

令和元年6月17日現在

機関番号：57403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K12070

研究課題名(和文)皮膚のポリモーダル受容器のような触覚デバイスの実現と人工指への適用

研究課題名(英文) Production of an artificial skin sense device based on feature of polymodal tactile receptors

研究代表者

湯治 準一郎 (YUJI, JUN-ICHIRO)

熊本高等専門学校・機械知能システム工学科・教授

研究者番号：80332104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、温度センサとして用いられているサーミスタとその電極のみを利用し、その電気的パラメータである抵抗と静電容量の変化より、触圧による変位と温度の複合情報を取得する皮膚のポリモーダル受容器のような触覚デバイスの実現を目的として実施した。触圧による変位の検出方法として、サーミスタ素子周辺の媒質空間の変形を利用する静電容量変化方式を検討した結果、サーミスタの抵抗と静電容量の二つのパラメータを用いると、温度のみでなく、変位情報も同時に検出可能であり、新しい触覚デバイスとして機能しうることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サーミスタは、温度測定に幅広く使用されているが、感圧センサとして機能させた例はない。本研究の成果は、サーミスタ本来の抵抗変化に加えて、静電容量変化との組み合わせによる、触圧(変位)と温度を同時取得する新しい測定原理および信号処理アルゴリズムを提案している。これにより、皮膚のポリモーダル受容器のような複数の皮膚刺激に応答する単一触覚デバイスの具現化の一手法が示され、今後の埋め込み型人工皮膚感覚センサの開発に展開できる可能性がある。更に触覚分野のみならず、多機能な複合・融合センシング素子の研究開発にも新たな視点を与えることにもなり得る。

研究成果の概要(英文)：A polymodal tactile sensing device with thermistor for artificial fingertip to detect simultaneously displacement and temperature was investigated. A trial tactile sensing device consists of a NTC-type thermistor that is embedded in a silicone tube filled with water. The capacitance of the thermistor depends on not only temperature but also deformation of surrounding water based on displacement of the silicone tube. The displacement and the temperature were simultaneously detected by using an inverse response function derived experimental results.

研究分野：センシング工学

キーワード：触覚センサ 人工皮膚感覚 サーミスタ 静電容量

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

皮膚の受容器において、触、圧、振動覚に関わるものとしては、図1に示すようなパチニ小体、マイスナー小体といった特別な構造を有する受容器が知られており、これらの特徴を利用した触覚センサも数多く提案されている。本研究では、これまでの国内外における触覚センサ研究において、着目されてこなかった複数の刺激に応答するポリモーダル受容器、その具体的な受容器である自由神経終末に着目し、この機能をセンサ化することに挑戦する。すなわち、機械刺激、熱刺激、更には湿気等（化学刺激）に対しても高感度に応答する単一の触覚デバイスを具現化することである。これが達成すると、機能毎に対応するセンサを組み合わせるのではなく、これ単体で多機能な人工触受容器を実現できるため、人工指（皮膚）へ埋め込む標準的な触覚デバイスへ発展しうる挑戦的研究と位置付けできる。

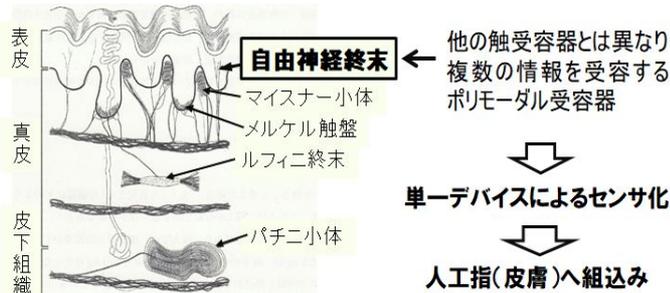


図1 研究背景

2. 研究の目的

サーミスタは、酸化物半導体を材料とする小型で加工性の優れた温度センサとして主に民生機器、OA 機器で幅広く用いられ、湿度、ガス、流量等の測定にも応用されている。この小型で高速応答性を有するサーミスタを人工指の温度センサとして組み込んだ例（米国 syntouch 社、生体倣型触覚センサー BioTac）はあるが、目的は温度のみの取得である。そこで本研究では、このサーミスタとそのリード線のみを利用し、その電気的パラメータ（R, L, C）の要素を主成分とする極めて単純な構成の触覚デバイスを作製し（センサ化）、皮膚に分布して複数の皮膚刺激に応答するポリモーダル受容器のように、単一素子でありながら、触圧、温冷および湿気等の複合情報を取得することを目的とする。本研究は、申請者がこれまで行ってきた触圧と温度の同時センシングの考えに基づき、サーミスタと電気的パラメータを組み合わせた単一センサ（インピーダンス）素子による融合センシング手法の構築、および人工皮膚に組み込み、実際の対象物への接触動作による実験的評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、センサ素子を2導線2端子とし、先端にサーミスタを接続した構成によるポリモーダル型単一センサ素子の製作を試みる。この素子に力や熱刺激が加わると、電気インピーダンスが変化するというものである。平成27年度は、インピーダンス変化型のセンサ素子をRLCの単純な直並列回路とみなし、直流と交流の2種類の入力信号を用い、センサ素子に接続した参照抵抗の電圧信号の大きさと位相差よりRLCを求める理論式を導出した。次にRLCのそれぞれが同時に変化する際のインピーダンスや位相等の変化をシミュレーションによって調べ、それぞれの微小な変化を電圧信号として取り出す検出回路を検討した。同期検波の方法を用いることで、電圧信号として取り出すことについては、シミュレーション上では確認できたが、実測には至っていない。

(2) 平成28年度は、昨年度からの引き続きで実際にセンサのプロトタイプを試作し、動作の検証を行った。しかしながら、既存のサーミスタ素子、回路部品を用いたプロトタイプの場合、リード線インダクタンスの効果的な変化を生じさせる構造および製作が困難であり、更に目標とする周波数範囲において、その微小変化の検出を実験で確認できる段階に至らなかったことから、これまで行っていた検出原理の見直しを行った。

(3) 実際のサーミスタ素子が電極で酸化物半導体を挟んだコンデンサ構造であることに着目し、素子周辺の媒質空間の変形を利用する静電容量変化方式を検討した。本研究では、図2(a)に示すようにリード線付きで市販されているNTC型サーミスタ素子（SEMITEC社製、超薄型サーミスタ103JT）の素子部分の絶縁フィルムを取り除いたものを用いた。



(a) 絶縁フィルムを取り除いた状態

(b) チューブ内に挿入した状態

図2 実験に用いたサーミスタ素子

サーミスタ素子周辺の媒質空間の変形を利用するため、図2 (b)に示すように柔軟チューブ内に挿入した構造とし、これをポリモーダル受容器の実験モデルとした。チューブに対して垂直方向から変位を与えることで接触力が加わることとし、そのチューブ自体の温度を変化させることで、熱刺激が加わることとみなした。媒質が空気の場合は、静電容量がほとんど変化しないため、より変化を大きくするために、媒質に水を用いた。これにより、静電容量が[pF]の大きさで変化が生じたため、この構造により、変位と温度の変化に対するサーミスタと静電容量の特性を取得する実験を行った。

図3にインピーダンスアナライザで測定する際のサーミスタ配置後のチューブ断面模式図と測定等価回路を示す。サーミスタ素子部は、温度によって変化する抵抗 R_{ps} と静電容量 C_{ps} の並列回路で表し、その周囲媒質の静電容量を C_{pw} で表している。チューブが図の変位方向より力を受けることによりチューブが変形し、 C_{pw} に変化を生じさせることで接触力（実験では変位を使用）の検出を行う。 C_{ps} と C_{pw} は、合成静電容量 C_p としてインピーダンスアナライザ（日置電機 IM3570）で測定する。また同時に、温度によっても R_{ps} ($=R_p$)、 C_{ps} 、 C_{pw} は変化することから、図4に示すように、抵抗と静電容量の両方の特性より、変位および温度を分離して出力する処理が必要となる。実装するには、静電容量および抵抗を電圧信号へ変換してマイコン等で分離処理する予定であるが、今回は、本手法の検証を目的とすることから、インピーダンスアナライザで測定した静電容量と抵抗の値を用いて分離処理する関数の導出を行っている。

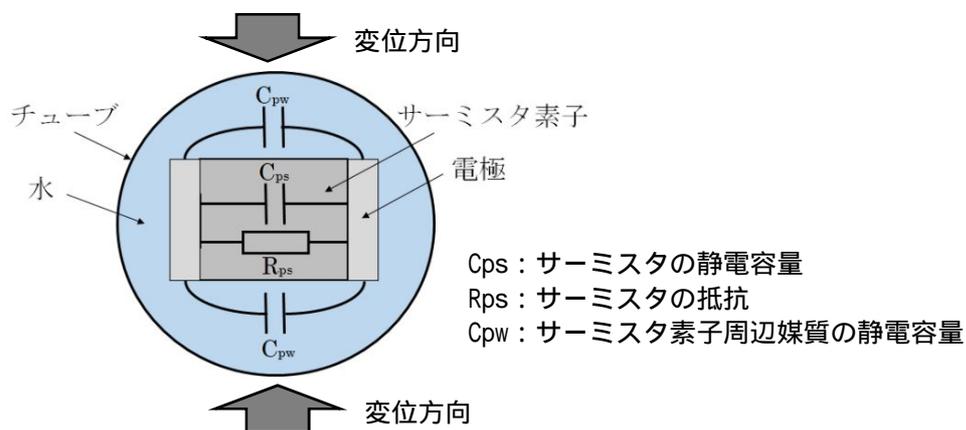


図3 サーミスタおよびチューブ断面と等価回路

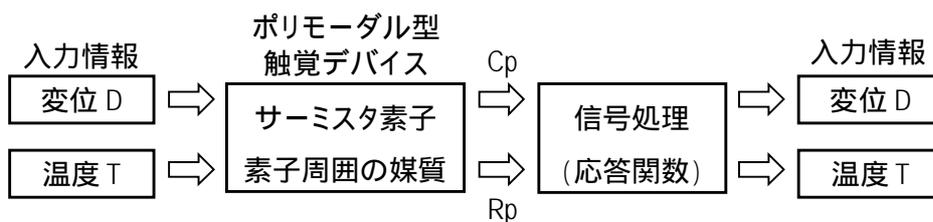


図4 センシングの流れ

図5に実験機器を示す。チューブ全体の温度を環境試験機で変化させながら、静電容量 C_p および抵抗 R_p を測定した。



図5 実験機器

実験においては、サーミスタをチューブ方向に挿入する方式から、サーミスタのリード線周囲影響を減らす目的から、図6に示すようにシリコンチューブ（外径5 mm，内径3 mm）の側面に切れ目を入れ、チューブ方向と垂直な横方向から挿入することで、サーミスタ素子部の周辺のみが媒質の影響を受けるように配置方法を変更した。切れ目は、シリコンゴム専用接着剤を用いて接着・固定している。

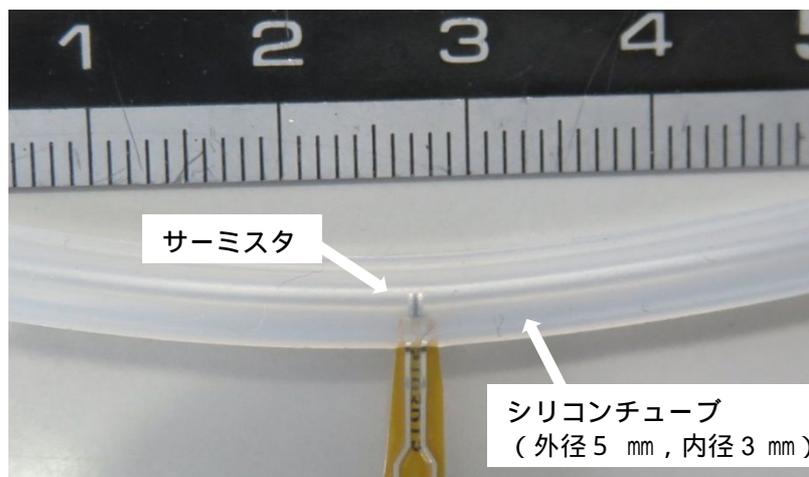


図6 ポリマー型触覚デバイスの実験モデル

4. 研究成果

図7にチューブ直径を変化させたときの25一定時における静電容量の変化率（5回測定における平均値）を示す。媒質には、水道水（電気伝導率 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）を用い、サーミスタ素子部のあるチューブをデジタルノギスで0.5 mm間隔で変位を生じさせた直後の測定周波数1 kHzにおける静電容量を測定した。変位1.0 mmまでの変化は小さいが、その後は直線的に減少し、チューブの両側が密着する変位3.0 mmにおいては、初期値の10%まで減少していることから、サーミスタ素子周辺領域（水）の形状変化による変位検出は可能であることが確認された。

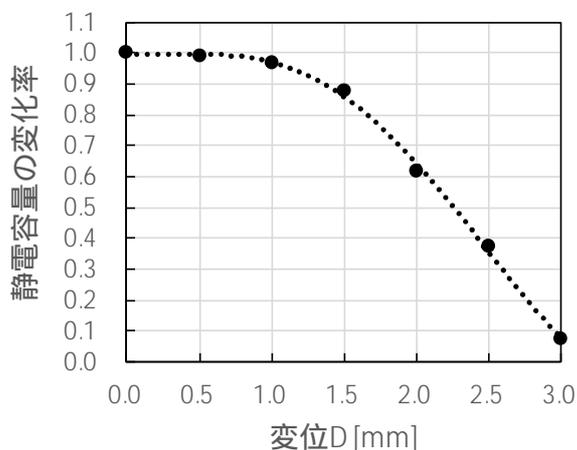


図7 温度一定(25)での変位特性

図8は、各変位での静電容量の温度特性で、(a)が測定周波数1 kHz，(b)が10 kHzの結果を示す。実験モデルを環境試験機に入れ、温度を10 から5 間隔で上昇させながら、変化が安定した状態における測定結果である。どちらも温度に対して直線的に増加しているが、測定周波数10 kHzの場合では、変位が0および0.5 mmでは、温度増加に伴い、飽和傾向が見られた。また、媒質が水の場合、静電容量は、時間が経過すると徐々に減少する現象が見られるため、実際の使用においては工夫が必要である。

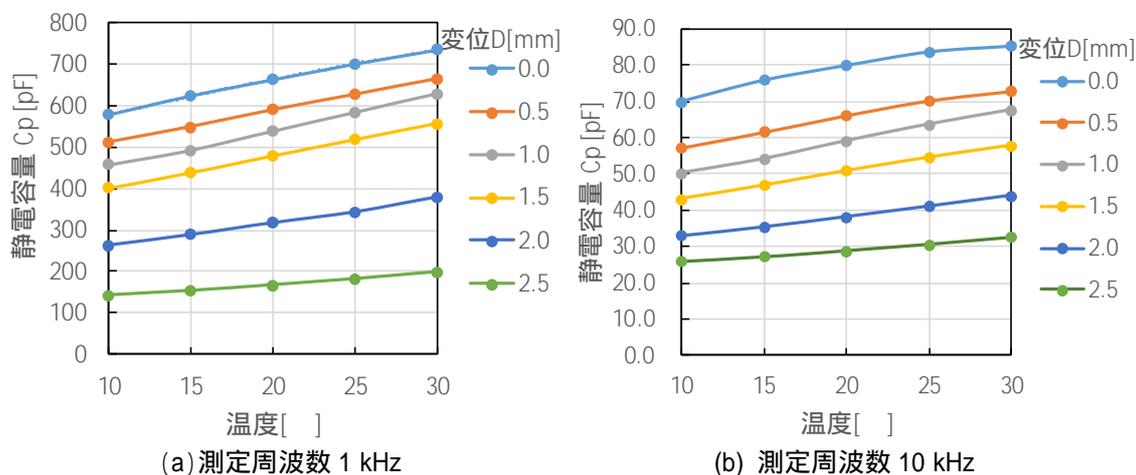


図8 静電容量の温度特性

図9は、図8と同様の抵抗の温度特性である。従来 NTC 型サーミスタは、この温度特性を利用して温度を測定しているが、変位 D によっても多少の変動が見られ、特に測定周波数 10 kHz でその影響が大きいため、今後の使用については、変動の少ない低周波側での利用が望ましいと考えられる。

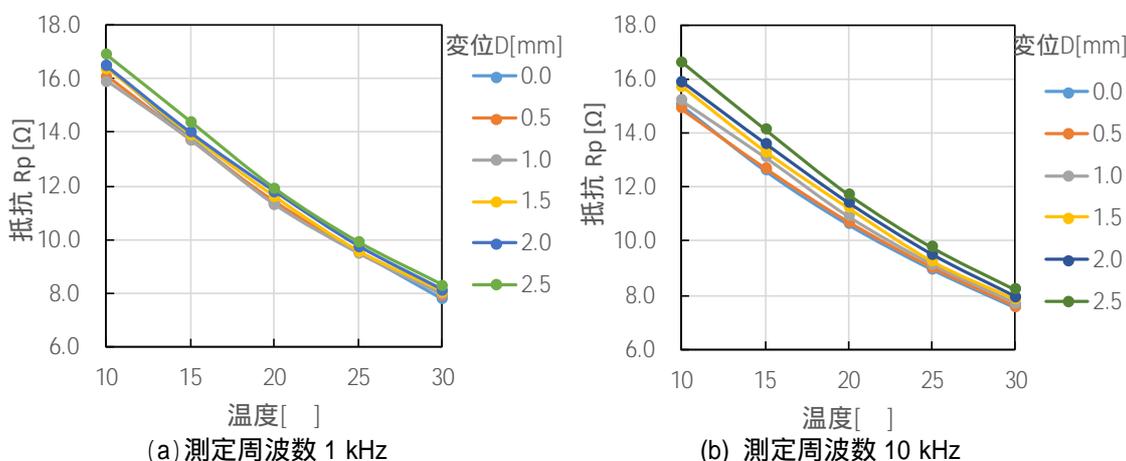


図9 抵抗の温度特性

測定周波数 1 kHz の特性をもとに、入力情報である温度 T と変位 D を求める 2 変数の応答曲面関数を導出した。今回の特性より、温度 T と変位 D の応答に対する近似関数 $f(R, C)$ として、次の 2 次多項式を用いた。

$$f(R, C) = a_1 R^2 + a_2 RC + a_3 C^2 + a_4 R + a_5 C + a_6 \quad \dots (1)$$

(1)式と接触力 F および温度 T の設定値との差の二乗和を求め、これが最小となるように、係数 $a_1 \sim a_6$ を算出した。導出した温度 T および変位 D の応答関数の 3 次元グラフを図 10(a), (b) にそれぞれ示す。図 10 より、静電容量 Cp と抵抗 Rp が得られると、この応答関数を用いて温度 T 変位 D が一意に求まることが確認できる。

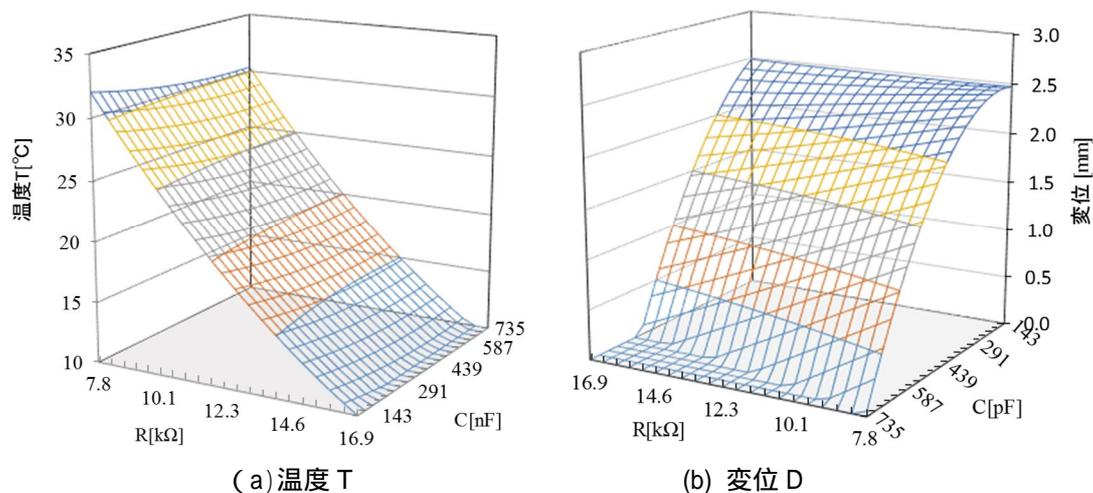


図 10 静電容量と抵抗から温度と変位を求める応答関数

本研究では、温度センサとして用いられているサーミスタ素子周囲の媒質空間の変形を利用して従来の触覚センシング技術とは異なるアイデアを考案し、実験モデルによってその実現可能性を調べた。その結果、一手法として二次の応答関数を用いると NTC 型サーミスタ素子の電気的パラメータの測定のみで温度と変位の二つの情報を取得可能であることがわかった。ポリマー受容器の代替モデルとして実装するためには、リアルタイム処理、チューブ内の配置や安定性の問題も残されているゆえ、今後の検討課題である。本手法は、データ処理のプロセスが必要となるものの、人工皮膚内に組み込むセンサ素子を同種類の素子とすることが可能なため、皮膚感覚のように複数の感覚情報を検出する場合には、構成が簡単化され、かつモジュール化にも適する利点がある。

5. 主な発表論文等

2019 年度に特許出願のため、発表論文等は無し。