

令和元年6月24日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17737

研究課題名(和文)単一MEMSセンサによる視感・触感・温冷感を含む質感のアクティブ計測

研究課題名(英文)Active Measurement of Surface Texture Including Visual, Tactile, and Warm/cool sensations Using Single MEMS Sensor

研究代表者

寒川 雅之(Masayuki, Sohgawa)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70403128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は接触力・温度・光に感度を持つ複合MEMSセンサを近接・接触させることで物体の触り心地や温冷などの質感を定量的に評価可能とすることを目的とした。センサの接触部の形状や材料を最適化することで、感度と耐湿性・耐薬品性を向上した。また、人が物体を触る際の動きや荷重を調べ、それを参考にセンサにより同様の計測を行うシステムを構築した。さらに、センサによる計測結果と人による質感に関する官能試験のスコアの相関性を分析し、計測結果から抽出したデータが官能試験スコアと強い相関を示すことを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、これまで人を使った評価に頼ることが多かった物体の触り心地、見た目、温かさなどの質感を、一つの小型センサチップにより数値化できることを示唆したものである。これにより、例えば衣服などの着心地のデータ化や人が道具を扱うときの感覚などを可視化でき、これらの情報伝達の円滑化や遠隔への伝送、あるいは感覚提示装置との組み合わせで仮想的に質感を伝えることが将来的に可能になると考えている。

研究成果の概要(英文)：This work is aimed that surface texture including tactile and warm/cool sensation can be evaluated quantitatively by approaching and contact of the MEMS combination sensor with sensitivity to contact force, temperature, and light. Sensitivity and water and chemical resistance were improved by optimization of shape and material of the contact bump of the sensor. Action and contact force by human touching were measured and similar measurement system was constructed using the sensor. Furthermore, correlativity between measurement results using the sensor and scores of texture evaluation in human sensory test and it was demonstrated that extracted sensor data have strong correlation with sensory scores.

研究分野：センサ・マイクロマシン工学

キーワード：触覚センサ 温冷覚センサ 質感計測 複合センサ マイクロセンサ 感性評価

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

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車や家電製品等の工業製品に付加価値を与えて他製品との差別化を図るために、快適性や高級感等をもたらす「質感」のデザインへの期待が高まりつつある。また、今後普及が期待される医療福祉や食品・農作物の分野におけるロボティクスでは、硬軟や滑り、色などの「質感」をフィードバックした対象物の取り扱いが重要である。人間が感じる質感は、主に触覚と視覚から複合的に構成されるが、従来その評価は人間の感性に頼っており、定量性や再現性に欠ける。表面粗さや摩擦、弾性率、熱伝導率等の質感に影響する個々の物理的特性により評価する手法もあるが、計測すべきパラメータが非常に多く、時間とコスト面での課題があり、質感そのものを定量的に表す指標が期待されている。このような流れの中、研究代表者らは単一の素子で垂直・剪断荷重と光、温度を検知可能な複合 MEMS センサの研究を行っている。これは微小カンチレバーが透明なエラストマに埋め込まれた構造であり、接触時のエラストマの変形をカンチレバーの変位によるひずみ抵抗変化として検知できる。さらに、同一のセンサで光と温度を基板材料である単結晶 Si のインピーダンス変化として検知可能である。このセンサを対象物に接触させ、押込んだりなぞったりすることで、硬さや摩擦、表面粗さ等に応じた出力変化が得られる。また、同じセンサにより対象物の色や熱伝導の違いを反映した出力変化を得ている。これにより、一つの小型センサで触感・視感・温冷感を含んだ質感計測の可能性を見出ししてきた。しかし、対象物との接触部であるエラストマは、質感を構成する摩擦や伝熱に関係し、最適な計測のためには表面形状や材質・構造の検討が必要であり、さらに詳細な接触状況を知るためには検知部の小型化も重要である。また、湿潤環境など様々な環境での応用や医療福祉や食品の取り扱いにおける洗浄・消毒を想定するとセンサは耐湿性や耐薬品性を備える必要がある。加えて、人間の場合、触る対象物の視覚的・触覚的特徴に応じたアクティブな探索行為を行っており、より人間の感性に近い質感計測のためには、人間の探索行為と同様、センサの出力をフィードバックして動きをアクティブに制御した計測が必要である。さらに、人間による感性的評価との詳細な比較は、本センサの感性的質感の指標としての有効性を示すために必要である。そこで、本研究では、本センサを用いてより人間が感じるのに近い質感計測を行うため、下記の3項目について実験を行い、感性的質感の定量的評価法としての有効性を示す。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、多軸接触力・光・温度を複合的に検知可能な MEMS センサを用いてより人間が感じるのに近い質感計測を可能とするために、人間の指先の構造や観察・触察行動を基にしたセンサの設計とアクティブな計測手法の開発を行うとともに、人間の感性的評価との相関性を分析することで質感計測手法としての有効性を示すことである。

### 3. 研究の方法

#### (1) センサの設計最適化

本センサの垂直方向および水平方向の力・光・温度に対する感度は、カンチレバーのサイズやエラストマの形状・材料に大きく依存する。また、接触対象物の濡れや湿潤環境での計測の場合、あるいは医療福祉や食品産業での殺菌消毒が必要な場合、センサには耐水性や耐薬品性が重要であり、これらについて材料の選定や設計の改良を行った。

#### (2) 人間の触察行動とそのフィードバック

センサによるアクティブ計測時の動きに反映させるため、被験者を公募し、人がものを触るときの指先の荷重やなぞりの速度をフォースプレートや加速度センサにより計測した。その結果から、その触り方の共通点や触る対象による違いについて分析し、センサを用いて同様に計測する測定システムの構築を行った。

#### (3) センサによる質感計測と官能試験との相関性分析

センサを様々なサンプルに接触させ、なぞり計測を行った。また、センサをヒータで加熱し、サンプルに接触させる計測を行うことで、センサからサンプルへの伝熱の違いによる温冷間の違いを評価した。さらに、サンプルに LED 光を照射しその反射光をセンサで検出することで、光による質感の違いを評価できるか検討した。

同じサンプルを用いて、前項と同様に公募した被験者により官能試験を行った。触ったサンプルについて硬軟、温冷、粗細などの形容詞対について7段階の SD (Semantic Differential) 法によるスコア付けを行い、その被験者間の平均と標準偏差を求めた。

### 4. 研究成果

#### (1) センサの新設計とその評価結果

従来のものとサイズを変更したカンチレバーを設計・試作し、力に対する感度の比較を行った。図1に試作したカンチレバーの電子顕微鏡像を示す。カンチレバーの長さは、従来のものが290  $\mu\text{m}$ であるのに対し、新たに設計したものは155  $\mu\text{m}$ である。カンチレバー上にコの字状にNiCr薄膜ひずみゲージを形成しており、図2にエラストマに封止後の印加せん断力に対するその抵抗変化を示す。新たに設計したセンサが従来に比べても高い感度を持っていることが分かる。小型化したことにより、これまでよりも同面積に対して高密度にカンチレバーを配置することが可能になり、部分接触などのより詳細な接触状況が検知可能となった。

次に、エラストマの形状・材料について検討した。水平方向に印加されるモーメントの増大を狙い、図3のような従来よりもエラストマを高くしたセンサを試作した。図4に力を印加した時の応答を示す。力に対する変化は従来のものに比べて約7倍大きく改善された。また、耐水性や耐薬品性に優れたエラストマ材料として、従来のPDMS(ポリジメチルシロキサン)に代わり、フッ素系エラストマ(SIFEL、信越化学工業)を用いたセンサを試作した。PDMSを用いたセンサでは、水溶液中では水の透過によりセンサチップ上の配線やチップと基板間のボンディングワイヤで短絡が起き、大きなノイズが発生し測定が不可能になり、またアルコール中ではPDMSが膨潤を起こすため感度が低下する。一方、フッ素エラストマを用いたセンサでは、水溶液中でもアルコール中でも大気中と変わらず計測が可能であった。これにより、湿潤環境や消毒殺菌処理に耐えうるセンサが実現できた。

### (2)人間の触察行動とそのフィードバック

図5にある被験者が木綿(Cotton)のサンプルを触った時の指先の移動を示す。指先を往復させてサンプルをなぞるように触っているが、この時の移動時の傾きは直線的であり、速度は一定に近い。布類のサンプルを触る場合、個人差はあるもののどの被験者もおおよそ移動中は一定速度で、おおよそ100 mm/sの速度でなぞる傾向があった。また、同時に計測した垂直荷重の変化を図6に示すが、なぞっている間の荷重はおおよそ0.3 N程度で大きくは変化しない傾向にある。こちら被験者により個人差はあるがおおよそ0.2~1.0 Nの範囲であり、またなぞっている間は荷重が一定になる傾向にあった。一方、サンプルが金属や樹脂など硬いものの場合、荷重についてはほぼ布類と同様であったが、なぞり速度については一定ではあるものの布類よりはおおよそ250 mm/sと数倍速くなっていることが分かった。この結果をもとに、なぞり速度および接触荷重をコントロールしてセンサにより計測を行うシステムを制御ソフトウェア(LabView)と3軸電動ステージ、力覚センサを用いて構築した。

### (3)センサによる質感計測と官能試験との相関性

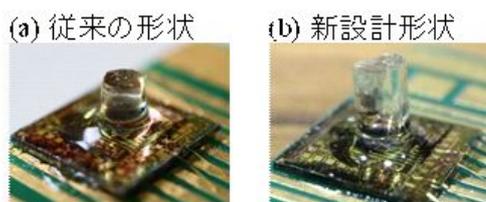


図3 エラストマ形状の設計

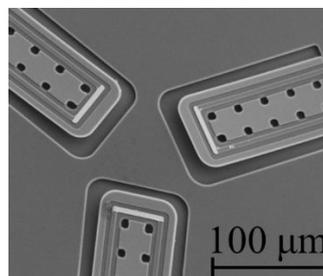


図1 小型化したカンチレバーの電子顕微鏡写真

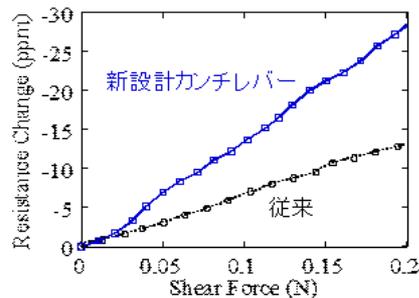


図2 新設計カンチレバーの印加せん断荷重に対するひずみゲージ抵抗変化

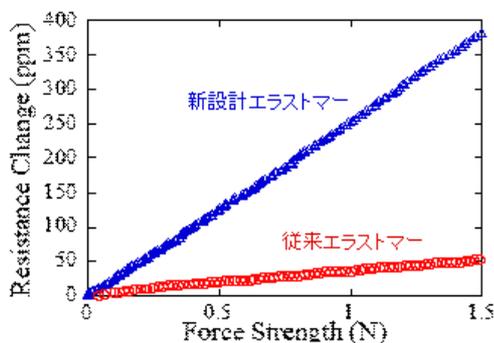


図4 新たなエラストマ形状のセンサの力に対する応答計測結果

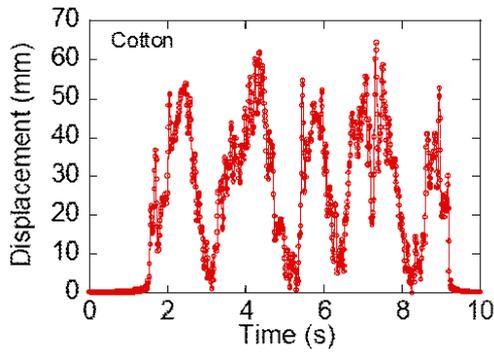


図5 官能試験時の人の指先移動計測例

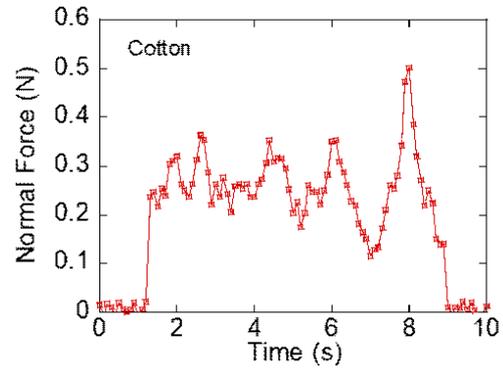


図6 官能試験時の指先の荷重変化計測例

布類や金属・樹脂などのサンプルに対して、センサにより前項で構築したシステムを用いてなぞり計測を行った。図7に布類に対するなぞり計測の結果を示す。横軸は測定開始からの経過時間を示しており、センサを一定垂直荷重(0.5 N)でサンプルに押し当てた状態で、プログラムにより測定開始後5秒から水平方向にステージを動かしてなぞらせたときのセンサのひずみ抵抗変化が縦軸である。水平移動開始後、ひずみ抵抗は増加しているが、その変化の大きさは布の種類に大きく依存している。これは、サンプルとセンサが滑り始めるまでの静止摩擦力の増大に対応しており、静止摩擦係数の違いを反映したものであると考えられる。さらにその後の変化も布の種類によって増減を繰り返したり、単調に増加したりと異なっている。これは動摩擦の変化や表面凹凸に対応したものと考えられる。

次に、センサをヒータで加熱して接触させた時の木綿(Cotton)と毛皮(Fur)の場合の比較を図8に示す。横軸は計測開始からの経過時間、縦軸はセンサの温度に依存するインピーダンス変化を示している。センサとサンプルが少し離れた状態から計測を開始し、近接させていき30秒付近でサンプルに一定荷重(0.4 N)にて接触させているが、接触前後からインピーダンスが増加を始め一定時間後に飽和するような変化を示している。これは、センサからサンプルへの伝熱によりセンサの温度が低下し、センサのSi中のキャリアが減少することによるものである。その増加の大きさを比較すると、木綿で大きく、毛皮では小さくなっており、木綿では比較的熱が伝わりやすく、毛皮では空隙が多く熱が伝わりにくいためであると考えられる。このように、サンプルによる伝熱差による温冷の違いを本センサにより評価可能である。また、LED光を表面粗さの異なるアルミ板サンプルに照射したときの反射光によるインピーダンス変化はサンプルの材質や表面粗さ、照射角度に依存することが実験により示され、サンプルの光沢感などの視覚的な質感も本センサにより評価できる可能性を示唆した。

上記で得られた主になぞり試験の結果と官能評価のスコアの相関性を調べた。センサの測定開始時に対するひずみ抵抗変化の時系列データから、5秒ごとのデータおよび直前5秒前のデータとの差分を抽出し、これらと官能試験のスコアの線形回帰分析により相関係数を求めた。図9にその例を示す。図9(a)は開始10秒後のセンサのデータと温かさのスコアの散布図である。ここから相関係数を求めると、 $R=-0.82$  となり、強い負の相関を示していることが分かる。これは、温かいものほど主に滑り出すまでの静止摩擦力によるセンサのひずみ抵抗変化が小さいことを示しており、布の種類による真実接触面積の違いを反映しているものと考えられる。一方図9(b)は50秒～55秒のデータの差分と細かさのスコアの場合であり、 $R=-0.84$  とこちらも強い負の相関を示している。こちらは細かさのスコアが大きいほどセンサのデータの変動が小さいことを示しており、布の凹凸と関連していると考えられる。金属や樹脂についても、質

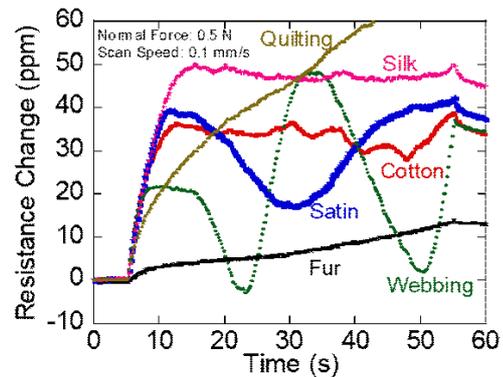


図7 布類サンプルのセンサによるなぞり計測結果

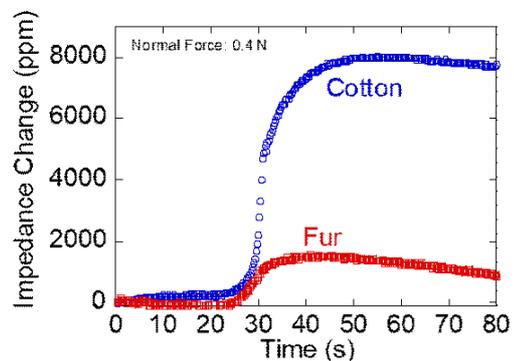


図8 接触後の伝熱によるセンサのインピーダンス変化計測例

感の評価項目は若干異なるが、同様にセンサから抽出したデータの中に官能評価のスコアとの相関が高いものがあり、それらを実験することでセンサデータから定量的に質感を推定できる可能性を示したといえる。

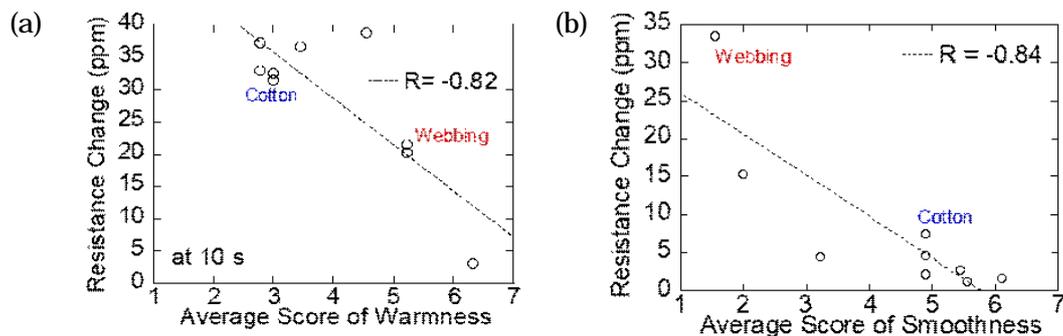


図9 センサによる計測結果から抽出したデータと官能試験スコアとの相関。(a)10秒時点のデータと温かさスコア、(b)50秒～55秒のデータ差分と細かさスコア

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

木藤 潤、阿部 祐太、佐藤 周平、安部 隆、野間 春生、寒川 雅之、触覚センサによる多層柔軟物モデルの計測と有限要素解析、電気学会論文誌E、139巻、査読有、2019、pp.149-154  
DOI: 10.1541/ieejsmas.139.149

Ryoma Araki, Takashi Abe, Haruo Noma, Masayuki Sohigawa, Miniaturization and High-Density Arrangement of Microcantilevers in Proximity and Tactile Sensor for Dexterous Gripping Control, Micromachines, Vol.9, 査読有, 208, 301  
DOI: 10.3390/mi9060301

難波 勇太、安部 隆、寒川 雅之、光・ひずみ複合触覚センサを用いたポリオキシメチレン樹脂の表面形状・色計測による質感評価、電気学会論文誌E、138巻、査読有、2018、pp.250-256  
DOI: 10.1541/ieejsmas.138.250

Kenta Takahashi, Takashi Abe, Masanori Okuyama, Haruo Noma, Masayuki Sohigawa, Surface Texture Characterization Using Optical and Tactile Combined Sensors, Sensors and Materials, Vol.30, 査読有, 2018, pp.1091-1101  
DOI: 10.18494/SAM.2018.1786

Ryoma Araki, Takashi Abe, Haruo Noma, Masayuki Sohigawa, Electromotive Manipulator Control by Detection of Proximity, Contact, and Slipping Using MEMS Multi-axial Tactile Sensor, Electrical Engineering in Japan, Vol.204, 査読有, pp.44-49  
DOI: 10.1002/eej.23098

荒木 凌馬、安部 隆、野間 春生、寒川 雅之、近接・接触・滑りを検知できるMEMS多軸触覚センサを用いた小型電動マニピュレータ制御、電気学会論文誌E、査読有、137巻、2017、pp.212-217  
DOI: 10.1541/ieejsmas.137.212

梅木 尚、野沢 瑛斗、奥山 雅則、野間 春生、安部 隆、寒川 雅之、近接覚・触覚コンボセンサにおける周波数変調プローブ光を用いた近接計測手法の検討、電気学会論文誌E、査読有、137巻、2017、pp.146-150

〔学会発表〕(計8件)

Takumi Takahashi, Shuhei Sato, Takashi Abe, Haruo Noma, Masayuki Sohgwawa, Tactile Sensor Using Microcantilever Embedded in Fluoropolymer for Water and Ethanol Resistance, Transducers 2019, 2019

志和 昂、難波 勇太、安部 隆、寒川 雅之、MEMS 触覚センサによる材質感計測と感性評価との比較、交通・電気鉄道/マイクロマシン・センサシステム合同研究会、2019

佐藤 周平、安部 隆、寒川 雅之、湿潤・水中環境でも計測可能なフッ素エラストマを用いた触覚センサ、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、2018

寒川 雅之、触覚センサと質感定量評価の試み、第5回 EIIRIS インテリジェントセンサ・MEMS 研究会、2018

志和 昂、佐藤 文哉、高橋 賢太、安部 隆、寒川 雅之、野間 春生、MEMS 触覚センサによる布の接触温冷感と風合いを合わせた評価、第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2017

志和 昂、佐藤 文哉、高橋 賢太、安部 隆、野間 春生、寒川 雅之、接触力・光・温度複合 MEMS センサによる布の温冷感センシング、平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会、2017

難波 勇太、安部 隆、寒川 雅之、光・ひずみ複合 MEMS センサによるポリオキシメチレン樹脂加工表面の質感評価、平成29年度電気学会 E 部門総合研究会、2017

Fumiya Sato, Takashi Shiwa, Kenta Takahashi, Takashi Abe, Masanori Okuyama, Haruo Noma, Masayuki Sohgwawa, Texture Measurement for Fabrics Including Warm/cool and Fluffiness Sensation by Multimodal MEMS Sensor, Transducers 2017, 2017

〔図書〕(計1件)

寒川 雅之、他23名、情報機構、生体情報センシングデバイス～センサ設計に求められる要素技術・課題と対策ノウハウ～、2018、pp.165 177

〔産業財産権〕

〔その他〕

マイクロセンサのIoT、ロボット、ヘルスケアへの応用、第2回ナノテク研究センター活用セミナー、2019

展示会出展、SEMICON Japan, 2018

触覚センシングによる触感の可視化、新大産学交流フェスタ、2018

触覚センシングによる触感の可視化、燕三条ものづくりメッセ、2018

出前講義(栃木翔南高等学校)、2018

展示会出展、SEMICON Japan, 2017

展示会出展、SCF/計測展 TOKYO、2017

出前講義(新潟第一高等学校)、2017

出前講義(長野県諏訪二葉高等学校)、2017

MEMS 触覚センサとその応用展開、電気学会圧電 MEMS 調査専門委員会、2017

接触力・光・温度複合 MEMS センサによる触り心地・見た目・温もりを含む質感計測、平成29年度第1回新潟大学シーズプレゼンテーション(新潟大学首都圏懇話会)、2017

6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

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、研究者個人に帰属されます。