雑な触覚時系列情報を作り込みやすいことが期待できる。このように今後、埋め込むセンサの形状工夫やアクチュエータとの融合手法を作り込むことにより、やわらかさを活かして効果的に環境に働きかけ、環境情報を測定できるソフトロボットを構築できるだろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hamaguchi Shota, Kawasetsu Takumi, Horii Takato, Ishihara Hisashi, Niiyama Ryuma, Hosoda Koh, Asada Minoru	4. 巻 5
2. 論文標題 Soft Inductive Tactile Sensor Using Flow-Channel Enclosing Liquid Metal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4028 ~ 4034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.2985573	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 Usui Tatsuya, Ishizuka Hiroki, Kawasetsu Takumi, Hosoda Koh, Ikeda Sei, Oshiro Osamu	4. 巻 332
2. 論文標題 Soft capacitive tactile sensor using displacement of air?water interface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 113133 ~ 113133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2021.113133	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 川節拓実	4. 巻 72
2. 論文標題 磁性エラストマと液体金属を用いた弾性柔軟素材の触覚センサ化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 501 ~ 508
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hamaguchi Shota, Kawasetsu Takumi, Horii Takato, Ishihara Hisashi, Niiyama Ryuma, Hosoda Koh, Asada Minoru
2. 発表標題 Soft Inductive Tactile Sensor Using Flow-Channel Enclosing Liquid Metal
3. 学会等名 IEEE International Conference on Soft Robotics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Kawasetsu
2. 発表標題 Unconventional tactile sensors in soft robotics
3. 学会等名 ICRA2020 Workshop on “Unconventional Sensors in Robotics: Perception for Online Learning, Adaptive Behavior, and Cognition” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳野将士, 田中悠一朗, 川節拓実, 細田耕, 田向権
2. 発表標題 柔軟触覚センサを搭載したロボットハンドによる 触覚情報からの物体認識
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Usui, Hiroki Ishizuka, Takumi Kawasetsu, Koh Hosoda, Sei Ikeda, Osamu Oshiro
2. 発表標題 Soft Tactile Sensor Detecting Air-Water Interface
3. 学会等名 IEEE Sensors Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoshi Tokuno, Yuichiro Tanaka, Takumi Kawasetsu, Koh Hosoda, Hakaru Tamukoh
2. 発表標題 Object Recognition Using Flexible Tactile Sensor
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Kawasetsu
2. 発表標題 Soft inductive tactile sensor using liquid metal and coils
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Symbiotic Intelligent Systems: "A New Era towards Responsible Robotics and Innovation" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川節拓実
2. 発表標題 触覚センサから考えるソフトロボの未来 やわらかさと硬さを好いかげんにつなぐ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020 in Kanazawa シンポジウム「異分野融合で“いいかげん”を科学するソフトロボット学」 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Usui, H. Ishizuka, T. Kawasetsu, K.Hosoda, S. Ikeda, O. Oshiro
2. 発表標題 Soft Capacitive Tri-axis Tactile Sensor Based on Level Sensing
3. 学会等名 The European Japan Experts Association International Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳野将士, 田中悠一朗, 川節拓実, 細田耕, 田向権
2. 発表標題 柔軟接触センサを搭載したロボットハンドを用いたアクティブセンシングによる物体認識
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yi Zhang, Yuichiro Sueoka, Hisashi Ishihara, Takumi Kawasetsu, Koichi Osuka
2. 発表標題 A Decentralized Approach to Cooperative Object Transportation with Robots Equipped with Flexible Tactile Sensors
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小菅佑太, 川節拓実, 田向権, 細田耕
2. 発表標題 光学式触覚センサとエコステートネットワークによる物体認識
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 安田匠利, 大橋ひろ乃, 川節拓実, 細田耕
2. 発表標題 圧力と接触位置のためのイオンゲル触覚センサの開発
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

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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