

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20722

研究課題名（和文）軟性内視鏡手術を支援する病変硬さや把持状態を無線で取得する構造色式センサの開発

研究課題名（英文）Development of a structural-color type sensor to detect lesion hardness and grasping state for flexible endoscope operation

研究代表者

前田 祐作（Maeda, Yusaku）

香川高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号：00803404

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、軟性内視鏡治療における医療用鉗子の把持状態や、接触した臓器の硬さなどを同時に計測可能センサの実現を目指し、情報に応じて呈する構造色に変化する、構造色式センサによる、触覚取得技術の開発に取り組んだ。開発したセンサ要素の3軸荷重に対する応答を取得し、垂直荷重に対する荷重分解能1mN、計測範囲25mNを確認した。また、実際の生体組織の硬さに対応するA5およびA45のサンプルに対しての応答を取得した。これらの評価結果から、医療用鉗子で想定される把持力5Nまでの範囲での垂直荷重及び、その際の摩擦力を計測可能な性能の実現に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造色式センサと、内視鏡カメラの組み合わせによる計測は単一の内視鏡視野から送気圧や温度、鉗子の把持状態や接触箇所の硬さなどの複数の情報を、医師の必要に応じて、同時に取得可能であり、構造的には、現行の内視鏡構成に対してセンサチップの追加のみで実現できる。このことは、センサの無線化に対する一般的なアプローチである、無線素子や電池を使用する場合に比べ、実装体積を小さくできることから、軟性内視鏡治療への応用において、多様な計測への拡張性の高い技術である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed the tactile sensor based on structural color change depending on the information. The response of the developed sensor element to triaxial load was obtained, and the load resolution of 1 mN and the measurement range of 25 mN for vertical load were confirmed. We also obtained the response for A5 and A45 samples, which correspond to the actual hardness of biological tissue. From these evaluation results, we succeeded in realizing the capability to measure the vertical load and the frictional force in the range of up to 5N grasping force assumed in medical forceps.

研究分野：生体医工学・計測

キーワード：触覚センサ 構造色 低侵襲治療 軟性内視鏡

### 1. 研究開始当初の背景

近年、軟性内視鏡を自然開口部から挿入し、最低限の切創のみで治療が可能な超低侵襲治療技術である、NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery)が提案され、既存の内視鏡手術に比べ、術後回復が早い、超低侵襲治療として注目されている。軟性内視鏡のみを挿入し、治療を行う NOTES では、医師が視覚情報しか得られないため、発見した「病変の正確な診断」や、臓器の把持状態が把握できないことから、滑らないように臓器を把持するなどの、「治療技術の習熟」が困難である課題が存在している。前述課題のうち、「病変の正確な診断」に向けては、内視鏡による視界確保のための“送気圧”と、現状診断の重要な要素とされている“病変の見かけの大きさ”の関係を明らかにすることで改善が可能である。これまでに代表者は、送気内視鏡光源や胃酸等への耐性を有した圧力センサを開発し、鉗子などの一時的に使用される部品ではなく、治療中常に使用される内視鏡カバーであるフードへ実装し、イヌ体内からの送気圧の取得動作を実証している。しかしながら、NOTES 治療において、フードは治療箇所や状況に応じて複数回交換される使い捨て部品である。フード交換の都度、配線を内視鏡に添わせるのは、実用上問題があり、センサは無線の実装される必要がある。代表者は、センサチップ以外の要素を一切追加せずに、情報の検出が可能となる、構造色式センサを提案し、圧力に応じて変化する構造色を内視鏡画像から取得することが可能なことを、ブタ切除胃を用いた実験により実証した。

### 2. 研究の目的

超低侵襲治療である NOTES の迅速な普及に向けては、医師に対する「治療技術の習熟」難度を下げることが重要である。鉗子と臓器の接触荷重をリアルタイムに取得し、把持状態を評価することができれば、トレーニングの効率化や実際の治療の支援が可能となる。また、「病変の正確な診断」においても、硬さなどの情報が得られれば、現在大きさのみで評価している基準をさらに正確なものとする。本研究では、構造色式センサによる情報検出原理を、触覚取得へ拡張し、硬さや把持状態が検出可能なセンサ要素の開発として、構造色式センサ要素の設計を最適化し、3軸荷重検出を実現し、それらセンサ要素を図1に示すように鉗子へ実装し、必要に応じて硬さや把持状態の計測・判定が、送気圧などの計測と同時に可能とするシステム実現に取り組んだ。構造色式センサと、内視鏡カメラの組み合わせによる計測は単一の内視鏡視野から同時に複数の情報を取得可能であり、構造的には、現行の内視鏡構成に対してセンサチップの追加のみで実現できる。このことは、センサの無線化に対する一般的なアプローチである、無線素子や電池を使用する場合に比べ、実装体積を小さくできることから、NOTES 応用において、多様な計測への拡張性の高い技術である。構造色式センサの素子構造を図2に示す。センサ構造は、圧力センサなどで一般的に用いられている単結晶 Si のダイヤモンド構造を基本として、中心には、均一な構造色を呈するため、ボス構造を配置する。ダイヤモンドに気圧変化が、ボス構造に荷重が作用すると、対抗するガラス基板間とのギャップが nm 単位で変化し、干渉により生じている構造色に変化する。初期ギャップは約 1 $\mu$ m で形成した。ダイヤモンド面と、ガラス面の間のチャンバーを、真空とすることで、絶対圧が、ある程度の気体を封入することで温度が計測可能である。大気圧に開放した場合は、気圧や、温度に対する応答性を排し、力覚のみを取得することが可能なセンサ要素を実現できる。この構造を持つセンサの、機械特性や実装箇所を変更することで、把持力や硬さなど、任意の情報を得ることができる。

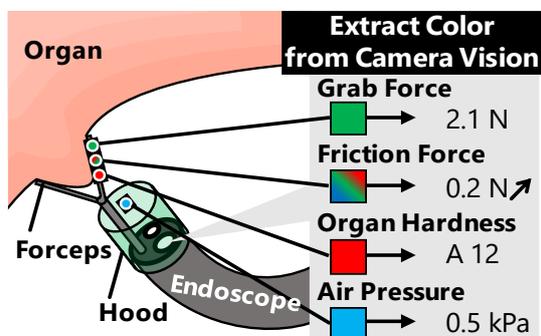


図1 提案センサの概要

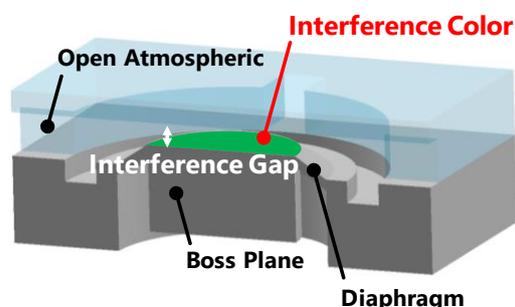


図2 構造色式センサ要素の構造

### 3. 研究の方法

図3は、提案するセンサ要素による、3軸荷重の取得原理図である。センサ中央のボス構造に、垂直荷重が作用した際には、センサの構造色が均一に変化するため、構造色の平均値変化か

ら、垂直荷重を抽出し取得できる。また、摩擦力などの、水平荷重が作用した場合、センサの構造色は、図3右側に示すように、傾きを持って分布する。したがって、構造色の傾きおよびその方向から、水平荷重の大きさおよび方向を取得することができる。硬さ計測は、代表者らが開発した“基準面構造”による接触荷重に依存しない検出原理を構造色式センサへ応用し、実現を検討した。把持状態の評価は、3軸荷重の位置分布を検出可能なセンサを鉗子へ実装し行った。センサを鉗子に取り付けた場合、状況に応じてカメラ面とセンサ面の角度が変化するため、この補償が必須であり、カメラ内のセンサ画像から角度を推定し、図4に示す一例のように得られる理論特性を用いて補償した。また、センサへの入射光スペクトルの変化は、センサチップの構造色を有していない部分の色を基準として、ホワイトバランスを調整することで補償を検討した。さらに、生体内環境を模擬するため、体液程度の粘性を有するグリセリン水溶液を用いて、センサ動作を検証した。

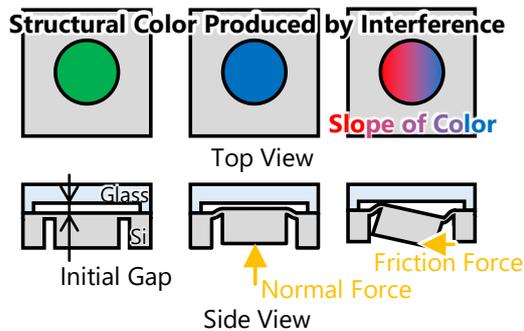


図3 3軸荷重の検出原理

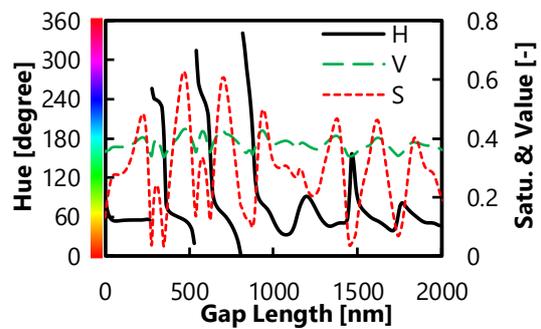


図4 構造間ギャップに対する構造色の変化

#### 4. 研究成果

センサ要素の製作プロセスの概要を図5に示す。機械構造部は、 $5/1/525\mu\text{m}$ のSOI (Silicon On Insulator) ウェハに、深堀り反応性イオンエッチング (DRIE) で形成した。干渉用のギャップは、厚さ  $400\mu\text{m}$  の陽極接合ガラスウェハ SW-8 を、0.6% HF 溶液を用いてウェットエッチングを行い、形成した。ギャップを形成した後、構造色の彩度向上のため、ハーフミラーをとってCr膜を蒸着した。それぞれのウェハを、最終的に陽極接合で接合しセンサ構造を完成させた。図6は、開発したセンサチップの写真である。センサ構造中央に構造色の発色が確認できる。チップサイズは  $2.1 \times 2.1 \times 0.8 \text{ mm}$  であり、中央の構造色発色部の直径は  $0.7 \text{ mm}$  である。

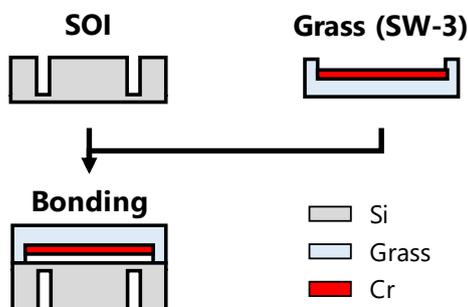


図5 構造色式センサ要素の構造と動作原理

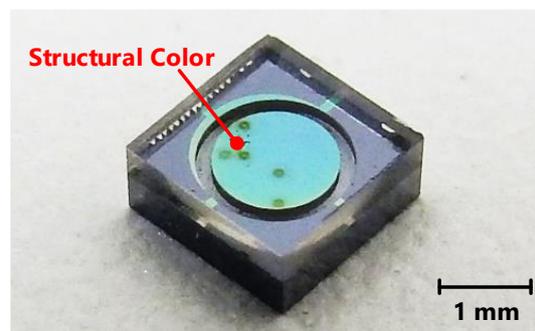


図6 製作したセンサ要素

図7は、開発したセンサの荷重応答特性を評価するための実験系である。センサに対して、いくつかの偏心量を持った荷重を FT-MTA03 (FemtoTools 社) により印加し、その際の構造色の変化を取得した。図7(c)に示すように、初期状態では紫であった構造色が、緑に変化すること、荷重の偏心量の増加に伴い、構造色分布に傾きが生じていることが視覚的に確認できる。図8(a)は、偏心量  $0.1 \text{ mm}$  および  $0.2 \text{ mm}$  それぞれに対するセンサチップの構造色変化である。偏心量に応じ、構造色の面内分布が変化していることが確認できる。図9(a)は、各偏心荷重に対する構造色の平均値の変化である。偏心  $0.1 \text{ mm}$  では傾き  $44.0 \text{ degree/mN}$  が、偏心  $0.2 \text{ mm}$  では傾き  $17.9 \text{ degree/mN}$  がそれぞれ得られた。

図8(b)は、各荷重に対する、構造色の面内傾きの関係である。偏心量にほとんど比例して、傾きの増加が生じていることが確認できる。各偏心における傾きは、 $0.1 \text{ mm}$  で  $21.6 \text{ degree/mN}$ 、 $0.2 \text{ mm}$  で  $61.5 \text{ degree/mN}$  となった。これらの実験結果から、荷重の偏心、すなわちモーメントの増加を、構造色の平均値および傾きから得られることを確認し構造色による力覚取得動作を実証した。

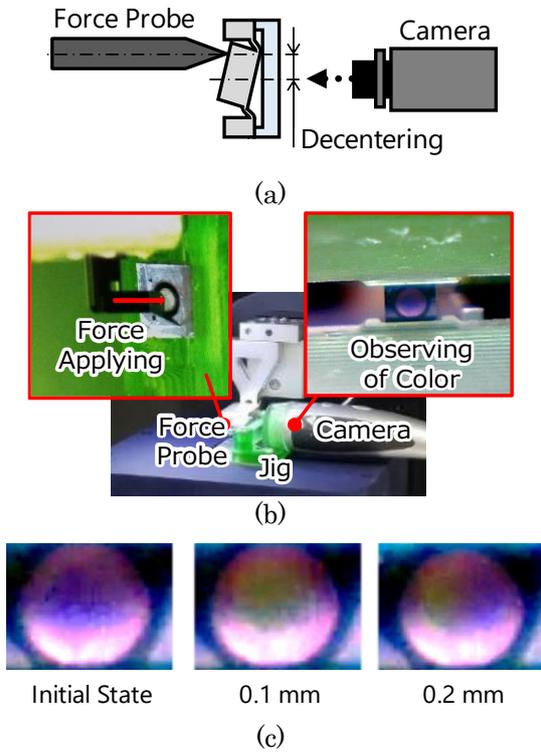


図7 荷重応答特性の取得実験

続いて、作製したセンサ要素の硬さ応答を、硬さ基準サンプルとなる2つのPDMSを用いて評価した。硬度は主剤と硬化剤の混合比で制御した。基準サンプルの硬さは、ISO7619-1:2010のAスケールデュロメーターで測定し、A5とA45であった。ポアソン比が0.3の場合、A5は筋肉の硬さ、A45は胃の硬さに相当する。図9に、センサ要素の硬さ応答を得るための実験系を示す。センサを、硬さ基準サンプルに対して接触させ、その際の接触荷重を電子天秤により取得し、構造色をカメラにより取得した。軟性内視鏡手術に使用される鉗子の面積は40mm<sup>2</sup>、センサ要素の面積は4mm<sup>2</sup>であり、鉗子と臓器の間の接触力は2-5N程度であることから、接触力の測定範囲は、把持部にかかる圧力が一様に分布すると仮定し、最大0.45N程度と推定し、その値を含む、0~1Nの範囲で評価した。センサ要素の硬さの異なるサンプルに対する応答をFig.10に示します。硬いサンプル(A45)に対しては4.4degree/N、柔らかいサンプル(A5)に対しては、2.9degree/Nの傾きが確認された。また、構造間ギャップが0となる、0.5N~1Nの範囲では色相変化が飽和することが確認された。実際の治療環境においては、接触荷重は未知であるため、このセンサ要素で実際に硬さを判別するためには、接触力依存性をキャンセルする必要があるが、代表者らが開発している、接触荷重に依存しない硬さ計測原理を応用することで、これらを補償できる。また、今回のサンプルはそれぞれ生体組織を想定しており、実際の治療環境で荷重を取得する際の応答に近い特性が得られていると考えられる。図10においては、0.2N程度までの構造色変化が得られており、通常の把持力については、十分に取得可能であると考えられる。これらの評価実験により、構造色センサによる、把持状態、硬さ評価を実現するための計測動作をそれぞれ実証した。

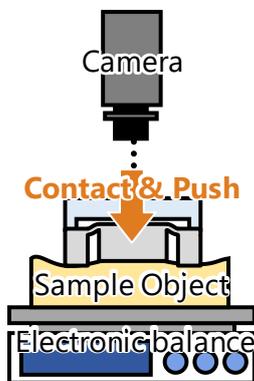


図9 構造色式センサ要素の構造と動作原理

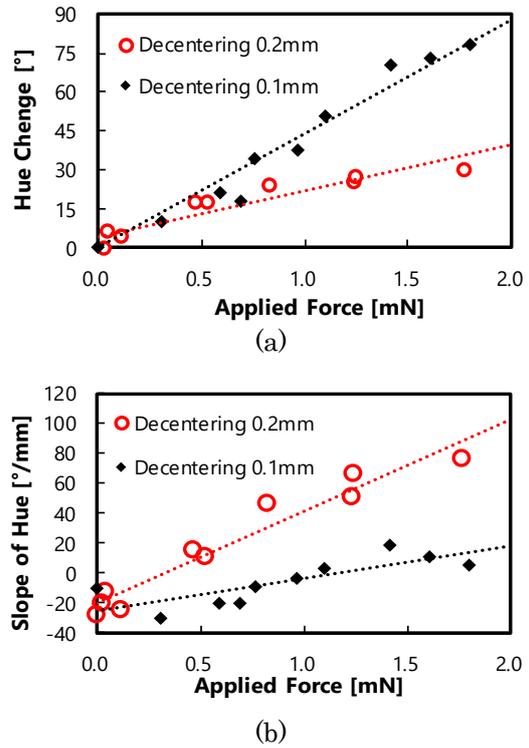


図8 センサ構造色の荷重応答特性

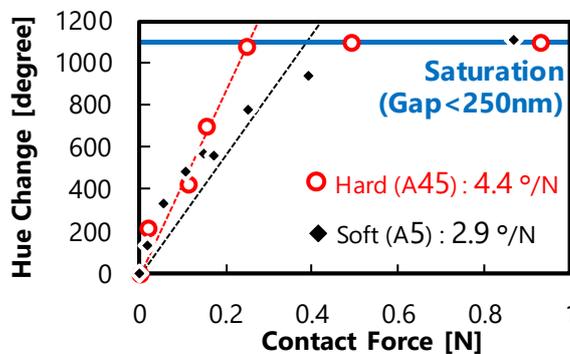


図10 構造色式センサ要素の構造と動作原理

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 前田祐作, 森宏仁, 高尾英邦
2. 発表標題 軟性内視鏡手術に向けた構造色による送気圧計測システムの開発
3. 学会等名 香川大学先端工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田祐作, 森宏仁, 高尾英邦
2. 発表標題 NOTESにおける送気圧モニタリングに向けたMEMSセンサの開発
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyoshi Yoshida, Yusaku Maeda, Hirohito Mori, and Hidekuni Takao
2. 発表標題 Evaluation of temperature characteristic on fully wireless optical sensor for real time monitoring of air pressure and temperature in flexible endoscopic surgery
3. 学会等名 the 3rd NIT-NUU International Conference (国際学会)
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 Yusaku Maeda, Kyohei Terao, Fusao Shimokawa, and Hidekuni Takao
2. 発表標題 STRUCTURAL COLOR BASED TACTILE SENSOR FOR FLEXIBLE ENDOSCOPIC SURGERY TO DETECT GRAB STATE AND ORGANS HARDNESS
3. 学会等名 MEMS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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