

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18090

研究課題名(和文) 鉗子把持状態の“良悪”を識別する生体適合型構造色式センサの開発

研究課題名(英文) Development of a Biocompatible Structural Color type Sensor to Identify "Good" or "Bad" Forceps Grasping Conditions

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：(1)生体適合性を有した構造色式センサ素子の開発：光造形による機械構造形成・フィルム研磨による鏡面形成，加圧接合による $\mu\text{m}$ レベルギャップ制御を組み合わせ，生体適合型構造色式センサの製作プロセスを確立した。(2)把持状態の“良悪”評価に向けた機械学習モデルの構築：1次元データである荷重の時系列波形と，人の感覚を結びつけるモデルを，畳み込みニューラルネットワークにより実現した。(3)生体環境での動作検証：胃液粘度よりも十分に大きな粘度のグリセリン環境下においても，構造色による情報計測動作に支障がないことを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体適合型構造色式センサと，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複数の情報を，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。一般的なアプローチである，無線素子および生体適合性を有するためのパッケージを使用する場合に比べ，実装体積を小さくでき，多様な計測への拡張性の高い技術である。加えて，取得データによる感性的な情報の取得は，難易度の高い内視鏡治療の習得を少しでも早くし，治療法自体の波及を早める貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：(1) Development of biocompatible structural color type sensor elements: We established a manufacturing process for biocompatible structural color-type sensors by combining mechanical structure formation by optical 3D printing, mirror surface formation by film polishing, and  $1\mu\text{m}$ -level gap control technology by crimping. (2) Construction of a machine learning model for "good/bad" evaluation of grasping condition: Using convolutional neural networks, we have realized a model linking the time-series waveform of load, which is 1D data, and human sensation. (3) Verification of operation in an biological environment: We demonstrated that there is no problem in measuring information by structural color even in a glycerin environment. We demonstrated that there is no problem in measuring information by structural color even in a glycerin environment with a viscosity of 1499 mPas, which is sufficiently larger than the viscosity of gastric juice of 40 mPas or less.

研究分野：生体医工学・計測工学・機械学習

キーワード：構造色 機械学習 生体医工学 低侵襲治療 触覚センサ 機械学習 畳み込みニューラルネットワーク

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

### (1) NOTES とその課題

NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery)は、図 1 のように軟性内視鏡を自然開口部から挿入し、最低限の切創で治療を実現する治療技術の総称である。既存内視鏡手術に比べ、術後回復が早く、超低侵襲治療として注目されている。NOTES では、医師は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ず、滑らないように臓器を把持する、「治療技術の習熟」が困難である課題が存在している。これら課題解決に向けた、生体内適合性の高いセンサの開発が求められている。

### (2) 構造色式センシング

「病変の正確な診断」は、送気圧による病変の変形や、硬さの計測で改善できる。「治療技術の習熟」は、把持状態の“良悪”が識別できれば、迅速となると期待される。申請者らは、スペースに限られる環境に向けた計測技術として、鉗子などの治療器具に、情報に応じた構造色を呈するセンサ素子を埋め込むだけで実現可能な、“構造色式センサ (図 2)”を提案し、気圧や温度、3軸荷重、硬さの取得を実現してきた。その中で、センサ素子自体の生体適合性や、明確な数値指針のない把持状態の“良悪”の評価が課題として明らかになっている。

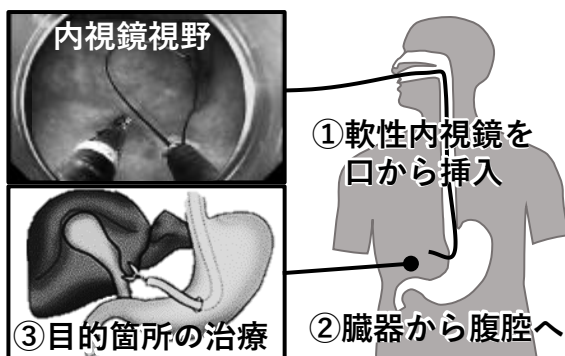


図 1 NOTES の概要

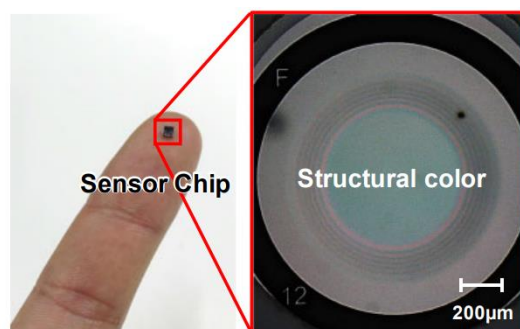


図 2 構造色式センサ

## 2. 研究の目的

本研究は、図 3 に示すような、医師が必要とする各情報を、リアルタイムで提示する技術の実現を目的とする。具体的には、生体適合性の高いセンサ素子と、鉗子の把持力・摩擦力分布から、把持状態の“良悪”状態を判別するモデルの構築を実現する。構造色式センサは、現行の内視鏡構成に、図 4 に示すようなセンサ素子を追加するのみで実現できる。無線計測を実現する一般的な手法である、通信素子の使用に比べて、実装体積が小さく、内視鏡視野や侵襲性に与える影響が小さい。加えて、構造色式センサが情報にตอบสนองする構造色を呈するために必要なのは、機械構造と反射膜のみであるため、回路素子を必要とする電気式センサや光ファイバを必要とする多くの光学式センサに比べ、材料選択の制約が少ない。治療器具としての使用実績の多い生体適合性が高い材料のみで、複数の情報を取得可能なセンサを実現できる。

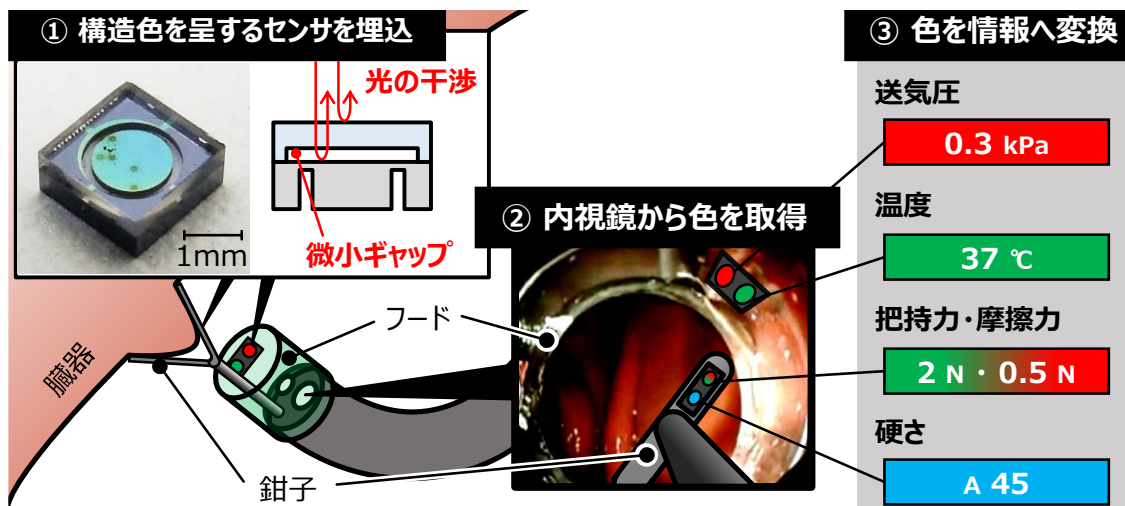


図 3 構造色式センサによる情報取得概念図

### 3. 研究の方法

本研究では、生体適合型センサ素子と、把持状態の“良悪”状態以下の3項目を実施する。

- (1) 生体適合性を有した構造色式センサ素子の開発  
現状、治療器具としての使用実績がほとんど無い Si およびガラスによる現行素子を、生体適合材料で実現する。
- (2) 把持状態の“良悪”評価に向けた機械学習モデルの構築  
構造色式センサアレイにより取得した把持状態から、機械学習を活用し、実際に滑りが発生する以前の情報から、滑りの発生を予想可能なモデル構築を目指す。
- (3) 生態環境での動作検証  
ムチンを含む粘液などを用いて、実際の治療環境を模擬し、センサ動作を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 生体適合性を有した構造色式センサ素子の開発

従来単結晶シリコン、ガラスの粉塵発生が懸念される脆性材料により製作していた構造色式センサを、生体適合材料のみで実現することに向け、製作プロセスを検討した。図4にその製作プロセスを示す。外力や、圧力、温度等を、nm単位の変形量に変換する機械構造部は、生体適合樹脂による造形が可能な3Dプリンタ, Form3Bを使用し造形した。造形した機械構造部における、構造色の発色面は、平坦度200nm以下の鏡面となるようにフィルム研磨を行う。研磨面には、反射膜として、金属薄膜をスパッタリング蒸着により成膜する。作成した構造に対して、透明樹脂板を接着剤により接合する。接合圧を制御することで、構造色発色に必要な1 $\mu$ mの空気ギャップを確保する。以上のプロセスにより、作成した構造色式センサのチップ写真を図5に示す。

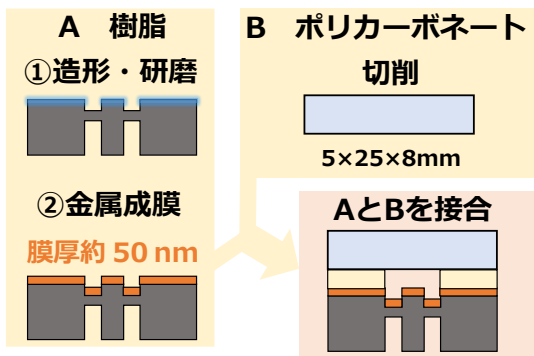


図4 生体適合型構造色式センサのプロセス

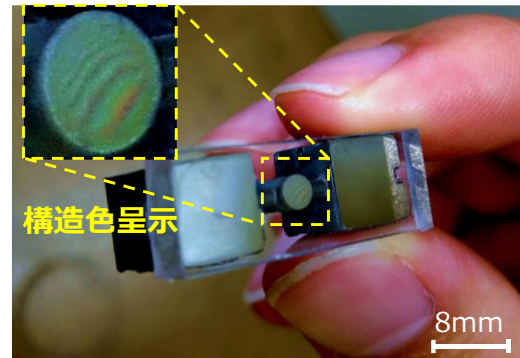


図5 樹脂材料によるセンサの試作結果

試作したセンサチップの荷重応答特性を評価した。図6に、センサに対して荷重を加えた際の、構造色変化を示す。荷重に対して、構造色変化が生じることを確認した。続いて、構造色変化を内視鏡より得られた画像データから評価するため、荷重無負荷時のRGB値を1とした、各荷重における輝度の比率をプロットした結果を図7に示す。1Nまでの範囲で、構造色が3周期変化していることが確認できる。荷重の増加に伴い、R、G、Bすべてのチャンネルで周期が増大していることが確認できる。これは、ばねの非線形変形によって、荷重の増大に伴いばね定数が増加していることに起因すると考えられる。このプロットから、RGB3つのチャンネルの値の組み合わせから、対応する荷重を推定する。以上の結果から、生体適合材料による構造色式センサの製作工程を確立した。

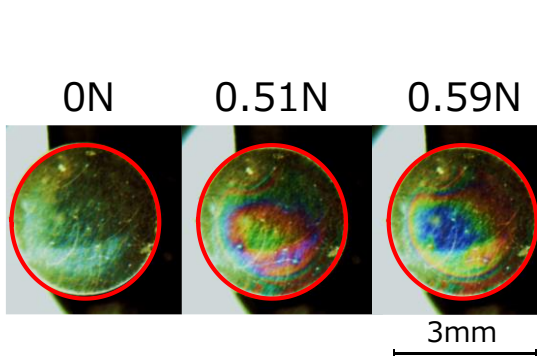


図6 荷重に対する構造色の変化

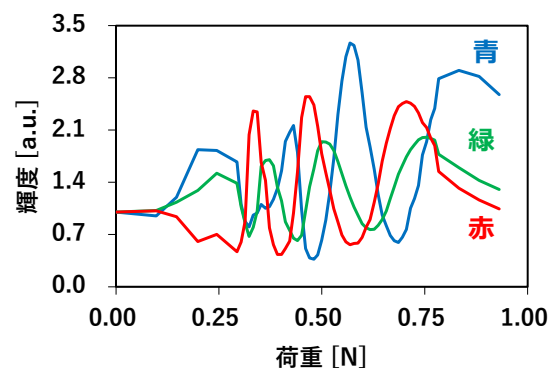


図7 荷重に対する各色の輝度変化



(2) 把持状態の“良悪” 評価に向けた機械学習モデルの構築

内視鏡治療における把持状態の“良悪”は、現状医師の長期間に渡る訓練により、感覚的に身に付けられている。人が手から受け取る感覚を、触覚センサにより取得した荷重などの時系列波形と結びつける技術が必要になる。本課題においては、この良悪評価を構造色式センサから取得した荷重分布から、鉗子把持状態の“良悪”を評価する機械学習モデルを構築するための基礎検討として、17種類の布地から取得した触覚センサによる荷重データと、人の感じる「なめらか」等の6つの感覚指標を結びつける回帰モデルを、1次元データに対するCNNモデルとして実現した。図8は、触覚センサで取得した信号を入力データ、なめらか等の官能評価結果を出力データとするCNNモデルのアーキテクチャである。モデルの特徴量抽出層には、2次元データ、特に画像に対して実績のある畳み込み層を採用した。

図9は、布地に対するなめらかさ等の官能評価項目6つに対して、人が評価したスコア(灰)、および開発したCNNモデルによる予測結果(白)の比較である。モデルは、官能評価結果の平均値を正解値として訓練することで、官能評価の被験者グループよりも分散が抑えられた予測を可能とした。この結果は、1次元データである触覚センサによる荷重波形に対しても、CNNモデルの適用が有効であることを示し、構造色式センサによる荷重計測結果から、感覚的な評価である、把持状態の良悪評価を実現するための重要な知見を得た。

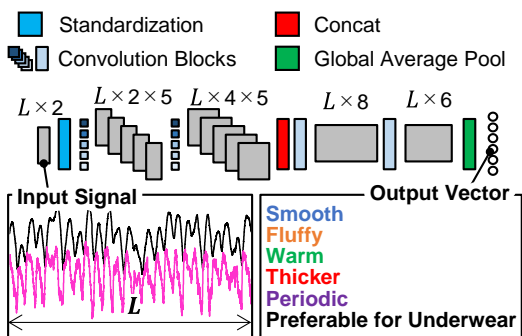


図8 触覚信号と感性を結ぶCNNモデル

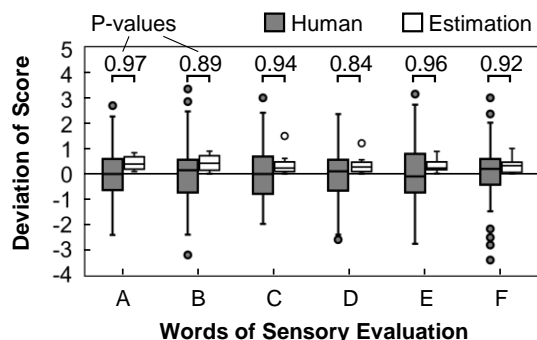


図9 ヒト(灰)とモデル予測(白)の比較

(3) 動作検証

軟性内視鏡治療を行う環境は腹腔や臓器内部であり、胃液をはじめとした粘液が存在する環境下での治療となる。センサ素子は、こういった粘液が付着した場合でも、安定して情報に 응답した構造色を呈する必要がある。図10は、通常空気環境化での圧力計測と、40 mPa·s以下である胃液粘度よりも十分に大きな粘度である1499 mPa·sのグリセリンをセンサに付着させた状態での圧力計測結果をそれぞれ示している。圧力は120秒間隔でストップバルブを開閉し制御した。図内黒実線のセンサ出力は、カメラ画像から取得した構造色と、既知のセンサの圧力に対する応答から計算した出力である。図内の赤鎖線は、センサの周辺圧力を、圧力計(DG-920N)で計測した結果である。グリセリンが付着した場合は、送排気経路へのグリセリン侵入の影響で、そもそもの圧力が矩形波となっていないが、基準となる圧力計と、センサ出力は概ね一致しており、センサ自体に粘液が付着した場合においても、構造色による計測に支障がないことを実証した。

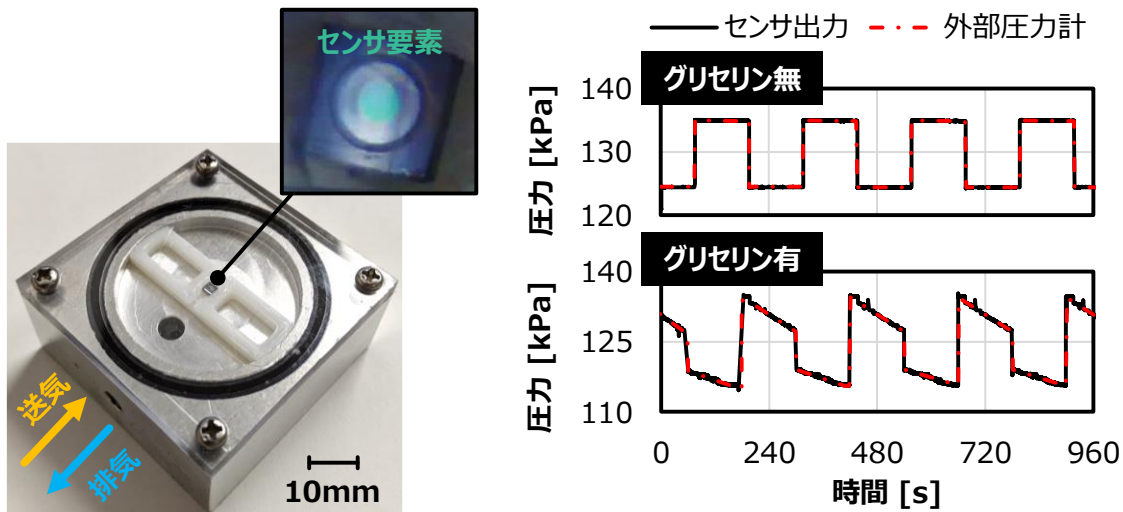


図10 グリセリン下の圧力計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 前田 祐作, 宅和 宏樹, 中川 智明, 森 宏仁, 高尾 英邦	4. 巻 48(3)
2. 論文標題 内視鏡環境における構造色式完全無線センサ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical Science Digest	6. 最初と最後の頁 46-49
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 Maeda Yusaku, Tanimoto Kei, Sasayama Kenichi, Takao Hidekuni	4. 巻 -
2. 論文標題 Neural-Network-Based Tactile Perception System Using Ultrahigh-Resolution Tactile Sensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2023.3269797	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hirose Umi, Yusaku Maeda, and Hidekuni Takao
2. 発表標題 Design and manufacture of structural color type 3-axis tactile sensor for organ grasping and slip detection of medical forceps
3. 学会等名 The 4th NIT-NUU Bilateral Academic Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐柄雅人, 前田祐作, 高尾英邦
2. 発表標題 構造物ヘルスマニタリングに向けた構造色式荷重センサの製作工程の確立
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

〔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
---------	---------