

令和 6 年 6 月 2 4 日現在

機関番号：3 1 3 0 3

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：1 8 K 0 4 2 5 6

研究課題名（和文）再構成可能な触覚センサシステムを用いた接触評価法の創成

研究課題名（英文）Creation of a Touch Evaluation Method by Using Configurable Tactile Sensor Systems

研究代表者

室山 真徳（Muroyama, Masanori）

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：8 0 4 0 4 0 6 0

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究により、MEMS-LSI集積化触覚センサの特性を十分引き出しつつ、耐故障性を向上させる被覆方法を開発した。具体的にはセンサダイアフラム上に硬い突起構造を付与し、周囲を柔らかい樹脂で覆うことで、直観に近い接触特性を得つつ力印加による損傷軽減が得られるようになった。さらにセンシング時にアクチュエーションと触覚LSIのコンフィギュレーションを調整することで接触対象物に対して多様な接触情報を取得し、これらの情報を利用して機械学習分類した結果、接触対象物の高精度な識別が可能となった。さらに、どのようなアクチュエーションを用いるとより識別精度が向上するかの指針をFEMシミュレーションにより得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は次のとおりである。これまで課題であった、表面がでこぼこしていたもの以外のつるつるとした表面を含む対象物の接触センシングを高精度に行うことが可能となった。さらに、提案するアクティブセンシングにより、同じシステム構成ながら、多様なセンサデータを取得でき、対象物との接触を多面的に解析・分類ができるようになった。次に、社会的意義は次のとおりである。人の直観に近い触感情報が得られるようになったことで、本触覚システムを搭載した次世代ロボットが、ヒトの代わりの仕事やヒトとのコミュニケーションをより自然かつ効率的に行うことができるようになる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a covering method to improve the fault tolerance of MEMS-LSI integrated tactile sensors while fully leveraging their characteristics. Specifically, by adding a hard boss structure on the sensor diaphragm and covering them with a soft resin, we achieved contact properties close to intuitive touch while reducing damage from force application. Furthermore, by adjusting the actuation and tactile LSI configuration during sensing, we obtained various contact information about the target object. Using this information for machine learning classification enabled highly accurate identification of contact objects. Additionally, FEM simulations provided guidelines on which actuation methods would further enhance identification accuracy.

研究分野：集積回路設計

キーワード：MEMS-LSI集積化触覚センサ センシング 触覚識別 触覚LSI 触覚センサの被覆 アクティブセンシング マルチモーダル触覚

1. 研究開始当初の背景

安全確保、対象物の認識、相手とのコミュニケーションを目的として、人の皮膚感覚は存在する。現在、このような皮膚感覚を人間支援ロボットや人と協調作業を想定した産業ロボットなど次世代のロボット（以降次世代ロボット）に搭載しようという研究が活発化している。また、VR（Virtual Reality：仮想現実）や遠隔手術などにおけるインタラクション分野においても皮膚感覚の情報取得とその再現が重要となる。しかし、人の皮膚感覚と同等のものを実現することは容易くなく、今までに実現できていない。人の皮膚のハードウェアは、複数のセンサ（感覚神経である自由神経終末と、対象の特徴を抽出する4種類の機械的受容器）から構成されており、各々のセンサで取得できる情報が異なること、皮膚の場所によって皮膚感覚の能力が異なること、多数のセンサを設置する必要があること、などが人工皮膚感覚センシング構築時には課題となる。次に、ソフトウェア的に見れば、これまでの経験データとハードウェアから得られた情報を基に脳での処理を行うことで、各人それぞれの感覚が生成されるという特徴がある。

2. 研究の目的

人の皮膚感覚は、触覚、圧覚、温覚、冷覚、痛覚の5つに分類できる。この感覚は、人の皮膚に存在する自由神経終末と機械的受容器からの反応情報を基に得られる。さらに、これを脳内の信号処理で複雑に組み合わせることで振動感、くすぐり感、しびれ感などが表現される。本研究では、皮膚感覚の基本となる触覚、圧覚、温覚、冷覚、痛覚の情報を数値化することを目指す。これまでも皮膚感覚に関する多くの研究が行われてきた。しかし、その精度が十分ではなかったり、要素の一部のみしか取得できなかったり、二次元空間での情報を取得できなかったり、と人と同等の皮膚感覚を実現するまでには至っていない。

人間の皮膚感覚と同等のものを実現するために、人の皮膚感覚に近いハードウェア構成にするのがよく、本研究では以下のシステム構成を用いている。

通信部：人の皮膚センサのデータ伝送方法には、閾値発火のイベントドリブン、徐々に発火の反応が遅くなる順応、の特徴がある。申請者らはこの仕組みを模した神経網型触覚センサネットワークシステムを実現した。ここで、実装上の観点から共通バスを用いたシリアル通信方法を採用して配線数を削減している。そのために、センサと信号処理・伝送処理 LSI が一体化となった集積化技術を実現し、人の配線方法とは異なるバス通信方式ながら、人の皮膚の応答と同等の通信性能を達成している。

センシング部：人間の皮膚感覚を分解すると、センシングすべき物理量は、力、振動、温度となる。申請者らは、これまでに専用 LSI（触覚 LSI と呼ぶ）と MEMS センサとの集積による 2.8mm 角の指先チップを開発し、3 軸の力、振動、温度を測定できることを実証している。

Kandel ら（Principles of Neural Science）によれば、人の指先はセンサの密度が高く感度が高いが測定範囲（ダイナミックレンジ）は小さく、背中や足裏はその逆の特性を持っている。開発した指先チップは共通バス通信のため、任意の個数・位置・密度での設置が可能であり、手や足裏などの特徴を模して実装できる。また、触覚 LSI には、センシングの種類、その感度、ダイナミックレンジを再構成できる仕組みを備えている。これらの仕組みも併せて利用し、人と同じような皮膚感覚を持つシステムを構成できる。人の指先・足裏などを模したハードウェアを作製し、さらに、ハードウェアを変えずに触覚 LSI の再構成可能機能を活用して構成情報を変化させ、様々な力の情報、振動や温度の情報を取得する（多重センシングと呼ぶ。申請者の発案である。）。

3. 研究の方法

(1) データの取得方法の開発：指先チップの配置や被覆方法などの構成を変え、人の手、足裏や背中などの皮膚の構成を模したハードウェアを試作し、そこからどのような情報が得られるのかを明らかにする。触覚 LSI には、システムパラメータを再構成できる機能があり、これによりセンシングの感度、応答速度、ダイナミックレンジ、発火の閾値、送信間隔、送信速度などを調整できる。また、接触対象物へのセンサの押し付け圧、角度や移動速度を変えることで得られる情報も変わるはずである。設定や動作状況を変えて多種類の情報を取得することを多重センシングと定義し、多重センシングにより多様な力情報、温度情報、振動情報を面分布で得ることができ、人の皮膚感覚の範囲の情報を得られる。

(2) データの構築・対象物分類法の開発：多重センシングによって得られたデータを取得し、そこから得られた情報を基に、接触対象物を分類する技術を開発する。

4. 研究成果

まず、関連プロジェクトにより製造した大量の集積化触覚センサ素子を用いてハードウェア作製に取り組んだ。この素子を搭載した PCB 基板上に、触覚センサのセンサ信号を効率よく取り、かつ保護をするための被覆方法の研究を行った。このとき2つの観点から被覆方法を検討し

た。(1) センサ部分にあたる箇所保護と力集中のための構造の検討, (2) センサモジュールシステムとしての保護の構造検討, である。(1) について説明する。MEMS と LSI を集積化したチップのサイズは $2.8\text{mm} \times 2.8\text{mm}$ 程度であり, その中心部分に約 $\phi 1200\text{ }\mu\text{m}$ 程度のセンシングダイアフラムとそのダイアフラム上に設置した $\phi 600\text{ }\mu\text{m}$ 程度の突起構造がある。突起部分の突出量は $150\text{ }\mu\text{m}$ 程度と多くないため, 接触対象物の形状や材質によってはうまくセンシングできない場合がある。この状況を解決するため, 突起上部にドーム形状のキャップを付けることとした。(2) については, ダイアフラムや突起を含めたセンサ部分を保護するため, 柔らかい樹脂による被覆を検討した。

指・足裏などに設置可能な安定動作する標準触覚センサモジュールのハードウェアを多数個製造した。このモジュール上に突起形成と保護を行ったが, 柔らかい突起/硬い保護, 硬い突起/柔らかい保護の組み合わせを試した(文献①)。詳細な実験の結果, 柔らかい樹脂保護ではセンサ特性に比較的大きなヒステリシスが見られ, 硬い樹脂保護では小さなヒステリシスだが力のダイナミックレンジが小さくなることが見いだされた。さらに, 硬い突起では正しく力がセンサダイアフラムに伝わることを判明したため, 硬い突起/柔らかい保護の組み合わせを採用した。これにより, 高精度かつ小さいヒステリシスでのセンシングと過負荷(特に大きなせん断力)に対して強い耐性を持つセンサデバイスを実現できた。また, ドーム状の突起の付与により, ダイアフラムの大きな位置特性(接触場所の依存性)を緩和し, 直観に近い接触特性を得られるようになった(図1左, 中)。

作製したセンサデバイス进行评估するため, 力印加に対する移動量ならびに力印加の量を精密に制御できるシステムを構築した。実験により, 提案する突起/保護構造によって, センサのヒステリシスが大幅に改善され(図1右), さらに力印加による損傷軽減にも大きな影響を与えることが判明した。

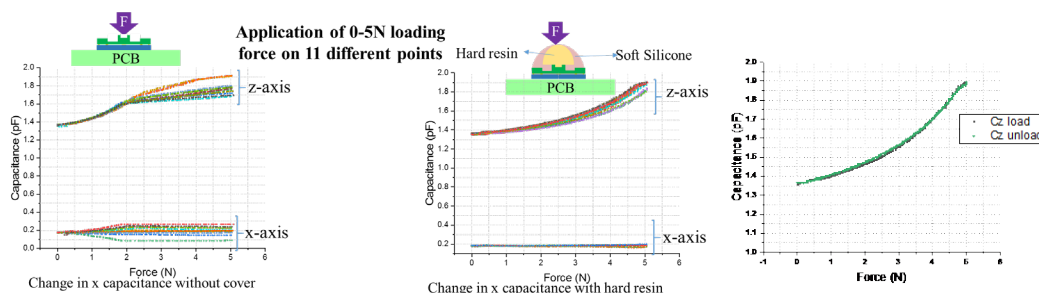


図1 接触場所の依存性 (左) 突起/保護なしの場合 (中) 突起/保護ありの場合, (右) ヒステリシス特性

その後, 本突起/保護構造を付与した触覚センサモジュールに対して, すべりの検出ならびに物体の識別が可能かどうかを実験した(文献②, ③)。すべりに対して, 物質の特性(硬さ, 表面の滑り具合)が異なるものを複数用意し, 初期状態では強めに把持し, 徐々に力を弱めていったときに, センサ出力がどのように変化するかを実験により調査した(図2)。その結果, 把持対象物の滑っている状態ならびに落下した状態を詳細に取得できることがわかった。くわえて, 滑り始める前に力の変化が出る場合があることも判明した。本結果を用いることで, ヒトが感じているように, そろそろ落ちそうだという感覚を本システムによって把握できるようになる可能性がある。これにより, 落とさず, 滑らせず, 把持対象物を安全かつ高速にハンドリングできる可能性があることを示せた。また, この際得られたデータを見ると把持対象物の表面形状に依存したデータ出力が出ており, 把持対象物のテクスチャ識別に利用できる可能性も示すことができた。

次に MEMS-LSI 集積化触覚センサと専用のアクチュエーションシステムを用いたアクティブセンシングシステムを構築した(文献④, ⑤)(図3)。アクチュエーション部分は XYZ および θ を精密の調整でき, 動作などを LabVIEW にてプログラミングできるようにした。また, センサシステムの方はロボット指の先に搭載し, 触覚 LSI のコンフィグレーション機能を利用して様々な状態で取得できるようにした。こちらも LabVIEW にてプログラミングした。このシステムを用い

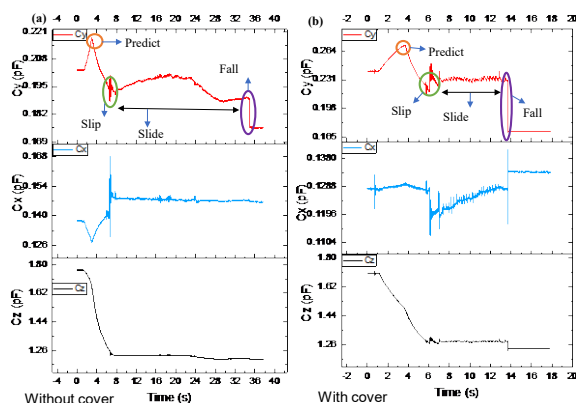


図2 保護なし (左) / なし (右) の各センサ軸の出力の時間変化例 (対象物は PTFE)

てヒトと同じような対象物を撫でる動作を実現した。アクチュエーションとコンフィグレーションを調整し、様々な条件でのアクティブセンシングを行った。複数のテクスチャの異なる対象物に対し、触覚センサ付きロボット指でなぞるときのセンシングデータを取得した。その中のひとつの対象物に対しては、表面に模様があり、アクティブセンシングの移動方向をもとのものとそこから 90° 回転したもののデータ取得も行った。このようにして、多様な時系列の 3 軸触覚センサ、温度データのデータセットを得た。具体的には、ポリエステル、アクリル、MDF、インシュレーションボード、メラミン、を対象物としてデータを取得した。これらのデータセットは機械学習で自動分類するため、時系列センシングデータの識別に適した RNN/LSTM による機械学習システムを構築した。隠れ層の活性化関数は LeakyRelu, 出力層の活性化関数は 5 種類分類の Softmax, 学習率 α は 0.1, 最適化アルゴリズムは Adam を用いた。このとき、ニューラルネットワーク層の構成は触覚センサデータに合わせて調整した。実験の結果、識別率は平均 83.3% となり、対象物の表面の種類だけでなくその向きの分類もできる可能性を示せた。

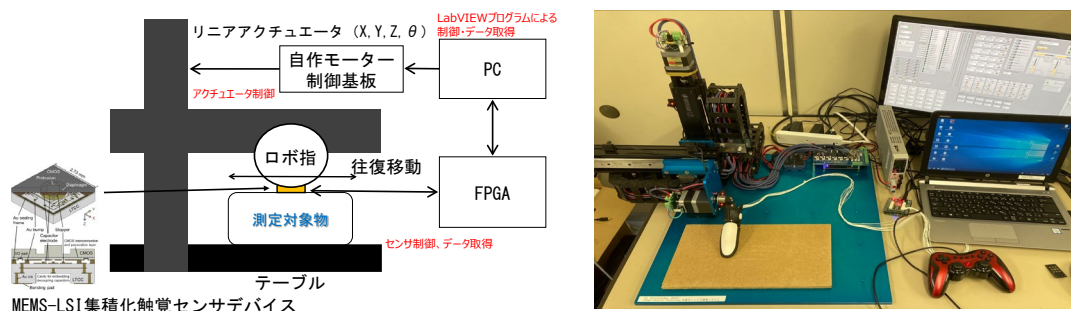


図3 アクティブセンシングシステム（右：概要，左：実機）

集積化触覚センサを FEM により解析し、アクチュエーションの方法によってどのようにセンサ出力が変動するかを研究し、対象物識別に適したアクチュエーションについての指針を得た（文献⑥）。具体的に記載する。まず、実際のデバイスの CAD データに厚み情報を付加し 3 次元モデルを作製した。デバイスには 3 軸の電極（X 軸：X1, X2, Y 軸：Y1, Y2, Z 軸：Z）があり、それぞれの電極と対向の GND 電極との間の静電容量の変化により力の変化をセンシングしている。シミュレーションでは図 4（上図）のように接触対象物に対して押し付け角度（ θ ）と印加力を変化させて、そのときの静電容量（印加なしの初期の容量との差）を得た。なお、接触対象物にはアルミ（AL）とポリウレタン（PU）を選択した。結果を図 4（下図）に示す。印加力が小さい場合、押し付け角度が小さい方が接触対象物の材料依存の静電容量の変化が大きいが、角度変化による感度も高い。なお、真上からの押し付けでは、ほとんど材料の差がでないため、真上での押し付けで得られたデータでは接触対象物の識別が難しいと考えられる。シングル値ではある程度差がみられた。差動（たとえば X1-X2）にすると接触対象物の材料の特性による影響が小さくなった。よって、シングル値を用いた方が、差が大きいため、識別には適していることが分かった。これらにより、力印加と押し付け角度を正確に制御し、小さい押し付け角度で各電極の静電容量データを取得することで、接触対象物の特徴を含んだセンシングデー

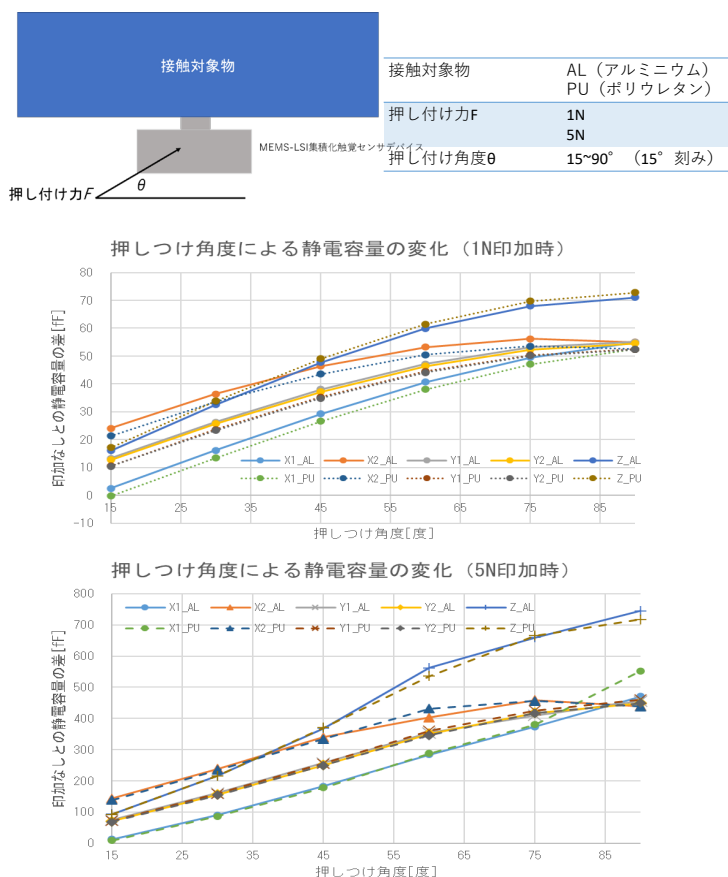


図4 FEM シミュレーションによる押し付け角度によるセンサ値の変動解析

タを得られることが判明した。

<引用文献>

- ① Sumeyya Javaid, Chenzhong Shao, Hideki Hirano, Masanori Muroyama, Shuji Tanaka, “Fabrication and Characterization of Surface Covering Structure with MEMS-CMOS Integrated Tactile Sensor toward Practical Robot Applications”, 令和2年度E部門総合研究会 MSS-20-25, 2020, 25-29.
- ② Sumeyya Javaid, 平野秀樹, 田中秀治, 室山真徳, “Slip Detection by MEMS-CMOS Integrated Tactile Sensor with Surface Covering Structure”, 第37回「センサ・マイクロマシンと応用」シンポジウム, 2020, 26P2-SS2-4/1-6.
- ③ Sumeyya Javaid, Hideki Hirano, Shuji Tanaka, Masanori Muroyama, “Surface Covering Structure and Active Sensing with MEMS-CMOS Integrated 3-Axis Tactile Sensors for Object Slip Detection and Texture Recognition”, The 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2021), 2021, 222-225.
- ④ Takao Saitou, Shuji Tanaka, Masanori Muroyama, “A Basic Study of Texture Classification by Active Sensing Using a MEMS-LSI Integrated Tactile Sensor”, The 13th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS, 2022, 1-2.
- ⑤ 齋藤昂生, 田中秀治, 室山真徳, “MEMS-LSI 集積化触覚センサを用いたアクティブセンシングによるテクスチャ分類に関する研究”, 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2022, 14P5-P-30/1-5.
- ⑥ 齋藤昂生, 室山真徳, “静電容量型センサを用いたテクスチャセンシングに関する一考察”, 令和5年東北地区若手研究者発表会, 2023, 351-352.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 室山真徳, 齋藤昂生, 佐々田一歩, 阿部樹, 赤間雅規, 小山颯太, 齋藤翔馬, 佐藤直之	4. 巻 35
2. 論文標題 遠隔ロボット操作技術のインタラクション性能向上に関する検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS	6. 最初と最後の頁 33-38
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 室山真徳, 小野寺充喜, 木村純, 高橋優樹, 西村健志, 齋藤昂生, 佐竹佑太	4. 巻 34
2. 論文標題 ニューノーマル時代のためのモーションインタフェースの研究開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS	6. 最初と最後の頁 1-9
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 室山真徳	4. 巻 12
2. 論文標題 エッジヘビーセンシングによる次世代の製造・生活スタイルの提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 820-828
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 室山真徳	4. 巻 Vol. 30, No. 1
2. 論文標題 MEMSとLSI技術によるエッジヘビーセンシング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 クリーンテクノロジー2020	6. 最初と最後の頁 58-63
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 室山真徳	4. 巻 Vol. 2
2. 論文標題 触覚センサーの開発で、ロボットの社会応用を実現する	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Top Researchers 2019	6. 最初と最後の頁 62-67
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8件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takao Saitou, Shuji Tanaka, and Masanori Muroyama
2. 発表標題 A Basic Study of Texture Classification by Active Sensing Using a MEMS-LSI Integrated Tactile Sensor
3. 学会等名 The 13th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤昂生、田中秀治、室山真徳
2. 発表標題 MEMS-LSI集積化触覚センサを用いたアクティブセンシングによるテクスチャ分類に関する研究
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤昂生、室山真徳
2. 発表標題 静電容量型センサを用いたテクスチャセンシングに関する一考察
3. 学会等名 令和5年東北地区若手研究者発表研究会
4. 発表年 2023年

1．発表者名 室山真徳
2．発表標題 MEMS-LSI集積化触覚センサネットワークシステムとエッジヘビーセンシングへの展開
3．学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会、センサ融合に向けたセンサ集積技術セッション（招待講演）
4．発表年 2021年

1．発表者名 Sumeyya Javaid, Chenzhong Shao, Hideki Hirano, Masanori Muroyama, Shuji Tanaka
2．発表標題 Fabrication and Characterization of Surface Covering Structures with MEMS-CMOS Integrated Tactile Sensor toward Practical Robot Applications
3．学会等名 令和2年度E部門総合研究会 MSS-20-25
4．発表年 2020年

1．発表者名 Slip Detection by MEMS-CMOS Integrated Tactile Sensor with Surface Covering Structure
2．発表標題 Javaid Sumeyya, 平野 栄樹, 田中 秀治, 室山 真徳
3．学会等名 第37回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4．発表年 2020年

1．発表者名 齋藤昂生, 田中秀治, 室山真徳
2．発表標題 集積化触覚センサを用いたアクティブセンシングによるテクスチャ識別の検討
3．学会等名 令和3年東北地区若手研究者発表会
4．発表年 2021年

1. 発表者名 Sumeyya Javaid, Hideki Hirano, Shuji Tanaka, Masanori Muroyama
2. 発表標題 Surface Covering Structure and Active Sensing with MEMS-CMOS Integrated 3-Axis Tactile Sensors for Object Slip Detection and Texture Recognition
3. 学会等名 THE 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID-STATE SENSORS, ACTUATORS AND MICROSYSTEMS (Transducers 2021) (国際学会)
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
---------	---------