

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656162

研究課題名(和文)人の触覚受容器構造を規範としたMEMS触覚センサ

研究課題名(英文)MEMS tactile sensors based on the characteristics of the human tactile receptors

研究代表者

松本 潔(Matsumoto, Kiyoshi)

東京大学・IRT研究機構・教授

研究者番号：10282675

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、人の触覚受容器の構造を規範とした、幅広いダイナミックレンジを持つMEMS触覚センサの研究開発を行った。シリコンオイル中にピエゾ抵抗カンチレバーを封止した触覚センサは、力に対して微分的な応答を示し、微小な力の変動成分を高感度に検出することができた。ピラミッド構造やバンプ形状を持つ触覚センサでは、小さな力では高感度、大きな力に対しては低感度という特性を示した。これらの特性は人の触覚の特性と同様であり、力検出のダイナミックレンジの拡大に有効である。

研究成果の概要(英文): In this study, based on the characteristics of the human tactile receptors, the research and development of MEMS tactile sensors with wide dynamic range were carried out. The tactile sensor encapsulated with piezoresistive cantilevers in silicone oil showed a differential response against applied forces, and was able to detect small component of the forces with high sensitivity. The tactile sensor with a pyramidal or bump structure showed the characteristic of high sensitivity for small forces together with low sensitivity for large forces. These tactile characteristics are similar to those of the human, and effective to expand the dynamic range of force detection.

研究分野：マイクロシステム

キーワード：触覚センサ カンチレバー マイクロデバイス MEMS

1. 研究開始当初の背景

人間の触覚は、手探りするだけで髪の毛1本の存在もわかる、羽のように軽いものから本のように重いものでわかる、形状が認識できる、表面のざらつきや質感がわかる、材質と温度や熱容量がわかるなど、すばらしい特性を持っている。一方、高齢化の加速に伴い、家庭での作業を手助けするロボットの研究が進められている。ロボットが家庭内で作業するためには、人のように様々な物体を自由に操作することが必要である。しかし現在のロボットの触覚は、遠く人に及ばない。

申請者らは、現在までに人の皮膚構造を規範とし、力に対して非線形に変形する特性の材料や構造を利用した力計測方法の提案・実現を行っている。こうした材料や構造の非線形領域を活用することで、人のように幅広い力計測を実現し、ロボットによる様々な物体の操作を可能とすることができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人の触覚受容器の構造を規範とし、幅広いダイナミックレンジを持つ触覚センサを、MEMS技術を用いて創出することである。本研究では、ゴム材料や液体材料など力に対して非線形性（例えば、対数・反比例の関係など）を持つ材料や、これを用いた検出構造を工夫し、幅広いダイナミックレンジを持ったMEMS触覚センサを実現する。

3. 研究の方法

本研究では、MEMS触覚センサを実現するために、(1)微小素子周りに生じる変形・液体の流れならびに微小素子に加わる力の計測・解析、(2)不定形ないしは柔軟な物体のパターニングおよび封止方法の実現、(3)センサ応答をリアルタイムに計測・解析・処理するための情報処理用の電子回路の実現、の3つの項目を中心に研究を行なう。

4. 研究成果

(1)微小素子周りに生じる変形・液体流れならびに微小素子に加わる力の計測・解析に関連して、以下の研究成果を得た。

- ・シリコンオイル中にピエゾ抵抗ヒンジ部を持つカンチレバー構造

粘性液体であるシリコンオイル中にピエゾ抵抗ヒンジ部を持つカンチレバー構造を封止したデバイスを試作した(図1-1)。これらはシリコンゴムの筐体に封止されており、筐体表面にかかった力をシリコンオイルを介してカンチレバーで検出する方式のせん断力センサとして動作する。カンチレバーの変形は粘性液体の流れに従うので、微小な力の変動成分は高感度に検出することができ、ゆっくりした大きな力には反応しない(図1-2)。粘性液体を介するため、大きなせん断力が加わっても破壊することなく測ることができる。

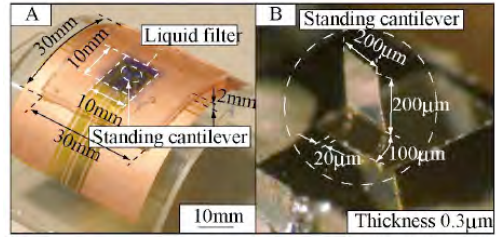


図1-1 A)シリコンゴムに封止したピエゾ抵抗カンチレバー、B)ピエゾ抵抗カンチレバーの拡大

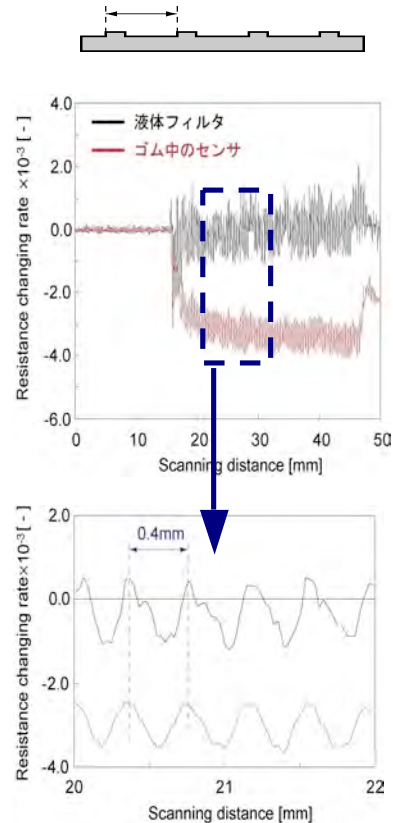


図1-2 凹凸構造をなぞったときのピエゾ抵抗カンチレバーの応答、液体フィルタ構造を用いると変動分だけが検出される

- ・導電性液体を用いた柔軟力センサアレイ

液体を用いた力の計測デバイスとして、シリコンゴム中に導電性液体を封止し、圧力とせん断方向の伸縮を測定することができる、柔軟力センサを提案した。このセンサは、変形の影響を受けることなく、ロボットの関節のような柔軟な部分にかかる力を測定することができる。

センサは、液体チャネルアレイ間の静電容量変化から検出する力センサ部と、液体チャネルの内部インピーダンスの変化を測定する伸縮センサ部から構成される(図3)。実験により、0-3.0Nの力と、0-0.28の伸び歪みを検出できることを確認した。また力センサ部は4つの田形の検出ユニットを持つため、これら各ユニットの出力を演算することで、せん

断方向の力を検出することも可能であった。

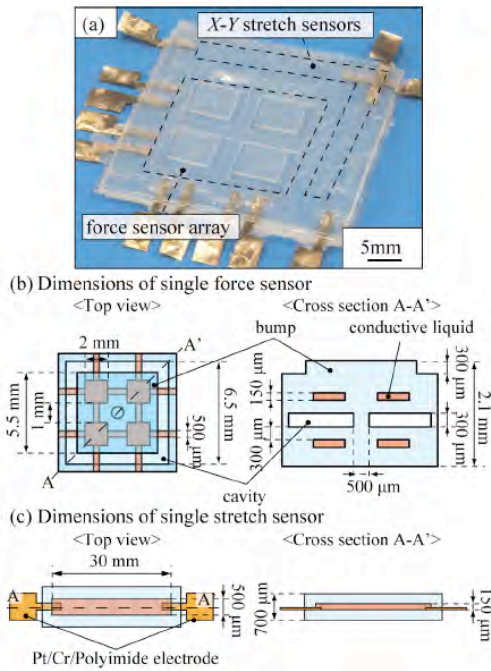


図 1-3 柔軟力センサアレイ (a)センサの外観、(b)力検出部の寸法、(c)伸縮センサ部の構造

・気液界面にカンチレバーを配置した 3 軸力センサ

シリコンオイルと空気の界面にピエゾ抵抗ヒンジ部を持つカンチレバー構造を配置し、シリコンオイルをパリエンで封止して PDMS に埋め込む形式の 3 軸力センサを提案した (図 1-4)。4 つの検出部を田形に配置することで、圧力と 2 方向の剪断力を検出できる。気液界面にカンチレバーが配置されているので機械的共振の影響を受けず、1MHz 以上の広帯域での力の検出ができた (図 1-5)。

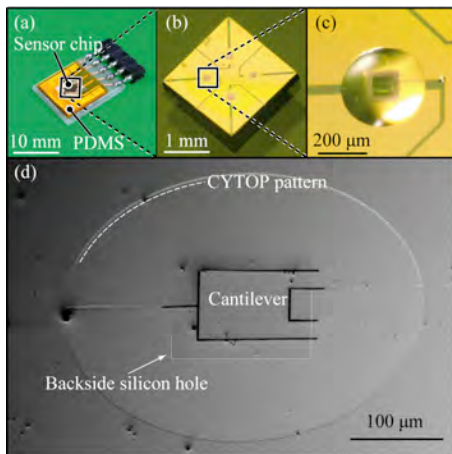


図 1-4 3 軸力センサ (a)センサの外観、(b)センサチップ、(c)カンチレバー上のシリコンオイル、(d)カンチレバーの SEM 写真(シリコンオイル滴下前)

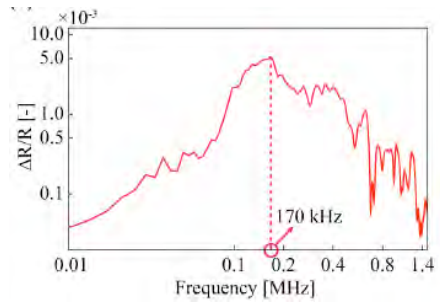


図 1-4 力の検出特性

・弾性ピラミッド構造を持つ高感度触覚センサ

微小な力を検出する手法として、ピエゾ抵抗カンチレバーによる力検出部に力を伝える際、シリコンゴムで作られた微小なピラミッド構造を介する検出構造を提案した。従来のピエゾ抵抗カンチレバー型触覚センサは、カンチレバー全体がシリコンゴムに埋め込まれ、ゴムの変形自体を検出する方式であった。それに対してカンチレバーの周囲に空間をあけて自由に変形できる構造にしたため、微小な力でも大きな出力を得ることができる (図 1-6)。4 組のピラミッドとカンチレバーを用いて、圧力と 2 方向のせん断力を高感度に検出できる 3 次元触覚センサを実現した (図 1-7)。

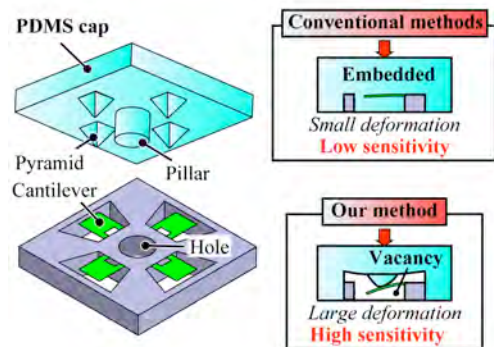


図 1-6 弾性ピラミッド構造を持つ触覚センサ

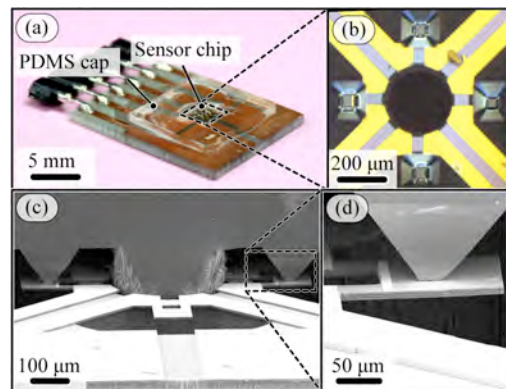


図 1-7 試作した触覚センサの (a)外観、(b)ピラミッドとカンチレバーの接触部、(c)(d)ピラミッドとカンチレバーの接触部の SEM 斜め観察像

・金でコーティングした弾性ピラミッドアレイを用いた高感度圧力センサ

金でコーティングされた弾性マイクロピラミッドで抵抗性シリコンビームを加圧し、抵抗の変化から力を検出する高感度の圧力センサを提案した。ピラミッドアレイ上に力が加わると、ピラミッドの変形によりピラミッドと抵抗性ビームとの接触面積が増大し、その結果としてビームの抵抗が減少する(図1-8)。実験により、圧力の検出特性を確認した(図1-9)。圧力が加わることで接触面積が増大していくため、圧力が大きくなると出力変化が小さくなる非線形特性を持つ。この特性は、小さな圧力では出力変化が大きく、大きな圧力では出力変化が小さくなるため、センサの検出範囲を拡大する効果を持つ。

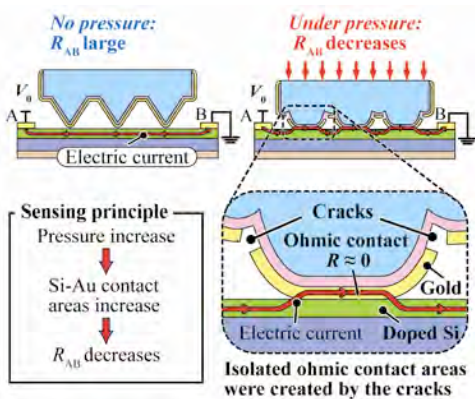


図 1-8 金コーティング弾性ピラミッドアレイを用いた圧力センサ

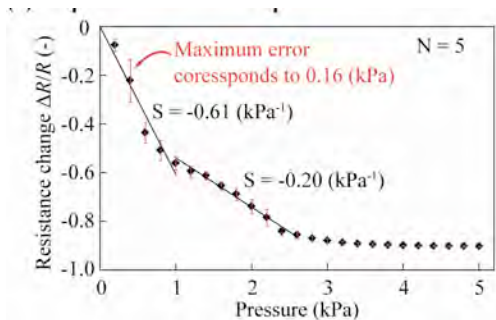


図 1-9 圧力の検出特性

・柔軟バンブ構造を持つ圧力検出素子

ピラミッド構造よりなめらかな、バンブ構造を持つ圧力検出素子の特性評価を行った。この素子は、皮膚の保湿量計測センサの、押しつけ圧の計測部として考案されたものである(図 1-9)。検出用カンチレバーとしては、圧膜レジスト SU-8 を用いて構造を作成しその上に金膜でジグザクの抵抗パターンを形成したものを用いている。バンブは、シリコンゴムにより形成されている。圧力の検出特性は、小さな圧力に対しては感度が高く、大きな圧力に対して感度が低くなる非線形特性を実現することができた(図 1-10)。

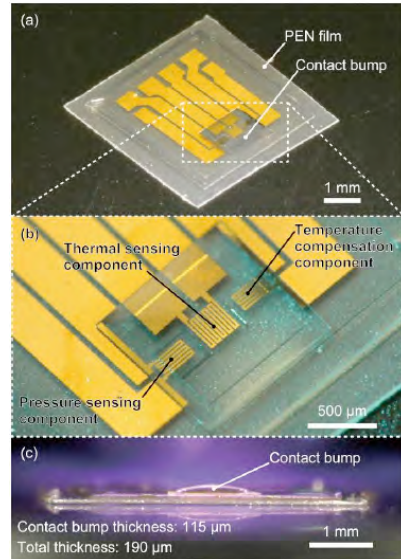


図 1-10 柔軟バンブ構造を持つ圧力検出素子

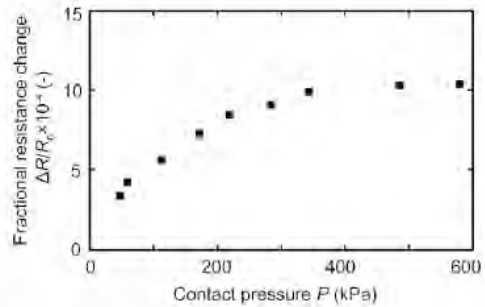


図 1-11 圧力の検出特性

(2) 不定形ないしは柔軟な物体のパターニングおよび封止方法の実現に関連して、以下の研究成果を得た。

・シリコンオイルへのパリレン薄膜の直接蒸着

液体材料を微小領域に封止するためのプロセス技術として、シリコンオイルに有機膜であるパリレン薄膜を直接蒸着して封止する技術を開発した。成膜過程を直接観察する手法を開発し、液滴の形状変化から液体状のパリレン薄膜の表面張力は 700uN/mm 程度であることがわかった。液体界面と高分子膜界面との間の状態に関し、平面状に塗布したシリコンオイルの上に蒸着したパリレン膜を引き剥がし、SEM 観察を行った。蒸着源側の表面はスムーズで稠密であるが、液体と接触側の表面はポーラス状になっていることが観察された。切断面の SEM 観察を行った結果、ポーラス状のパリレンは液体側から 1.2 μm 程度の厚さであった。



図 2-1 パリレン膜断面の SEM 写真（上が液体との接触面）

(3) センサ応答をリアルタイムに計測・解析・処理するための情報処理用の電子回路の実現に関連して、以下の研究成果を得た。

・帯域分割による高感度高ダイナミックレンジ化

高感度・広帯域だがダイナミックレンジの狭いセンサと、低感度・狭帯域だがダイナミックレンジの広いセンサを組み合わせ、感度とダイナミックレンジを両立させる手法の検討を行った。2つのセンサの担当を周波数領域で分割し、センサの出力を合成するものである。

カンチレバー型差圧センサと、市販のダイアフラム型絶対圧センサを用いて実験を行った。前者は、触覚センサで用いられるカンチレバーを応用した気圧センサであり、高感度であるがダイナミックレンジは狭く、静的な信号は取れない。また後者は、感度は低いがダイナミックレンジは広く、DC 的な信号も取れる。前者の出力をハイパスフィルタに、後者の出力をローパスフィルタに通し、ゲイン特性が平坦となる様に加算した。センサを持って階段を昇降する実験を行った結果、1[Pa]以下の分解能を持ちかつDCから検出可能となり、階段を1段ずつ登るときの気圧変化をきれいに計測できた(図 3-1)。

・センサ信号の処理回路

複数のカンチレバーの出力情報を同時に処理するため、マトリクス配線を用いた信号検出回路を試作した。通常 19 本の配線が必要な 18 個のカンチレバーに対して、7 本の配線での検出が可能であることを確認した。

微小な信号を検出する回路として、信号を複数の素子で並列に増幅して加算することで、雑音レベルを下げる手法を開発した。またカンチレバーの様な抵抗変化をブリッジで検出する方式の場合、ブリッジへの印加電圧のノイズの影響が大きいことがわかり、対策を行った。

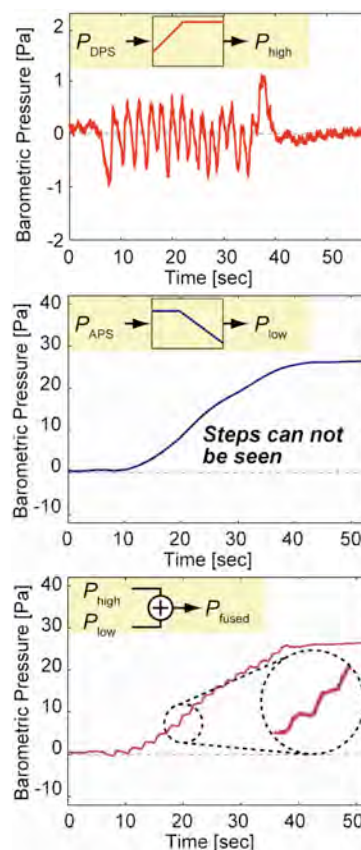


図 3-1 帯域分割による高感度高ダイナミックレンジ化、(上) カンチレバー型差圧センサの出力、(中) ダイアフラム型絶対圧センサの出力、(下) 合成した出力

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Nguyen Thanh-Vinh, Nguyen Binh-Khiem, Hidetoshi Takahashi, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "High-sensitivity triaxial tactile sensor with elastic microstructures pressing on piezoresistive cantilevers," Sensors and Actuators A-Physical, 査読有, Vol.215, 2014, pp.167-175, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424713004354>

[学会発表] (計 6 件)

① K.Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "STRETCHABLE FORCE SENSOR ARRAY USING CONDUCTIVE LIQUID," The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13), Jan.20-23, 2013, Taipei, Taiwan
 ② N. Thanh-Vinh, N. Binh-Khiem, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "HIGH SENSITIVE 3D TACTILE SENSOR WITH THE STRUCTURE OF ELASTIC PYRAMIDS ON PIEZORESISTIVE CANTILEVERS," The 26th IEEE International Conference on Micro Electro

Mechanical Systems (MEMS '13),
Jan.20-23, 2013, Taipei, Taiwan

③N. Thanh-Vinh, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "HIGHLY SENSITIVE PRESSURE SENSOR USING A GOLD-COATED ELASTIC PYRAMID ARRAY PRESSING ON A RESISTOR," The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13), Jan.20-23, 2013, Taipei, Taiwan

④ Pham Quang-Khang, Nguyen Minh-Dung, Nguyen Binh-Khiem, Hoang-Phuong Phan, Kyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "MULTI-AXIS FORCE SENSOR WITH DYNAMIC RANGE UP TO ULTRASONIC," The 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '14), Jan.26-30, 2014, San Francisco, USA

⑤ Nguyen Thanh-Vinh, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama, "THREE-DIMENSIONAL TACTILE SENSOR WITH A CAVITY UNDERNEATH PIEZORESISTIVE CANTILEVERS FOR SENSITIVITY ENHANCEMENT,"

センサ・マイクロマシンと応用システム, 11月5-7日, 2014, 仙台国際センター, 宮城

⑥野田堅太郎, 松本潔, 下山勲, "イオン性液体を用いたフレキシブル三軸力センサ," センサ・マイクロマシンと応用システム, 11月5-7日, 2014, 仙台国際センター, 宮城

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 潔 (MATSUMOTO, Kiyoshi)

東京大学・I R T研究機構・教授

研究者番号: 1 0 2 8 2 6 7 5