

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01271

研究課題名（和文）先進内視鏡手術における執刀医のニーズに応えた「内視鏡知覚センシング技術」の開発

研究課題名（英文）Development of Endoscope Integrated Sensing Technology Demanded by Surgeon in Advanced Endoscopic Surgery

研究代表者

高尾 英邦（Hidekuni, Takao）

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：40314091

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,000,000円

研究成果の概要（和文）：低侵襲化と高度化が求められる内視鏡医療の発展に向けて、本研究では内視鏡下での手術において執刀医が求める様々な情報を治療器具上に集積したセンサで取得する「内視鏡知覚センシング技術」を開発した。執刀医がもつニーズを重視し、必要なセンシング機能だけを強化して実装する設計のアプローチをとることにより、非常に限られた医療機器先端部の空間においても高性能を発揮するセンサデバイスの開発に成功した。主要な成果として、消化器内科で用いる軟性内視鏡先端部において圧力・温度を同時かつ完全無線型でセンシングする技術や、消化器外科で用いる腹腔鏡鉗子の先端における臓器把持の滑りを高精度に知覚するセンシング技術を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超高感度・高解像力のセンサを核とする医師の感覚情報の計測器を初めて実装し、内視鏡医療を知覚的に計測可能とする新しい医療支援技術を実現した。「指先触診の感覚」や「圧力・温度などの体内環境」を手術環境下において低侵襲で計測できれば、より安全・正確な内視鏡治療が実現すると期待される。また、内視鏡器具の操作を履歴として記録可能となるため、「熟練医」と「研修医」の違いが明確となり、医師の技能向上と水準の維持に大きく役立つであろう。例えば「診て触る内視鏡」の実現で、今現在の世界最高水準の内視鏡手術が、10年後には平均的医師が実施可能になるなど、医療技術の進歩への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Low invasive medical surgery has been demanded for safer and effective medical treatment in near future. In this study, we have developed endoscope-integrated sensing technology demanded by surgeon in advanced endoscopic surgery. The most important point in the development was making limitation in integrated functions to reduce the chip size of sensor realizing the minimum foot print. A fully-wireless sensor with detection abilities of intra-pressure and temperature inside of patient body has been developed for flexible endoscopic surgery. Also, we have succeeded to develop slip sensing imager device which is mounted at the tip of medical forceps used for laparoscopic surgery.

研究分野：マイクロセンサ工学

キーワード：医療用マイクロセンサ 完全無線型センサ 内視鏡手術 触覚センサ 圧力センサ 温度センサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

先進治療である内視鏡手術においては、すべてに共通する課題として「触覚情報が欠如している、もしくは、診断に必要なだけの精度で触覚が得られない」という問題がある。今日最も普及する内視鏡手術は腹腔鏡手術であり、これに高精細な立体拡大視を備えて手術精度を高めたのが「da Vinci」などのロボット手術である。しかし、鉗子把持力を計測する間接的手法のため、精度に限界があるため実用には至っていない。また、正確な手術を行う上で、実際に内視鏡下で執刀医が強く必要としているのは「把持した臓器の横すべり」情報であるが、従来の機械的機構を用いた間接的触覚計測では、臓器の硬さや手触り、温度など、医師が触診で得ている多彩な触覚情報を把握できない状況にある。内視鏡下であっても「医師が手指で臓器に直接触れているような感覚の情報」を数値化して提供できるセンサ技術が求められているといえる。

マイクロセンサを用いた触覚の医療計測応用については、これまで「力覚」や「硬さ」などの「単機能」にとどまっている。さらに、消化管内は強酸性かつ強力な消化酵素で満たされており、これに暴露した状況で動作するデバイスは報告されていない。また、低侵襲医療で医師が必要とする感覚は触覚だけではない。表面からは見えにくい動脈位置の特定にむけた接触型温度センサ機能の搭載、硬さが幅広く変化するすい臓癌などにも適用可能な硬さ検知能の搭載などが内科・外科を問わず内視鏡医療の現場で求められており、非常に狭い空間でも多種多様な情報を知覚できるセンサによる新しい医療支援技術の開発が必要となっている。

2. 研究の目的

一層の低侵襲化と高度化が求められている内視鏡医療の発展に向けて、本研究では内視鏡下の手術において執刀医が求める様々な知覚情報を治療器具上に集積したセンサで取得・表示する「内視鏡知覚センシング技術」を開発し、医師が患者体内の状況や触診で得る情報を内視鏡下で取得しながら安全に手術を行なう「触診内視鏡手術」の実現に向けた異分野融合型研究を推進する。内視鏡下での「体内気圧」、「温度」、「臓器硬さ」、「臓器表面性状」を検出する集積型マイクロセンサを開発し、消化器内部の過酷な酸環境にも耐える状態で軟性内視鏡や手術鉗子上に装着する。動物実験等を通じて執刀医の経験や臨床学的知見を重視するニーズ指向型の開発を行うことにより、内科・外科を問わず内視鏡医療の手術現場で真に役立つ執刀支援技術の実現を目指す。

3. 研究の方法

近年、軟性内視鏡、いわゆる胃カメラを口などの自然開口部から挿入し治療を行う、NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery) が、従来のロボット内視鏡手術以上に侵襲性の低い治療技術として、注目を集めている。本研究では、内視鏡手術において医師が最も必要とする「手先や皮膚」の感覚を微小な空間で取得する集積型センサデバイスを実現し、手術器具に装着することで内視鏡下での体内モニタリングや診察が可能な「内視鏡知覚センシング技術」を実現する。低侵襲医療の現場にある真のニーズに応え、「医師が必要とする感覚」を補うための支援技術を構築する。軟性内視鏡や内視鏡手術鉗子などの医療機器先端部分に薄型センサを着脱可能とし、内視鏡手術のトレーニングや臓器実験、動物実験等の実証実験を通じて、情報充実化による手術時の精度・安全性の向上効果や、内視鏡手術執刀医のスキル・経験値向上の効果を数量的に検証する。

センシング技術の応用実証は、「消化器内科」と「消化器外科」の二分野で進める。「消化器内科」分野では、現在最も低侵襲かつ高難度とされる軟性内視鏡（胃カメラ）のみを用いる内視鏡手術で本技術を検証する。「消化器外科」では、現在最も普及する硬性内視鏡手術で用いる器具にセンサを着脱可能とし、内視鏡医のスキルアップトレーニングや腹腔鏡手術において使い捨て可能なセンサ部品を実現する。器具先端の「すべり」と「臓器硬さ検出」等が取得できるデバイス技術を開発し、臓器を操る感触を数値化するための「鉗子と臓器の相対関係」を計測するセンシング技術を確立する。

4. 研究成果

4-1 軟性内視鏡手術における送気圧・温度の同時モニタリングに向けた完全無線型センサ

4-1-1 必要性

NOTES では、治療時に視界確保などの目的で炭酸ガス送気を行うが、送気圧が不明であるために、過送気による後遺症などのリスクが存在している。また、送気や電気メスによる温度変化が不明なことで、治療時の理想温度である体温が維持できているか、確認が行えない。上記課題の解決に向けて、軟性内視鏡に装着する使い捨て部品であるフードに対して実装可能な圧力および温度センサの開発が求められている。フードは同一手術の際にも、目的に応じて付け替えるため、交換が容易な完全無線センサの実現が必要である。ロボット内視鏡手術などの、低侵襲治療応用を目指したセンサデバイスは、多く報告され、その有効性が示されているが、無線での信

号検出を実現した例は報告されていない。我々は、NOTES 応用に適した無線化手法として、軟性内視鏡に既存であるカメラより得られる画像から、情報を検出する、電源供給や配線を必要としない送気圧・温度のセンシングシステムを提案し、開発を行っている。提案しているセンサは、外部の空気圧のみではなく、温度に対する応答性も有しており、送気圧、体内温度の同時モニタリングが可能である。

4-1-2 開発したセンサデバイス

NOTES において、カメラによる完全無線構造で情報の検出を実現するには、構造色を有するセンサが必要である。図 1 は、NOTES 応用を実現するためのセンサ構造である。ダイヤモンド中央と、ガラス間のギャップ長は、送気圧または温度による内圧変化に伴い変化する。このギャップ長に対応した構造色をカメラで取得することで、圧力および温度の取得が可能となる。センサの構造色は、ギャップ長 d の 2 倍を光路差とした干渉によって発生し、中央のボス構造により均一な色を得られる。二次以降の反射光による干渉を無視すれば、最も強い反射強度が得られる波長は、光の入射角度を θ 、1 以上の任意の整数を m として、次式で計算できる。

$$\lambda = 2d \cos \theta / m \quad (1)$$

(1)式より、同じ波長 λ が強め合う d が複数存在することがわかる。各波長において同様のことが起こるため、ギャップ長の変化に対する構造色の変化は周期的なものとなる。実際の使用においては、この構造色変化の周期に対して、測定レンジを合わせて設計することで、単一の構造色に対して単一のギャップ長が決定できる。

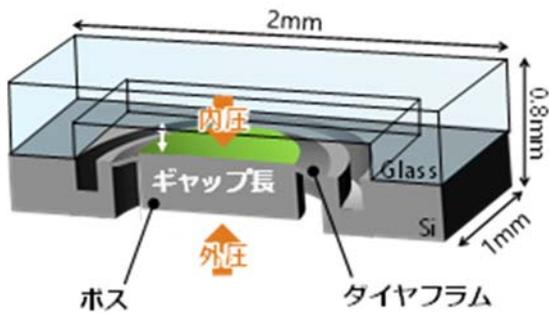


図 1. デバイス構造図



図 2. 製作したデバイス

センサは SOI による機械構造と、ギャップ形成用ガラスの陽極接合によって製作される。図 2 は、センサチップの写真であり、中央部に構造色の生成が確認できる。

4-1-3 センサデバイスの特性評価

製作したセンサは、温度および圧力が制御可能な恒温炉内に配置し、カメラで観察した。カメラで取得した画像からは、中央の構造色を有する領域の検出・構造色の数値化を行う。構造色の数値化に関しては、HSV 表色系の色相を用いた。色相は明度や彩度の影響を除いて評価可能である。また、色相は 360° 周期であり、角度が色に対応している。

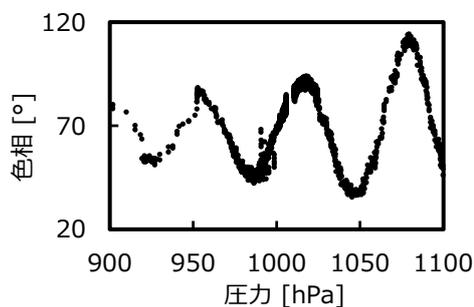


図 3. 圧力特性 (温度: 25 度)

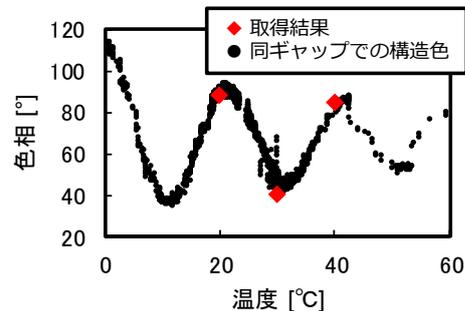


図 4. 温度特性 (圧力: 1006hPa)

まず、圧力応答の評価結果について示す。図 3 は、温度 25°C における圧力特性である。圧力に対して周期的に応答する本センサの原理通りの特性を確認できる。また周期については、およそ 50 hPa であり、この半分である 25 hPa が色相が計測範囲内で重複しないレンジとなる。続いて、温度に対する応答について評価を行った。図 4 は、同一チップにおける、圧力 1006 hPa における温度依存性を計測した結果である。図 4 における黒点は、同一ギャップにおける構造色の変化を、図 3 の結果から追記している。図 3、および図 4 の特性から、温度/圧力に対する応答性の比率は、 3.5 mmHg/K 、チャンバの初期内圧が 957 hPa であることが計算できる。

1000hPa, 25°Cを基準とすると、圧力感度は 1.2 degree/hPa, 温度感度は 4.2 degree/°C となる。圧力および温度の得率取得に向けては、内圧の異なるチップを2種類用いる必要がある。

4-1-4 軟性内視鏡下における圧力・温度センシング技術のまとめ

軟性内視鏡手術における送気圧・温度の同時モニタリング実現を目指して、完全無線型光学式センサを開発した。本センサは軟性内視鏡の先端に取り付けられる使い捨てカバーであるフードに実装される。センサは圧力や温度に対して応答する構造色を有しており、その構造色を軟性内視鏡に既存であるカメラで取得することで、電氣的、光学的な一切の配線や電源供給を不要とするデバイス技術の開発に成功した。試作したデバイスの特性評価結果から、NOTES 中の送気圧・温度の同時モニタリング実現に向けた展望を得た。

4-2 硬性内視鏡鉗子上における内臓器滑り速度検知を可能とするセンシングデバイス技術

4-2-1 必要性

低侵襲手術の1つである内視鏡手術は、モニタによる限定された視覚情報しか得られないといった極めて困難な状況下で行われるものである。内視鏡手術で扱う人間の臓器の多くは血や体液などの潤滑膜で覆われた低摩擦状態にある。さらに人間の消化器官壁は外層と内層に分かれており、腹腔鏡下の手術時に非常に滑りやすいことが問題になっている。ここで、この層の内側の滑りを「内部滑り」と呼ぶことにする。内視鏡手術においては、この内部滑りの発生や血や体液の層で覆われた臓器上での滑り発生が鉗子による臓器把持を困難とする主な原因であり、若手医師の技術習熟を難しくする原因となっている。よって、鉗子先端での滑り状態の定量的評価値は、執刀医の技量を数値化するために重要なパラメータの一つになり得ると考えられる。

これまでに、鉗子先端に触覚センサを搭載する様々な手法が提案され、試みられてきた。鉗子のハンドルにひずみゲージを搭載し力覚評価を行ったものでは把持力の評価によって熟練者の特徴をとらえているものの、把持部で実際に何が生じているかを知るすべはない。一方、把持部に触覚センサを搭載して触覚情報を得る試みも行われているが、生体組織の硬さ評価に留まっており、把持の滑り評価は実現されていない。

4-2-2 開発した滑り検知技術と独自の検出原理

本研究では、内視鏡鉗子先端に実装可能、かつ、荷重分布移動による滑りの様子をイメージング可能な MEMS センサを新規に開発し、把持の滑り状態を検出する独自アルゴリズムを適用して層間滑り位置の検知および血や体液によって低摩擦状態下にある組織の滑り位置の検知を実現した。臓器内部の滑りは血や体液を含んだ臓器の多層構造上で発生するので検出が非常に困難であり、従来の滑り覚の検出法とは違った新たなアルゴリズムが必要になる。我々は人間が指先で「ものを摘まむ」際の対象物体からの反力移動から新しい滑り検出アルゴリズムを着想した。指先は対象の滑りを、対象からの反力の「移動」によって認識していると考えられる。図5はアレイセンサ実装部の鉗子把持部における滑り検出の原理について説明している。ここで滑りを生じている内部層は、鉗子の把持角度が小さくなるにつれて右方向へと滑って移動しており、アレイセンサ上で荷重との釣り合いが取れる中心位置は移動してゆく。臓器を掴んだ際に滑りが発生していない状態では、検出される荷重分布において鉗子付け根部分近くにピークが現れる。内部に滑りが発生することにより、内層が少し移動して把持部の中心あたりに推移すると、反力である荷重の中心位置も鉗子先端方向へ移動する。この一連の動きは鉗子上に集積化された荷重分布センサによってイメージング可能である。

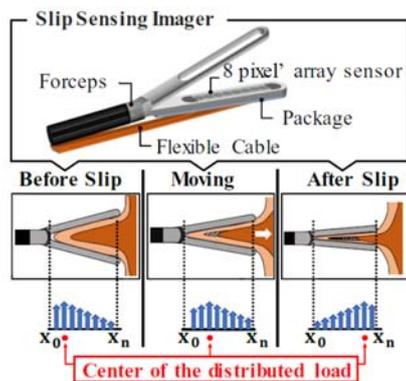


図5. 荷重分布に基づく把持物体の滑り検出

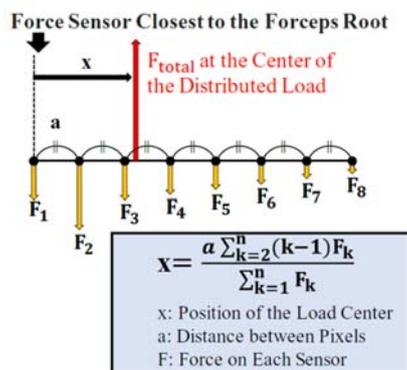


図6. 荷重分布の中心位置の算出方法

図6はセンサ上に現れる分布荷重の中心位置を計算し、滑り位置を算出する手法を示している。本原理では表面の摩擦が殆どない滑りやすい環境であっても対象の滑りを検知可能である。この点は、低摩擦状態下（極端に言えばゼロ摩擦状態下）においても対象の滑りを検知可能という点で、摩擦力の変化に基づく滑り検出方法に対して高い優位性を持っている。また、全てのセ

ンサが臓器表面に触れていない状態であっても分布荷重から滑りの状況を検出可能である。

4-2-3 開発したセンサデバイスと腹腔鏡鉗子への実装

本デバイスは支持基板厚さ $475\mu\text{m}$ 、活性層厚さ $20\mu\text{m}$ の n 型 SOI ウェハから製作された。ピエゾ抵抗はダイヤモンド膜上に形成されているため、接触子の変位を応力変化として信号検出可能である。完成した滑りセンシングデバイスのチップ写真を図 7 に示す。センシングデバイスを鉗子の把持部へとフィットさせるためには、実装用パッケージ構造が必要である。実装用パッケージ部品は 3DCAD によって設計され、3D プリンタで形成した。鉗子の裏面には配線を傷つけないための保護構造を同じく 3D プリンタによって設計、製作して取り付けている。図 8 は腹腔鏡鉗子把持部に実装されたデバイス全体の写真である。

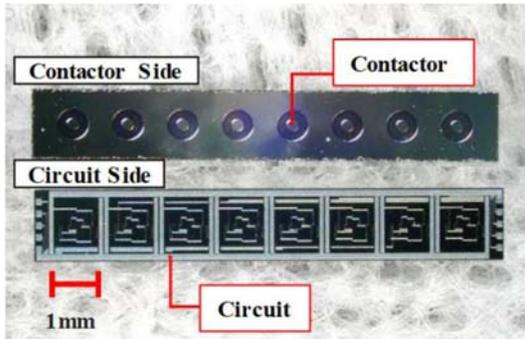


図 7. 滑りセンシングデバイスのチップ写真

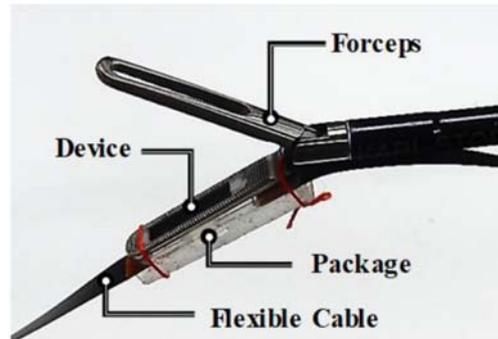


図 8. 荷重分布の中心位置の算出方法

4-2-4 模擬臓器を用いた腹腔鏡鉗子上での滑り検出評価

製作・実装されたイメージャーデバイスを用い、本研究の滑り検出アルゴリズムについて評価した。滑り検出の対象は人間の組織であり、それは高分子のゲルに似た特性を有する。よって、はじめにデバイス実装した鉗子を用いてゲルを把持する実験を行った（図 9）。把持する位置を変えた際の各画素での荷重のピーク推移を調べた。鉗子をゲルから離していくにつれて、強い荷重のピークが現れる画素が把持部先端の方に推移していく様子が確認できる。

さらに表面摩擦がほとんど生じない状態での滑り検知（内部滑り）の評価を実施した。模擬臓器をポリエチレンフィルムで包んだ状態で内部の模擬臓器の滑りが検知できれば、表面摩擦がゼロの状態でも滑り検知が可能であることを示すことができる。図 10 にフィルム内部の模擬臓器を用いた内部滑りの検知実験の様子と対応するセンサ出力変化を示す。滑り初期では鉗子把持部の根本付近の画素センサからピークとなる荷重が検出され、徐々に鉗子把持部の先端付近の画素センサにピークの荷重が現れる様子が確認できる。デバイス両端の距離は約 10mm となっており、層間滑り発生とともに分布荷重の中心位置が移動している。本デバイスによって、表面摩擦が極めて小さい場合においても把持対象の滑りを検知することに成功した。本研究の検出方法は、鉗子部先端の微小領域において低摩擦状態下での把持滑りを検出できる現状で唯一の方法である。ロボット手術を含む内視鏡把持鉗子のほか、工業ロボットへの応用も期待できる。

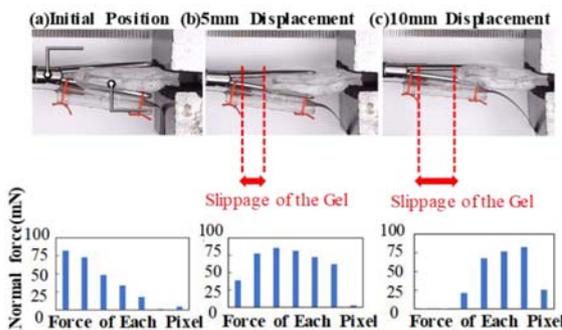


図 9. 模擬臓器把持と滑り検知の様子

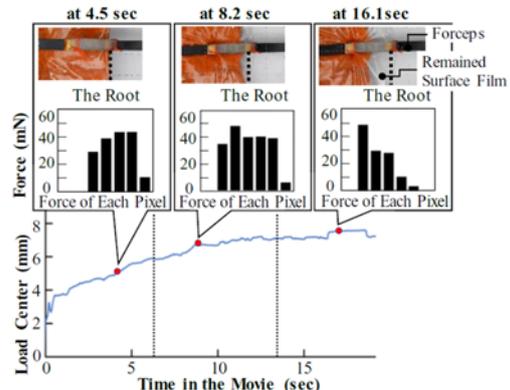


図 10. 多層臓器の内部滑りを捉える滑り検知

4-2-5 硬性内視鏡下における把持滑りセンシング技術のまとめ

本研究では、限定された視覚情報のみで行われる硬性内視鏡下手術において、人間の手指がもつ滑り感覚を有する新規のセンシングイメージャーを提案し、デバイスを製作して評価した。本研究独自の滑り検出アルゴリズムにより、荷重の中心位置移動によって滑り検出が可能であることを実証することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hdekuni Takao	4. 巻 Volume 58, Number 9
2. 論文標題 Planar-type MEMS tactile sensor integrating micro-macro detection function of fingertip to evaluate surface touch sensation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japaese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 pp097002-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ecj.12211	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 Koki Hamamoto, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao	4. 巻 Volume102, Issue10
2. 論文標題 A highly sensitive MEMS silicon-hair device reproducing the function of hair follicle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electronics Communication in Japan	6. 最初と最後の頁 pp50-56
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 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 Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao	4. 巻 Vol.32 No.2
2. 論文標題 A MEMS Tactile Sensor with Fingerprint-Like Array of Contactors for High Resolution Visualization of Surface Distribution of Tactile Information	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 pp. 305-314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p0305	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 Hidekuni Takao	4. 巻 Vol.97, No.5
2. 論文標題 Post-CMOS Compatible Silicon MEMS Nano-Tactile Sensor for Touch Feeling Discrimination of Materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 pp.79-90
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 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 Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 Simultaneous Measurement of surface Texture and Elasticity Using Tactile Sensor with Differently Protruded Contactor Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Digest of Technical Papers of The 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers2019)	6. 最初と最後の頁 pp.454-457
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 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 Tsubasa Nakashima, Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 A 0.1um-Resoution Silicon Tactile Sensor with Precisely Designed Piezoresitve Sensing Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Digest of Technical Papers of The 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers2019)	6. 最初と最後の頁 pp.1807-1810
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 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 Koki Hamamoto, Yusaku Maeda, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Fumikazu Oohira, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 Highly Sensitive Detection of Fine Electrostatic Attraction by Resonance-Driven Silicon-Hair	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Digest of Technical Papers of The 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers2019)	6. 最初と最後の頁 pp.1874-1877
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 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 Yuki Sakakihara, Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 Parylene-C Coating on High Resolution MEMS Tactile Sensor for Protection of Measurement Surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE Sensors 2019 conference	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) なし	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 Kanao Ando, Takashi Yamamoto, Yusaku Maeda, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Masao Fujiwara, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 Highly Sensitive Silicon Slip Sensing Imager for Forceps Grippers Used under Low Friction Condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Technical Digest of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM2019)	6. 最初と最後の頁 pp.422-425
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 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 Yusaku Maeda, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 Structural Color Based Tactile Sensor for Flexible Endoscopic Surgery to Detect Grab Stage and Organs Hardness	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2020)	6. 最初と最後の頁 pp.689-692
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 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 Nishida, Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Kazutami Arimoto, Hidekuni Takao	4. 巻 -
2. 論文標題 Touch Feeling Scanner for Quantitative Evaluation of Fingertip Sensation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2020)	6. 最初と最後の頁 pp.984-987
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 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 Yusaku Maeda; Hirohito Mori; Tomoaki Nakagawa; Hidekuni Takao	4. 巻 57
2. 論文標題 Fully wireless pressure sensor based on endoscopy images	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 4S-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.04FC05	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 高尾英邦; 森宏仁; 前田祐作; 綿谷一輝; 寺尾京平; 下川房男; 前田光平; 香西亮吾	4. 巻 J101-C
2. 論文標題 超低侵襲実装を志向する「細胞化センサ」デバイス	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 9-17
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 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41件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 高尾英邦
2. 発表標題 ナノスケール触覚センサを用いた「柔らかさ」の定量化
3. 学会等名 技術情報協会セミナー 柔らかさを感じるメカニズムと定量化技術 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidekuni Takao, Kazuki Watatani, Tsubasa Nakashima, Yoshihiro Nishida, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Yusaku Maeda
2. 発表標題 High Performance "Nano-Tactile" Sensors and Their Applications to Biomedical Engineering
3. 学会等名 International Conference on Complex Medical and Engineering(CME2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusaku Maeda, Mori Hirohito, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao
2. 発表標題 Fully wireless and multimodal sensing on flexible endoscopic surgery using structural color-based microsensor
3. 学会等名 International Conference on Complex Medical and Engineering(CME2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	Kanako Ando, Takashi Yamamoto, Yusaku Maeda, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Masao Fujiwara, Hidekuni Takao
2. 発表標題	Implementation and Evaluation of Highly Sensitive Silicon Slip Sensing Imager on Laparoscopic forceps
3. 学会等名	International Conference on Complex Medical and Engineering(CME2020) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Tomiyuki Furugaki, Tomoya Takata, Yoko Uwate, Yoshifumi Nishio, Hidekuni Takao
2. 発表標題	Performance of Neural Networks with Surrogate Data for Classifying time series data
3. 学会等名	令和2年度電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	岡早秀, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題	対象表面の角度検知が可能な傾斜センサ集積型 MEMS 触覚アンテナ
3. 学会等名	第12回「集積化MEMSシンポジウム」
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	植村周, 濱本晃輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題	MEMS シリコン毛デバイスを用いたスポット接触による局所触覚情報の取得
3. 学会等名	第12回「集積化MEMSシンポジウム」
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 安東伽奈子, 山本 崇史, 前田祐作, 藤原理郎, 高尾英邦
2. 発表標題 低摩擦状態下での内視鏡治療に向けた鉗子実装型MEMS滑り覚センサ
3. 学会等名 第12回「集積化MEMSシンポジウム」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 綿谷一輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 医療応用に向けた高解像度 MEMS 触覚センサの防水・防塵パッケージ技術開発
3. 学会等名 第12回「集積化MEMSシンポジウム」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 綿谷一輝、寺尾京平、下川房男、高尾英邦
2. 発表標題 アレイ型高分解能2軸触覚センサを用いた触覚分布情報の計測と評価
3. 学会等名 第10回集積化MEMS技術研究ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榊原 佑樹、寺尾 京平、下川 房男、高尾 英邦
2. 発表標題 パリレンCコーティングによるシリコンカンチレバーの機械特性変化の評価
3. 学会等名 第10回集積化MEMS技術研究ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 Reproducing our Fingertip Sensation by Nano-Resolution Tactile Sensors
3. 学会等名 29th Assembly of Advanced Material Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 Reproducing our Fingertip Sensation by Super High Resolution Tactile Sensing
3. 学会等名 International Conference & Exhibition on Biosensors & Bioelectronics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田 吉広、中光 孝太、綿谷 一輝、寺尾 京平、下川 房男、有本 和民、高尾 英邦
2. 発表標題 繊細な触感の客観的評価を可能とする「手触り感スキャナー」の開発
3. 学会等名 第36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 2019年

1. 発表者名 綿谷 一輝、寺尾 京平、下川 房男、高尾 英邦
2. 発表標題 微細凹凸感・摩擦感・硬軟感の同時取得を可能にする指腹曲面型MEMS触覚アレイセンサ
3. 学会等名 第36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 2019年

1. 発表者名 榊原 佑樹、綿谷 一輝、寺尾 京平、下川 房男、高尾 英邦
2. 発表標題 計測表面の保護を目指した高分解能MEMS触覚センサ上へのパリレン蒸着
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田 祐作、寺尾 京平、下川 房男、高尾 英邦
2. 発表標題 内視鏡手術における把持状態の無線計測に向けた構造色変化を用いた力覚センサの開発
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 翼、綿谷 一輝、寺尾 京平、下川 房男、高尾 英邦
2. 発表標題 60 μ Nの摩擦力感度と0.5 μ mの空間分解能を有するナノ領域触覚センサの製作と評価
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 Ultra-high resolution MEMS tactile sensors for nano-technology
3. 学会等名 European Advanced Materials Congress(EAMC2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 中光孝太, 綿谷一輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 高分解能MEMS触覚センサによる毛髪表面の手触り感計測と評価
3. 学会等名 第 10 回集積化 MEMS シンポジウム
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 濱本晃輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 毛包細胞の機能を模した高感度MEMSシリコン毛デバイス
3. 学会等名 第35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 2018年～2019年

1. 発表者名 前田祐作, 森宏仁, 大平文和, 高尾英邦
2. 発表標題 軟性内視鏡手術における送気圧・温度の同時モニタリングに向けた完全無線型光 学式センサの温度特性評価
3. 学会等名 第35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 2018年～2019年

1. 発表者名 中島翼, 綿谷一輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 超高分解能触覚センサによるサブミクロン領域の手触り感判別
3. 学会等名 第35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 2018年～2019年

1. 発表者名 綿谷一輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 高精細な触覚情報の空間分布計測を可能にするアレイ型MEMS指紋触覚センサ
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 札幌市民交流プラザ
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 中光孝太, 綿谷一輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 高分解能MEMS触覚センサによる毛髪表面の手触り感計測と評価
3. 学会等名 第10回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 高尾英邦
2. 発表標題 繊細な手触り感を取得するナノ触覚センシング技術
3. 学会等名 豊橋技術科学大学EIRISプロジェクト研究成果報告会(招待講演)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 High density tactile information obtained by integrated MEMS tactile sensor array and its processing to discriminate surface textures
3. 学会等名 International Conference for Leading and Young Computer Scientists(IC-LYCS 2019)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 西田吉広, 綿谷一輝, 寺尾京平, 下川房男, 高尾英邦
2. 発表標題 指先の手触り感計測に向けた走査型高分解能触覚センシングシステムの製作
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 Touch Feeling Measurement with Novel High Resolution MEMS Tactile Sensors
3. 学会等名 The BIT 's 5th Annual World Congress of Smart Materials(WCSM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao
2. 発表標題 Extraction of "Real Friction Coefficient" Depending on Micro Surface Roughness Using High Resolution MEMS Tactile Sensor
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology(APCOT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Kota Nakamitsu, Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao
2. 発表標題 Measurement of Touch Feeling on Hair Surface Using High Resolution Two-Axis MEMS Tactile Sensor
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology(APCOT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Kazuki Watatani, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao
2. 発表標題 A Monolithic Fingerprint-Line Tactile Sensor Array Realizing High Resokution Imaging of Spatially Distributed Tactile Information
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Koki Hamamoto, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, Hidekuni Takao
2. 発表標題 A Highly Sensitive Planer Silicon-Hair Device Reproducing The Function of Human Hair Follicle
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Yusaku Maeda; Hirohito Mori; Tomoaki Nakagawa; Hidekuni Takao
2. 発表標題 The Fully Wireless Pressure Sensor Based on Endoscopic Image
3. 学会等名 Proc. of 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tubasa Nakashima; Kazuki Watatani; Kyohei Terao; Fusao Shimokawa; Hidekuni Takao
2. 発表標題 Sense of Touch in Submicron Region Realized by Two-axis Tactile Sensor with a Needle-like Contactor
3. 学会等名 Proceedings of 31st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田祐作; 森宏仁; 高尾英邦
2. 発表標題 光学式センサによる軟性内視鏡手術下での腹腔内圧力モニタリングに向けた動物実験
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田剣政; 綿谷一輝; 寺尾京平; 下川房男; 高尾英邦
2. 発表標題 高分解能触覚センサと深層学習を用いた接触対象の精密判別
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 Novel High Resolution MEMS Tactile Sensors For Measurement of Fingertip Feelings
3. 学会等名 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices: IWPSD 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 High Resolution Tactile Sensing with Silicon MEMS Sensors for Measurement of Fingertip Sensation
3. 学会等名 14th International SoC Design Conference (ISOCC 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高尾英邦
2. 発表標題 医療での皮膚感覚計測応用を目指した「細胞化センサ」技術
3. 学会等名 第2回黒潮カンファレンス(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidekuni Takao
2. 発表標題 High Resolution MEMS Tactile Sensors for Realization of Artificial Sense of Fingertip
3. 学会等名 ISACIT2017(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高尾英邦	4. 発行年 2018年
2. 出版社 サイエンス&テクノロジー株式会社	5. 総ページ数 10
3. 書名 狙いどおりの触覚・触感をつくる技術：第4章第3節[3] 柔軟な素材表面を高精度で測定するMEMS 触覚センサ	

〔出願〕 計6件

産業財産権の名称 圧力センサ，内視鏡フード，内視鏡および圧力測定装置	発明者 高尾英邦	権利者 国立大学法人香川大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2017/032365	出願年 2017年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 触覚センサおよび手触り感の評価方法	発明者 高尾英邦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、US10,190,927 B2	取得年 2019年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

MEMS内視鏡センサ ” 超低侵襲内視鏡医療技術の実現に向けて ”
<https://www.kagawa-u.ac.jp/kenkyu/Device/04research/01ikou.html>
 MEMS触覚センサ ” 手触り感・繊細なナノ触覚を定量化 ”
<https://www.kagawa-u.ac.jp/kenkyu/Device/04research/04shokukaku.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
研究分担者	前田 祐作 (Maeda Yusaku) (00803404)	香川高等専門学校・機械工学科・講師 (56203)	
研究分担者	岸野 貴賢 (Kishino Takayoshi) (60738681)	香川大学・医学部・助教 (16201)	
研究分担者	森 宏仁 (Mori Hirohito) (20568844)	香川大学・医学部・客員教授 (16201)	
研究分担者	藤原 理朗 (Fujiwara Masao) (20380181)	香川大学・医学部附属病院・講師 (16201)	平成29年度限りの参画

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