

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820083

研究課題名(和文) 柔軟物の手触り感を計測する皮膚構造規範型MEMS触感センサ

研究課題名(英文) Skin-type MEMS haptics sensor to measure the textile

研究代表者

野田 堅太郎(NODA, Kentaro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：00547482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：人は物体をなぞった際に指先に生じる振動を、接触力の特定周波数での時間変化を検出する触覚受容器(マイスナー小体(FAI)、パチニ小体(FAI))によって計測することで、sub- μ m厚みのテクスチャを判別していると考えられている。そこで人の触覚受容器、特にマイスナー小体の構造を規範とし、微小液滴をメカニカルフィルタとして用いることで、皮膚のように接触力の時間変化を検出することが可能な皮膚状触感センサを実現する。このセンサ素子の表面に指紋状の凹凸構造を設けることで、テクスチャの計測を実現する。

研究成果の概要(英文)：Human can detect sub- μ m thick texture by measuring a vibration occurred between their finger prints and the texture with several tactile receptors which can measure the time variation of the contacting force: such as Meissner's corpuscle(FAI), and Pacini's corpuscle(FAI). To figure out the efficiency of these tactile receptors and to realize their mechanical characteristics, we fabricated a skin-like tactile sensor based on the structure of Meissner's corpuscle. The sensor which can measure the time variation of the shear force. The sensor are composed by encapsulating the silicon piezoresistive cantilever inside a viscous liquid filter as similar as the structure of Meissner's corpuscle. By using this sensor we realized to measure a micro size and thick textile formed on different friction coefficient substrate.

研究分野：マイクロセンシング

キーワード：センサ 触覚 MEMS

1. 研究開始当初の背景

人の指先には、接触力とその時間変化に応答する2種類の触覚受容器が高密度に分布しており、点字のような大きな凹凸から毛髪表面の sub- μm 厚みのテクスチャまで、物体の表面をなぞるだけで微細な表面形状の差を判別することができる。これらの触覚受容器を形成する神経は同一のものであるものの、神経周囲の構造が変わることで、異なる応答特性を実現している。

こうした皮膚の触感機能を解明するため、物体をなぞった際の接触力を計測するセンサが研究されている。しかしこれまでのセンサは、 μm サイズの微小な皮膚の表面構造や触覚受容器の機能を実現しておらず、接触力のみを計測するに止まっている。このため、毛髪や布のような物体をなぞる場合、摩擦や変形の影響に埋もれ、テクスチャの判別はできていない。

人の触感、特にテクスチャの計測機能を解き明かすためには、皮膚の表面構造や触覚受容器の機能を規範とし、力とその時間分布を独立に計測するセンサ構造を実現する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、毛髪や布などの柔軟物の表面状態を見分ける人の高感度な触感機能を解明するため、皮膚および触覚受容器の構造を規範として力の変化・振動成分に応答する皮膚状触覚センサを実現し、柔軟物に触れた時に人が感じる触感情報の解明を目的とする。

毛髪や布のような柔軟物は、摩擦係数が高く、容易に変形する。このため、従来の力センサを用いて、表面を計測しても、微細なテクスチャ情報は摩擦や変形に埋もれ、検出できなかった。一方、人は物体をなぞった際に指先に生じる振動を、接触力の特定周波数での時間変化を検出する触覚受容器 (マイスナー小体(FAI)、パチニ小体(FAII)) によって計測することで、sub- μm 厚みのテクスチャを判別していると考えられている。これらの触覚受容器は、刺激受容体である神経を粘性液体で満たされた細胞壁で覆っている。

そこで人の触覚受容器、特にマイスナー小体の構造を規範とし、微小液滴をメカニカルフィルタとして用いることで、皮膚のように接触力の時間変化を検出することが可能な皮膚状触覚センサを実現する。このセンサ素子の表面に指紋状の凹凸構造を設けることで、テクスチャの計測を実現する。

3. 研究の方法

皮膚状触覚センサを実現するに当たり、弾性体・微小液滴の変形を計測するための計測素子として、厚み 300 nm のシリコンの表面に深さ 100 nm までリンイオンを拡散したシリコンピエゾ抵抗を用いる。このシリコンピエゾ抵抗を 200 μm 角の先端構造を幅 20 μm 、長さ 100 μm の2本のヒンジ構造で支

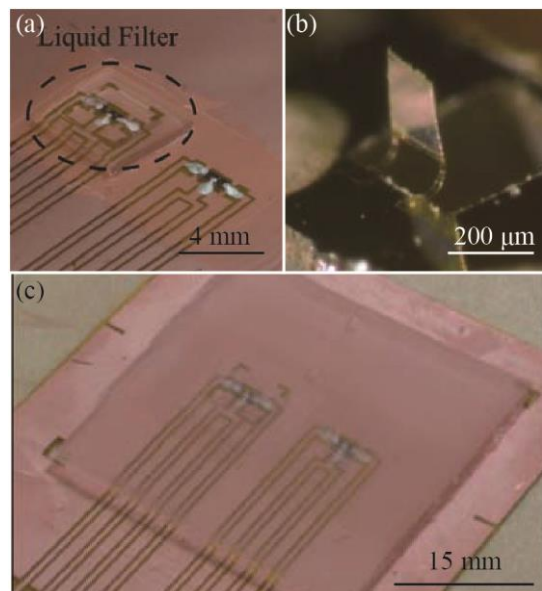


図 1. 試作した皮膚上触覚センサ。(a) センサ内部の液体フィルタ構造、(b) 片持ち梁状シリコンピエゾ抵抗、(c) 皮膚状触覚センサ。

持した片持ち梁状に加工し、先端部分にニッケル層を形成した。このニッケル部分に磁場を加えて3次元構造方向に変形し、有機薄膜であるパリレン膜を 1 μm 蒸着して固定することで、なぞり方向の力・振動を計測可能な計測素子を実現した (図 1.(b))。本研究では、人の指先と同程度の曲率 60 mm^{-1} の半円中上にセンサを取り付けてテクスチャの計測試験を行うために、計測素子をポリイミド/銅基板の銅部分をウェットエッチングによってフレキシブル配線上に計測素子を接着・配線して使用した。

この計測素子を、粘性液体を封止したフィルタ構造に包み込み、弾性体中に配置することで皮膚状触覚センサを実現した。配線基板上に配置した計測素子の周囲に、中央に 3 mm 角の中空構造を形成した 4 mm 角で厚み 1 mm のシリコーンゴム (PDMS; Polydimethylsiloxane) の枠組みを配置した。この覆いの中を粘性液体で満たしたのち、液体の表面に厚み 1 μm のパリレン膜を直接蒸着することで、液体を枠組み中に封止した (図 1.(a))。パリレン膜を用いて液体を封止することによって、弾性体への埋め込みを行う際に粘性液体と弾性体とが混じりあうことを防いでいる。

液体フィルタ構造の上に PDMS を用いて作製した指紋状構造体を配置する。指紋状構造体は、金属シリコンをプラズマエッチングによって加工して作成した金型に PDMS を流し込むことで作製した。指紋状構造は皮膚の角質・表皮にあたる部分であり、高い剛性が必要である。このため使用する PDMS は主剤と硬化剤とを 10:1 の割合で混合して作製し、ヤング率 550 kPa 程度の構造を実現した。また指紋部を規範とした凸構造の下に厚み 1 mm の平坦な構造部分を形成した。その後スペーサを用いて指紋状構造を液体フィ

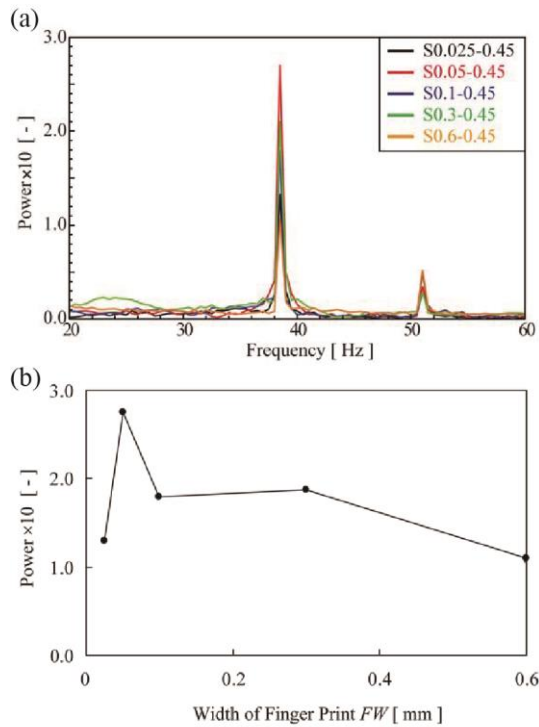


図 2. 指紋状構造の幅と物体表面なぞり時のセンサ感度の比較。(a) センサ出力のフーリエ変換結果、(b) 38 Hz での応答比較。

ルタ構造の上に配置し、指紋状構造と基板との間をシリコンゴムで埋めることで、指紋状構造体を基板上に固定した。指紋状構造体と基板との間のシリコンゴム部は人の真皮にあたる構造である。皮膚の場合真皮部分は表皮部分よりも柔軟であり、ヤング率に換算すると表皮の約 50% 程度の剛性となることが報告されている。そこで、指紋状構造体を固定するためのシリコンゴムには、主剤と硬化剤とを 50:1 の割合で混合した PDMS 試料を用いた。主剤の混合比率を落とすことで、PDMS のヤング率は 230 kPa となり、指紋状構造体との剛性比が皮膚の表皮・真皮の剛性比とほぼ同程度の構造を実現した。またセンサを曲面に貼りつけることが可能なように、50:1 混合比の PDMS の厚みは 1 mm とした。

試作した皮膚状触覚センサを図 1 (c) に示す。試作した触覚センサでは、加わった力の参照用に片持ち梁型のシリコンピエゾ抵抗センサ素子を三次元的に固定した構造のみを液体フィルタ中に配置した構造と並列に、30 mm 離して配置した。

4. 研究成果

4.1. 指紋構造形状とセンサ感度との関係

指紋状構造の形状がテクスチャ表面をなぞった際のセンサ出力に与える影響を検証するため、指紋型構造の幅 FW[mm]、構造間のギャップ FG[mm] の影響を計測した。この実験では、なぞり対象として幅 100 μ m の凸構造を 400 μ m ピッチで配置したシリコン部材を使用した。このシリコン部材の表面に各皮膚状触覚センサを 0.2 N の接触力

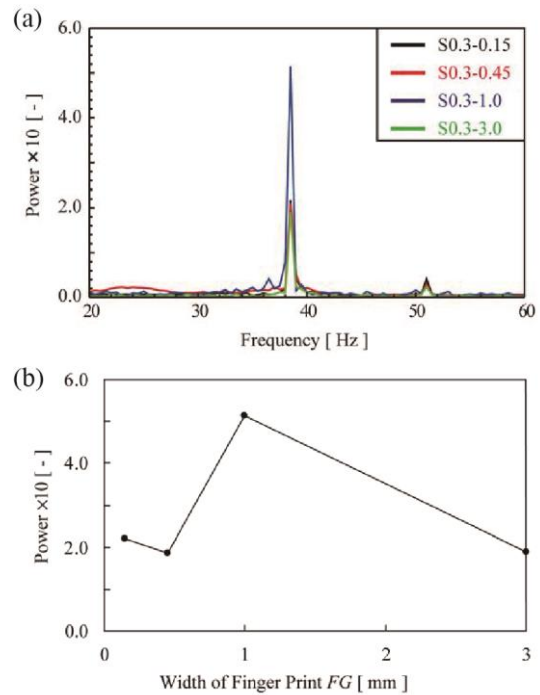


図 3. 指紋状構造の配置ピッチと物体表面なぞり時のセンサ感度の比較。(a) センサ出力のフーリエ変換結果、(b) 38 Hz での応答比較。

で押し付け、15 mm/s の速度でなぞった際のセンサ応答を比較した。本実験では、指紋状構造にシリコンピエゾ抵抗片持ち梁を直接埋め込んだ構造の出力を参照した。

まず指紋型構造間のギャップ $FG=0.45$ mm で一定に設定し、 $FW=0.025\sim 0.6$ mm まで変化した構造を用いてシリコン構造体表面をなぞった際のセンサ出力を FFT 周波数解析し、計測対象表面の凸構造の周期と等しい、38 Hz での振幅値を比較した結果を図 2(a)、(b) に示す。

この結果が示すとおり、センサの応答は指紋型構造の幅が 0.6 mm より細くなるに従って出力が単調増加する。これは触覚センサ表面に指紋型構造が存在する場合、2.4 に論じたとおり、なぞり対象の起伏にセンサ表面の構造がかみ合い、センサをせん断方向に変形させる。このため、指紋型構造の幅が広くなるにつれ、物体表面の起伏間に指紋型構造が入り込むことができなくなり、出力が減少するものと考えられる。また $FW=0.025$ mm での出力が $FW=0.1$ mm の場合よりも小さくなっている。これは指紋型構造のアスペクト比が高くなることで変形が表面部で吸収され、内部に伝達されないことが原因であると考えられる。

次に指紋型構造の幅 $FW = 0.3$ mm に固定し、ギャップ幅を $FG = 0.15\sim 3.0$ mm まで変化した際のセンサ出力を図 3(a)、(b) に示す。

$FG=0.15\sim 1.0$ mm までの場合、指紋型構造間のギャップが広がることでセンサの出力が増加する。これは、センサ表面の指紋型構造間の距離が広がることで、物体表面の起伏と

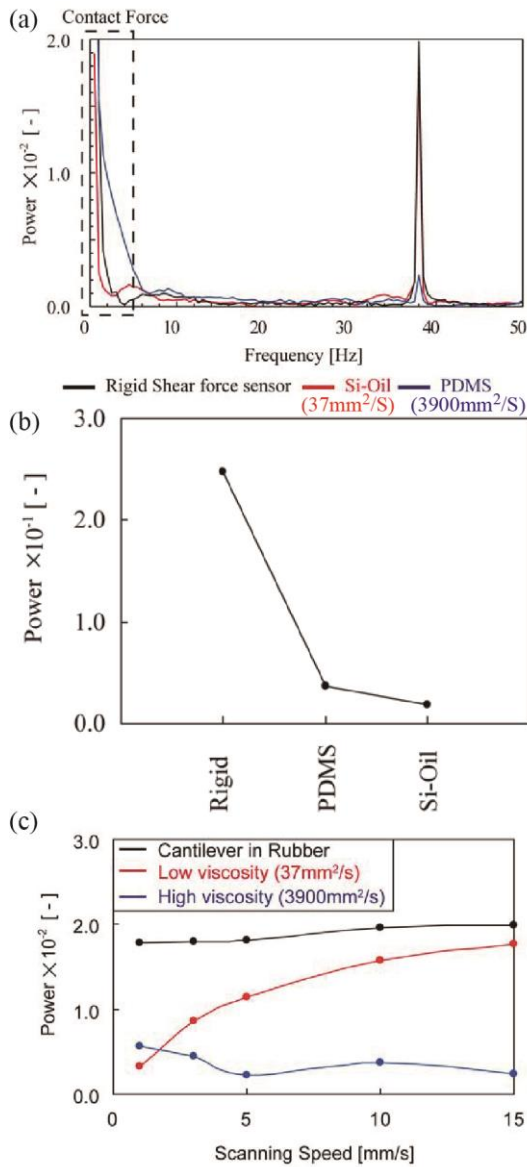


図 4. 液体フィルタに使用した粘性液体の粘度となぞりに対するセンサ応答の比較。(a) 15 mm/s で物体表面をなぞった際の出力値のフーリエ変換結果、(b) DC 成分の出力値比較、(c) 物体の配置周期でのセンサ出力値比較。

の接触において指紋型構造が変形しやすくなったことが原因と考えられる。一方で、FG=3.0mm の場合にはセンサの出力が著しく減少する。これは、なぞりにおける触覚センサの出力が指紋型構造と物体表面の起伏の二つの周期を足し合わせた結果となることが原因の一つであると考えられる。FG=1.0mm 以下の場合のように指紋型構造が密に存在する場合には指紋型構造が物体表面の起伏と触れる頻度が高くなりセンサ感度が上昇したと考えられる。

これらの結果から、本実験で使用したシリコーンゴムおよび表面・深部のシリコーンゴムの剛性比を選択した場合、指紋型構造のアスペクト比が 1 前後であり、指紋型構造間のギャップが指紋型構造の幅 3 倍程度である場合に感度が最大となることを確認した。

4.2. 液体粘性とテクスチャ計測性能の比較

一方、物体のテクスチャを計測するため、より人の指紋構造に合致した、指紋構造幅 300 μ m、指紋型構造間ギャップ 150 μ m の指紋型構造を有する皮膚状触覚センサを実現し、物体表面をなぞった際のテクスチャ計測時の特性を検証した。

各液体を封止した皮膚状触覚センサを用いて幅 0.1mm ギャップ 0.3mm のシリコン凸構造を 15mm/sec の速度でなぞり、粘性の異なる液体フィルタ中に配置したシリコンピエゾ抵抗片持ち梁構造出力を比較した結果を図 4 に示す。図 4(a)では、センサ出力を FFT 変換した結果のうち DC~40 Hz までのパワースペクトルを比較した。また参考として、皮膚状構造体のシリコーンゴム中に直接埋め込んだシリコンピエゾ抵抗片持ち梁の抵抗値変化のパワースペクトルを記載した。各成分のうち、DC 成分のみを比較した結果を図 4(b) にしめす。

図 4 (b) の結果から、センサ出力の DC 成分値は、粘性が低い液体中に片持ち梁構造を配置することによって減少することを確認した。フーリエ解析結果の DC 成分は、なぞりによって発生した接触面との摩擦成分が支配的となる。この結果から、提案する構造は摩擦成分を削減してテクスチャを計測することが可能であることを確認した。

またなぞり速度を 1~15 mm/s まで変えて物体をなぞり、物体を各速度でなぞった際のセンサ出力の計測対象上の凸構造とセンサとが接触する周波数成分のパワースペクトルを比較した結果を図 4 (c) に示す。この結果が示すように、シリコーンゴム中に配置した片持ち梁素子はなぞり速度の変化に関係なく、シリコン表面の起伏との接触による刺激に対してほぼ一般的な応答を示した。一方、低粘度の液体フィルタ中に素子を配置したセンサでは、なぞり速度 15mm/sec ではフィルタなしの素子とほぼ等しい出力を示すものの、なぞり速度が減少するにつれ出力が単調に減少した。これとは反対に高粘度液体フィルタ中に素子を封止したセンサでは、なぞり速度が遅くなるにつれ出力が増加し、なぞり速度が 1mm/sec、周波数が 2.5Hz の刺激に対しては、低粘度液体に配置したセンサよりも高い出力を示した。この結果から、提案する構造は、摩擦などの DC 成分を除外することができるだけでなく、マイスナー小隊のように特定周波数の入力にตอบสนองするバンドパスフィルタとしての特性を実現できることを確認した。

4.3. テクスチャ計測試験

試作した皮膚状触覚センサのテクスチャ計測性能を評価するため、表面形状の異なる二種類の木材 (合板・チーク材) の表面をセンサでなぞり、出力の周波数応答を比較した (図 5、6)。なぞり試験時の接触力は 0.2 N、なぞり速度は 15 mm/s に設定した。またセ

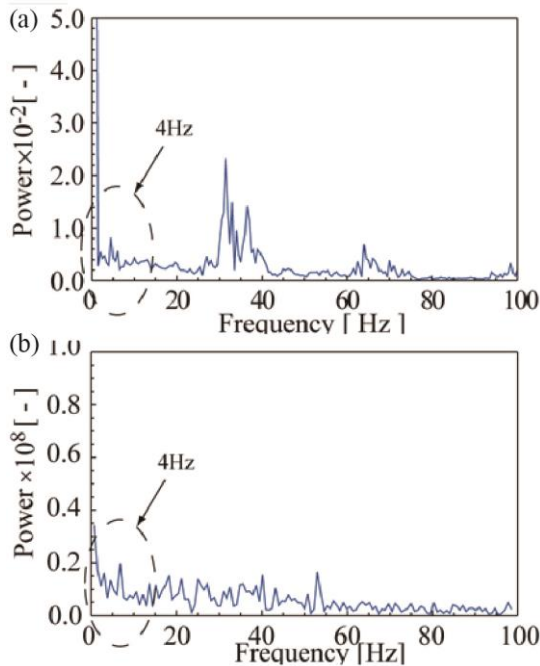


図5. 合板表面をなぞった際のセンサ出力。(a) 皮膚状触覚センサでのなぞり結果、(b) 触針段差計で計測した表面形状。

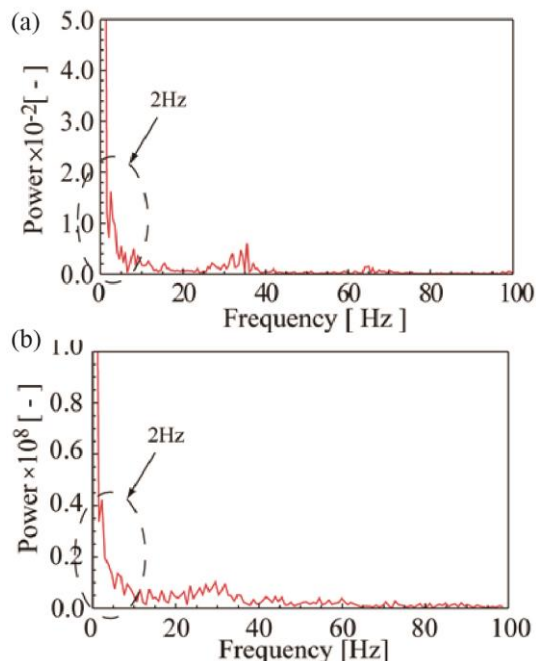


図6. チーク材表面をなぞった際のセンサ出力。(a) 皮膚状触覚センサでのなぞり結果、(b) 触針段差計で計測した表面形状。

ンサでの表面テクスチャの計測結果の正確性を評価するための比較資料として、二種類の木材の表面テクスチャを触針段差系で計測した結果を周波数解析した(図5(b)、6(b))。

この結果から、合板をなぞった場合には2Hzに、チーク材をなぞった場合には4Hzにそれぞれ特徴的な出力ピークが計測された。各木材表面のプロファイルをフーリエ変換した結果でもセンサ出力と類似した傾向・ピークが存在していることから、作成した皮膚状触覚センサを用いて物体の表面に存在する起伏のプロファイルを計測するこ

とが可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. T. Okatani, H. Takahashi, K. Noda, T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "A tactile sensor using piezoresistive beams for detection of the coefficient of static friction," *Sensors*, Vol.16, Issue.5, article no.718, 2016, 査読あり.
2. M. Hosono, K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Dynamic performance analysis of a micro cantilever embedded in elastomer", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.25, No.7, article no.075006, 2015, 査読あり.

[学会発表] (計3件)

1. T. Okatani, H. Takahashi, K. Noda, T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "A tactile sensor for simultaneous measurement of applied force and friction coefficient," *Proc. of IEEE MEMS* pp.862-865, China, Shanghai, SHICC, 2016.
2. 岡谷 泰佑, 野田 堅太郎, 高畑 智之, 松本 潔, 下山 勲, "アーチ構造に起因する足裏力分布を利用した路面摩擦係数推定," *ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2A1-A03, 京都, みやこめっせ 2015.
3. 野田 堅太郎, 下山 勲, "液体フィルタ構造を利用した MEMS 皮膚状触覚センサに関する研究," *力触覚の提示と計算研究会*, 滋賀, 立命館大学, 2015.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 摩擦係数測定装置、摩擦係数測定システム及び歩行ロボット

発明者: 下山 勲, 松本 潔, 野田 堅太郎, 岡谷 泰佑

番号: 特開 2016-218058

出願年月日: 2016年5月13日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 堅太郎 (NODA Kentaro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号: 00547482