

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01122

研究課題名(和文) イオン液体・イオンゲルを用いた生物型ソフトセンサ開発と多感覚モダリティ学習

研究課題名(英文) Bionic Soft Sensor using Ionic Liquid/Gel and Multi-modal Learning

研究代表者

細田 耕 (Hosoda, Koh)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：10252610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：柔らかい素材でできた指に、マイクロ流路を流れるイオン液体、またはプリントされたイオンゲルのネットワーク構造を作り、抵抗値やインピーダンスから流路変形の測定できることを示した。液体・ゲルと電極の間に電気的接続を安定的に確保する方法を提案した。また、複数の高分子素材を組み合わせることでダブルネットワークゲルを作製し、高強度化を図った。シリコンにより硬度の高いひげを埋め込み、流路変形を測定することで、外部との相互作用を測るひげセンサを開発した。また、異なる深さに埋め込まれた二本のチャネルを活用することで、外部力による圧力だけでなく、どのあたりを押しているかの推定ができることを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔らかいロボットの身体の内部に、イオン液体やイオンゲルのネットワーク構造を埋め込み、その抵抗値やインピーダンスから外部からの刺激を計測できれば、破断や故障に強いネットワークセンサを作ることができる。そのための基礎的工学的知見が多く集まっている。このような柔らかい身体の内部にセンサを埋め込むという考え方は、生物の神経ネットワークとの形状的な類似点があり、自己運動による刺激か、外部刺激かを区別することができないという本質的な問題点がある。このような人間の体性感覚を模したセンサを開発、運用することでロボットの新しいタイプの知覚だけでなく、人間の物体把持に関する新しい知見を見つけることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：outline of the research. We demonstrate that it is possible to measure channel deformation from resistance and impedance by creating a network structure of ionic liquid or printed ionic gel flowing in a microchannel in a soft finger. We propose a method to ensure a stable electrical connection between the liquid/gel and the electrode. We also fabricate a double-network gel by combining two types of polymeric materials to increase the strength of the gel. We develop a whisker sensor that measures the interaction with the outside by embedding a whisker in silicon and measuring the deformation of the channel. We show experimentally that by utilizing two channels embedded at different depths, it is possible to estimate not only the pressure caused by external forces but also the area where the pressure is pressing events.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ソフトセンサ 生物模倣 イオンゲル 多感覚モダリティ学習

### 1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットに代表されるような「硬い」ロボットが、社会のあちこちで活躍しているが、人間の器用さや適応性を実現するまでには至っていない。ロボットの絶対精度や再現性を向上しても、人間の作業能力には追いつかないのではないかと、という考え方が広まり、これを解決するための柔らかいロボット「ソフトロボティクス」に対する注目が大きくなってきている(2012年にはIEEEでTechnical Committeeが発足、2018年から国際会議IEEE Soft Roboticsが開始)。例えば、人間の器用な把持や操りを実現するために、ジャミングハンドや、3次元プリンタの技術を駆使した空気圧ハンドなど、柔らかいハンドが次々と開発されている(図1)。これらのソフトロボットの適応性は、機構的柔らかさだけに依拠しており、人間のようにセンサを用いた適応性は実現されていない。人間の手には、無数の受容器が備わっており、対象物の認識や安定な把持に役に立っている。ソフトロボットハンドを使うにあたって、大きく変形しても壊れず、安定な出力を出し、しかも故障しても適応して動き続けるためのセンサ技術が必要となる。

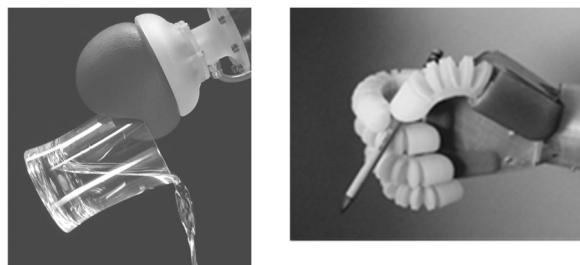


図1：ジャミングハンドと空気圧ハンド

そもそも人間が、多数の受容器を持つ柔らかい手で、どのように対象を認識し、なぜその形や柔らかさに対して適応的にふるまうことができるかは、未だに理解されておらず、それを工学的な技術で再現し、人間の操作能力に匹敵するロボットハンドを作ろうという試みもまた、未だに道半ばである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、柔らかい形質の内部でネットワーク構造を持ち、イオン液体・イオンゲルを媒体とした新しいタイプの触覚センサを開発し、その性能を評価すること、そして、限られた流路から得られる多感覚モダリティと視覚を組み合わせ、柔らかいハンドに、敏感である一方で頑健で、しかもこれまでのセンサでは獲得が難しかったすべり感覚などを学習させ、器用で適応的な把持・操りを実現することである。この研究は、人間がどのようにいろいろな皮膚感覚を学習できるのか、その感覚を利用して操りを実現できる機序を理解することにもつながる。

### 3. 研究の方法

#### (1) イオン液体・イオンゲルを用いたセンサの試作と評価

シリコンなどの柔らかい素材でできた指、あるいは掌部の内部に、マイクロ流路を流れるイオン液体、またはプリントされたイオンゲルのネットワーク構造を作る。流路の変形が、マイクロ流路やイオンゲルネットワークの抵抗値やインピーダンスの変化によって計測されるため、外部からロボットへの刺激の様子を観測できることが期待される。

#### (2) イオン液体・イオンゲルを用いたチャンネルの製法と性能評価

イオン液体を柔らかい形質内に形成されたチャンネルに封入する場合、チャンネルに力がかかって変形し、破断したとしても除荷されたときには元の形に戻ることができる。マイクロ流路やイオンゲルネットワークの抵抗値やインピーダンスを計測するためのピックアップは、単に計測のためのリード線を接続するだけでは、変形によって電気的接続が切れやすいという問題点がある。流体と電極の間に、電気的接続を確保する方法に工夫が必要である。

イオンゲルをチャンネルに封入する場合、まず流体を封入してから紫外線で硬化させたり、ゲルに近い状態で3次元プリントするなど製法を開発する必要がある。また、イオンゲルの場合、吸湿したり、圧縮力がかかることによる脆化が起こり、回路が断線する場合があります。このような脆化を防ぐ必要がある。

#### (3) イオン液体・イオンゲルを用いた多感覚モダリティの実現

回路の深さを変えたり、内部に分子の配向構造や秩序構造を入れることで、意図的に非線形な応答や周波数依存性などを組み込んだりすることで、異なるモダリティの観測が期待できる。

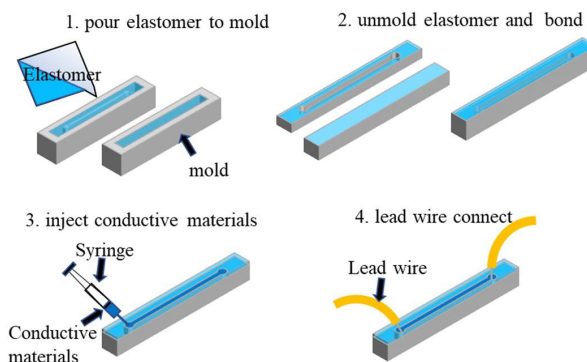


図2：【Hara20】センサの製法

### 4. 研究成果

#### (1) イオン液体・イオンゲルを用いたセ

## ンサの試作と評価

シリコンなどの柔らかい素材でできた指,あるいは掌部の内部に,マイクロ流路を流れるイオン液体,またはプリントされたイオンゲルのネットワーク構造を作る(図2は【Hara20】より引用).導電性のイオン液体,イオンゲルを用いると,抵抗値やインピーダンスを観測することによって,流路の変形を知ることができる【Hara20】【久木 22】【右田 22】.

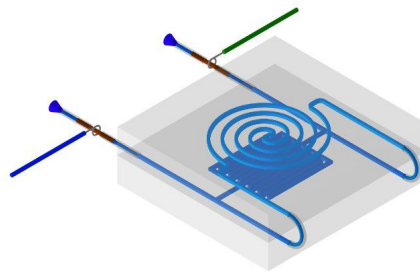


図3:【久木 22】複数の流路を持つセンサ

## (2) イオン液体・イオンゲルを用いたチャンネルの製法と性能評価

イオン液体を柔らかい形質内に形成されたチャンネルに封入する場合,チャンネルに力がかかって変形し,破断したとしても除荷されたときには元の形に戻ることができる.一方で液体と電極の間に,電気的接続を確保する方法に工夫が必要である【久木 22】【右田 22】.

イオンゲルをチャンネルに封入する場合,まず流体を封入してから紫外線で硬化させたり,ゲルに近い状態で3次元プリントするなど製法を開発する必要がある【安田 21】.また,イオンゲルの場合,吸湿したり,圧縮力がかかることによる脆化が起こり,回路が断線する可能性があるため,このような脆化を防ぐ必要がある.モノマー1,9-Nonanediol dimethacrylate(NDDA)とジメチルアクリルアミド(DMAAm)を組み合わせてダブルネットワークゲル(二種類の高分子ネットワーク)を作製し,高強度化を図った【三浦 22】.

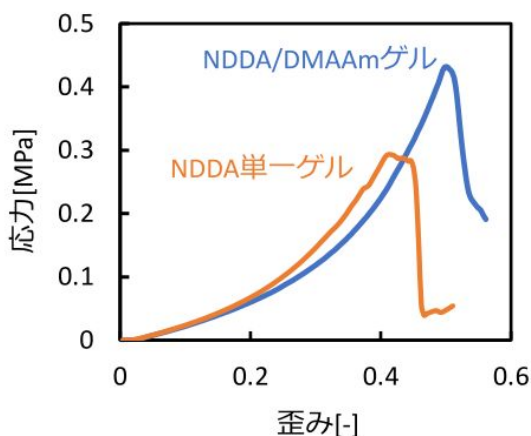


図4:【三浦 22】単一ゲルとダブルネットワークゲルの性能評価

## (3) イオン液体・イオンゲルを用いた多感覚モダリティの実現

チャンネルの深さを変えたり,シリコンに突起を埋め込むことで,イオン液体,イオンゲルの抵抗値という基本的に単純な観測値から,

異なるモダリティの観測が期待できる.シリコンにより硬度の高い「ひげ」を埋め込み,そのひげにかかる力によってシリコンが変形し,流路変形につながることで,外部との相互作用を測るひげセンサを開発し,壁沿い運動を実現した【鎌田 20】.異なる深さに埋め込まれた二本のチャンネルを活用することで,外部力による圧力だけでなく,どのあたりを押しているかの推定ができることを実験的に示した【Ohashi23】.

## (4) ソフト体性感覚受容の提案

柔らかい構造内にチャンネルを作って,イオン液体・イオンゲルを封入したソフトセンサは,外部からの力に応答して変形するだけでなく,ロボットの自己運動によっても変形,インピーダンスが変化する.したがって,使用する際には,その信号が外部刺激によるものか,自己運動によるものを区別して使う必要が生じる.このような性質は,人間の体性感覚と共通のものであり,ロボットに柔らかい身体を持たせることで,人間のような体性感覚を実現して,研究を進める必要性について講演【細田 20】、著書【細田 23】などで啓蒙活動している.

【鎌田 20】 鎌田直,大原賢一郎,原佑太,吉田一也,古川英光,細田耕,「イオンゲルひずみゲージを利用したヒゲセンサの開発」,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会,金沢,2020年6月

【細田 20】 細田耕,「ソフト体性感覚受容」,日本機械学会東北地区特別講演会,東北大学青葉山キャンパス,2020年2月

【Hara20】 Yuta Hara, Kazunari Yoshida, Ajit Khosla, Masaru Kawakami, Koh Hosoda, and Hidemitsu Furukawa, Very Wide Sensing Range and Hysteresis Behaviors of Tactile Sensor Developed by Embedding Soft Ionic Gels in Soft Silicone Elastomers, ECS J. Solid State Science and Technology 9(6), 061024, 2020.

【安田 21】 安田匠利,大橋ひろ乃,川節拓実,細田耕,「圧力と接触位置特定のためのイオンゲル触覚センサの開発」,1P1-J11, 2021

【久木 22】 久木佑真,川節拓実,大橋ひろ乃,細田耕,「3次元的な流路を有するイオン液体触覚センサの応答特性調査」,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会,札幌,2P1-007, 6月1-4日, 2022.

【右田 22】 右田浩基, 川節拓実, 細田耕, イオン液体センサを内蔵するソフトグリップを用いた時系列触覚情報に基づく物体識別, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 札幌, 2P1-008, 6月1-4日, 2022.

【三浦 22】 三浦天晴, 川節拓実, 細田耕, 古川英光, 吉田一也, “イオン液体含有ゲルの高強度化”, 化学工学会 第53回秋季大会, ポスター発表 PC328, 信州大学長野キャンパス(遠隔発表), 2022年9月16日.

【Ohashi23】 Ohashi, H., Yasuda, T., Kawasetsu, M., Hosoda, K., Soft Tactile Sensors Having Two Channels with Different Slopes for Contact Position and Pressure Estimation. IEEE Sensors Letters. <https://doi.org/10.1109/LENS.2023.3268888>

【細田 23】 柔らかいロボットと体性感覚, 月刊科学, 特集「構成論的手法による人間理解」, 岩波書店, 2023年1月.

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yamada Naoki, Ohashi Hirono, Umedachi Takuya, Shimizu Masahiro, Hosoda Koh, Shigaki Shunsuke	4. 巻 33
2. 論文標題 Dynamic Model Identification for Insect Electroantennogram with Printed Electrode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 4173 ~ 4173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2021.3116	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 Usui Tatsuya, Ishizuka Hiroki, Kawasetu 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 Hamaguchi Shota, Kawasetu 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 Takishima Yuki, Yoshida Kazunari, Khosla Ajit, Kawakami Masaru, Furukawa Hidemitsu	4. 巻 10
2. 論文標題 Fully 3D-Printed Hydrogel Actuator for Jellyfish Soft Robots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 037002 ~ 037002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2162-8777/abea5f	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 Hara Yuta, Yoshida Kazunari, Khosla Ajit, Kawakami Masaru, Hosoda Koh, Furukawa Hidemitsu	4. 巻 9
2. 論文標題 Very Wide Sensing Range and Hysteresis Behaviors of Tactile Sensor Developed by Embedding Soft Ionic Gels in Soft Silicone Elastomers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 061024 ~ 061024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2162-8777/aba913	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22件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 9件)

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 圧力と接触位置特定のためのイオンゲル触覚センサの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
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ーステートネットワークによる物体認識
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
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 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本雄紀, 石塚裕己, 川節拓実, 池田聖, 大城理
2. 発表標題 導電性流体を用いたソフトロボット選択システム
3. 学会等名 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 鎌田直, 大原賢一朗, 原祐太, 吉田一也, 古川英光, 細田耕
2. 発表標題 イオンゲルひずみゲージを利用したヒゲセンサの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
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 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 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 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Hamaguchi, Takumi Kawasetsu, Takato Horii, Hisashi Ishihara, Ryuma Niiyama, Koh Hosoda, and Minoru Asada
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 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Hara, Kazunari Yoshida, Kumkum Ahmed, Ajit Khosla, Masaru Kawakami, and Hidemitsu Furukawa
2. 発表標題 Development of Touch Sensor Using Ion Gel
3. 学会等名 36th ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原 祐太, 吉田 一也, Ahmed Kumkum, 川上 勝, 古川 英光
2. 発表標題 3次元造形可能ソフト材料を用いた接触センサーの開発
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 原 祐太, 吉田 一也, 大原賢一朗, 細田耕, 川上 勝, 古川 英光
2. 発表標題 3次元形状ソフト接触センサーの圧縮応答評価
3. 学会等名 日本機械学会東北支部 第55期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌田直, 大原賢一郎, 原佑太, 吉田一也, 古川英光, 細田耕
2. 発表標題 イオンゲルひずみゲージを利用したヒゲセンサの開発
3. 学会等名 本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuheii Ikemoto
2. 発表標題 Tactile Sensing based on Time Difference of Pressure Wave Arrival for Inflatable Robots
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 Koh Hosoda
2. 発表標題 Morphological Computation by Human-like Muscular-Skeletal Structure
3. 学会等名 RoboSoft 2019 Workshop on Morphological Computation Through Physical Adaptation of Soft Robots (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koh Hosoda
2. 発表標題 Dynamic Locomotion with Compliant Muscular-Skeletal Structure
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koh Hosoda
2. 発表標題 Object Categorization by Haptic Exploration
3. 学会等名 京都大学RMS研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koh Hosoda
2. 発表標題 Soft Body as Source of Ingelligence
3. 学会等名 Living Machines Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koh Hosoda
2. 発表標題 Soft Humanoid Robotics
3. 学会等名 International Symposium on Machine Intelligence for Future Society 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細田 耕
2. 発表標題 柔らかヒューマノイド
3. 学会等名 日本ロボット学会ヒューマンセントリックロボティクス研究専門委員会 第十二回若手研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細田 耕
2. 発表標題 開かれた知能
3. 学会等名 日本ロボット学会開かれた知能研究専門委員会研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細田 耕
2. 発表標題 ソフト体性感覚受容
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門東北地区特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 細田 耕、株式会社アールティ	4. 発行年 2019年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 208
3. 書名 実践 ロボット制御	

〔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	川節 拓実  (Kawasetu Takumi)  (70868330)	大阪大学・基礎工学研究科・助教    (14401)	
研究分担者	吉田 一也  (Yoshida Kazunari)  (20814221)	山形大学・大学院理工学研究科・助教    (11501)	
研究分担者	古川 英光  (Furukawa Hidemitsu)  (50282827)	山形大学・大学院理工学研究科・教授    (11501)	
研究分担者	池本 周平  (Ikemoto Shuhei)  (00588353)	九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授    (17104)	

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