

# 液体フィルタを用いたすべり計測触覚センサに関する研究

Tactile sensor using standing cantilever covered with liquid filter for slippage detection

2011014



研究者代表

東京大学大学院  
情報理工学系研究科

特任助教

野田 堅太郎

## [研究の目的]

現在、我々の日常生活で食器の洗浄や掃除などの作業を手助けするため、生活空間で活動するロボットを実現する研究が多く進められている。このとき、様々な物体を破壊しないような最小限の力で扱うことが重要となり、物体に対するロボットの把持を計測・制御する触覚センサの実現が必要とされている。

こうした最小限の力での把持を実現するためには、ロボットと物体との接触面に加わるすべりを検知し、把持力を制御することが必要である。そこで本研究では、液体の流動性・粘性を活用することで、手先に加わるせん断力の時間変化のみを計測し、せん断力が変化した瞬間、すなわちすべり発生した瞬間を検知するための触覚センサの実現を目指す。

## [研究の内容, 成果]

提案する触覚センサの構造を図1に示す。この触覚センサは、変位によって抵抗値が変わる piezo抵抗素子を液体フィルタ中に配置し、その周囲をシリコンゴムで覆っている。センサに加わるせん断力が変化した場合、液体に流れが生じ、液体中に封止された piezo抵抗素子が変形する。この変形によって piezo抵抗素子の抵抗値が変化する。一方、せん断力に変化がなく、液体の流れが停止すると、piezo抵抗素子

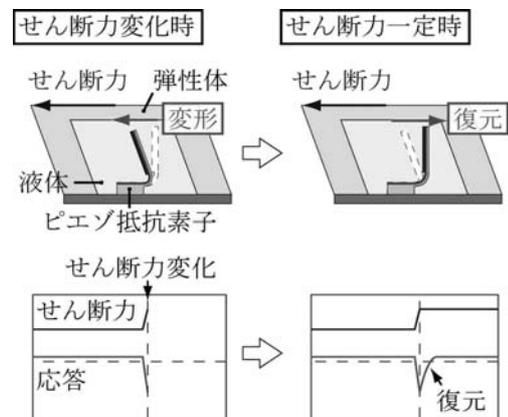


図1 液体フィルタを使用した触覚センサ

は初期形状に戻る。このため、提案するセンサは、piezo抵抗素子の抵抗値変化を計測することでせん断力の変化を計測できる。本研究では、ロボットハンドによる物体把持に必要なすべり計測を実現するため、 $10 \times 14 \text{ mm}^2$ の大きさで  $0.3 \text{ N}$  までのせん断応力を計測する液体フィルタ構造を有する触覚センサを実現する。このとき、下記の3点の要素に関して研究を行った。

### (1) 液体フィルタ中の流れの計測

提案するセンサ構造にせん断力を加えた際に、piezo抵抗素子に加わる力の大きさを推定するため、液体フィルタ中の流れを計測した。このとき、流れを可視化するため直径  $4 \mu\text{m}$  のガラスビーズを液体中に分散し、せん断力を加えた際のビーズの動きを観測した(図2)。

基底部からビーズまでの位置と、ビーズの移

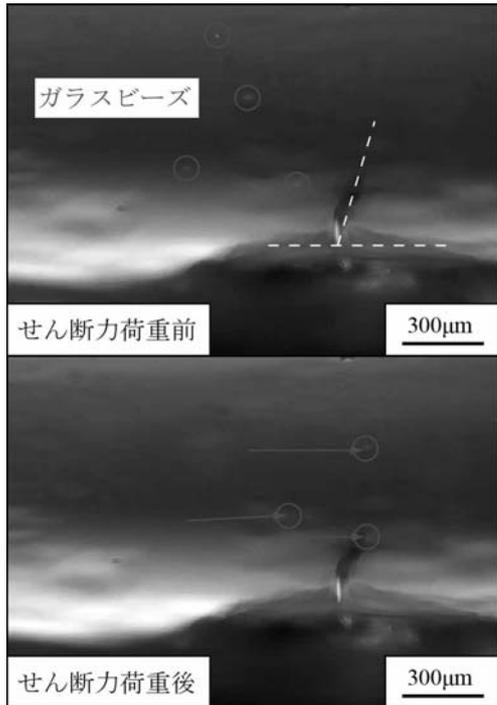


図2 ガラスビーズを用いたピエゾ抵抗素子周りの流れ観測の様子

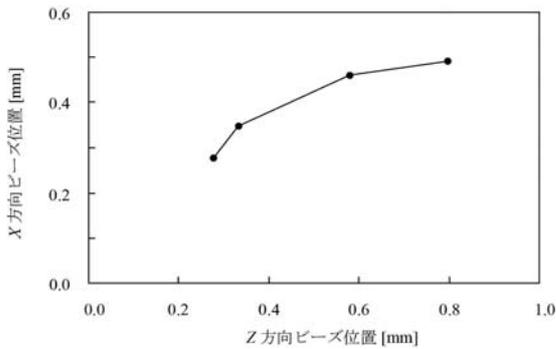
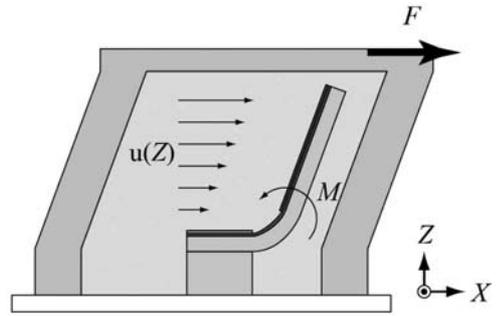


図3 基底からのビーズ高さと同移動量の比較

動量を比較した結果を図3に示す。ビーズはせん断力を加えた方向に移動し、その移動量が基底から高さとともに単調増加することから、フィルタ中の流れが層流であることを確認した。この結果から、提案するセンサ構造に微小なせん断力を加えた場合にフィルタ内に生じる流れは、平行平板構造中に流れる層流と仮定できる。この仮定を元に、せん断力がピエゾ抵抗素子に与える変形と、ピエゾ抵抗素子が初期形状に戻ろうとする復元力を算出し、せん断力と抵抗値変化の関係をもとにしたモデルは図4のようになる。このモデルに基づいて流れがピエゾ抵抗素



$$\text{変形による抵抗値変化率} : \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{F}{l}$$

図4 層流に対するピエゾ抵抗素子の变形モデル

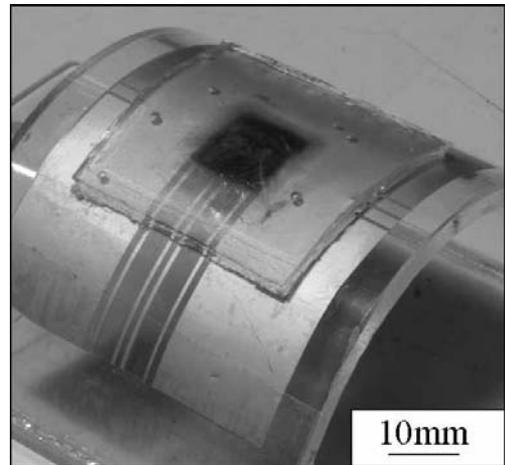


図5 試作した液体フィルタを有する触覚センサ

子に加える力を算出し、抵抗値変化とせん断力変化との間に線形の関係があることを確認した。

## (2) 試作センサの基礎特性計測・評価

前節での結果を元に、液体中にピエゾ抵抗素子を配置し、これを弾性体中に埋め込んだセンサ構造を試作した。液体を弾性体中に埋め込む場合、液体と弾性体とが直接接触すると、液体の形状が変形し、液体フィルタが歪な形状となる。そこで、弾性体への埋め込み時に、液体フィルタの変形を防ぐため、液体表面に薄膜の高分子膜をCVD法によって形成し、弾性体との接触で液体の形状が変化しないようにした状態で埋め込みを行った。

試作したセンサは、大きさ  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  の流路構造中に厚み  $300 \text{ nm}$ 、高さ  $300 \text{ um}$ 、幅  $200 \text{ um}$  のピエゾ抵抗素子を配置している (図5)。

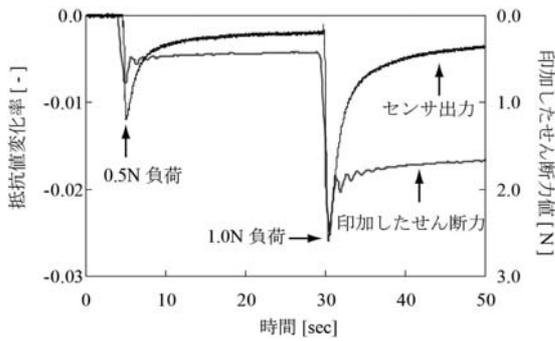


図6 せん断力に対するセンサ応答

このセンサの有効性を確認するため、0.5 N および 1 N の力を 2 段階に分けて加えた際のセンサ出力は図 6 に示すとおりである。この結果が示すとおり、試作したセンサはせん断力の時間変化に応答することを確認した。この特性は、提案するセンサは、初期荷重がかかっている状態であってもすべりなどによって生じるせん断力の変化を計測できることを示唆している。例えば、重量物の運搬中に生じたすべりを計測し、把持力を補正することで物体の安定な運搬が可能となる。

この特性を確認するため、センサに対して 0~0.6 N までの初期荷重を加えた状態から 0~3 N のせん断力を加えた時のセンサの抵抗値変化を計測した。この時の piezoelectric 抵抗素子の抵抗値変化を図 7(a) に、せん断力にセンサ感度をプロットした結果を図 7(b) に示す。図 7(b) の結果が示すように、各初期荷重に対するセンサ感度の差は 10% 未満であり、前述の

とおり初期荷重に影響を受けることなくせん断力の変化を検出できることを確認した。この結果から、提案するセンサは、ロボットハンドにおける重量物把持作業を実現する際に、その重量によらずにすべりを検知し、把持力制御が可能になると考えられる。

### (3) 液体粘性とセンサ出力の関係の検証

液体中に配置した piezoelectric 抵抗素子は、液体の粘性によって変形・復元速度が大きく変化する。この液体粘度とセンサ出力の関係性を確認するため、低粘度の液体材料 (37 mm<sup>2</sup>/s)、高粘度の液体材料 (3,900 mm<sup>2</sup>/s)、ゴム材料 (固体)、の三種類の材料に piezoelectric 抵抗素子をそれぞれ埋め込んだセンサを試作し、2.5~37.5 Hz の周波数でせん断力を繰り返し加えた際の応答特性の違いを計測した。センサの抵抗値変化の周波数特性をフーリエ変換によって算出し、印加したせん断力の周波数のパワースペクトルを比較した結果を図 8 に示す。

この結果が示すように弾性体中に piezoelectric 抵抗素子を配置した場合には、加重の周波数に関わりなくセンサ出力が一定となる。液体中に piezoelectric 抵抗素子を配置した場合、低粘度では高周波の、高粘度では低周波の振動に対して強く応答する。低粘度の液体の場合、液体の流れが piezoelectric 抵抗素子に与える力よりも素子の復元力の方が大きく、低周波のせん断力には応答しない。一方、高粘度の液体中では、piezoelectric 抵抗素子の

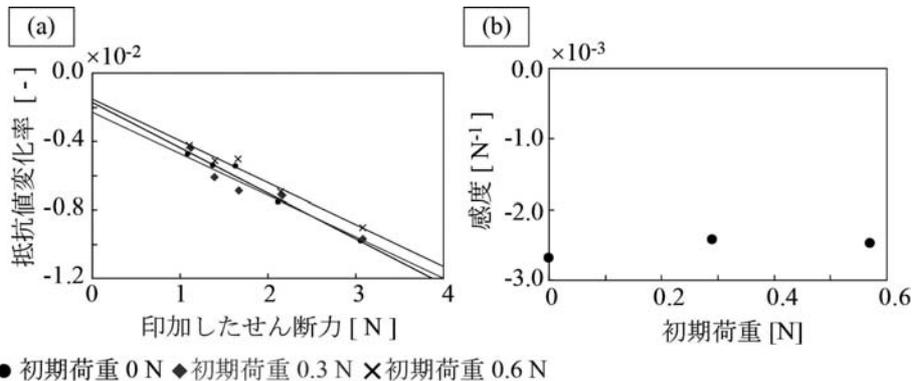


図7 初期荷重による提案センサの感度の違いの計測結果

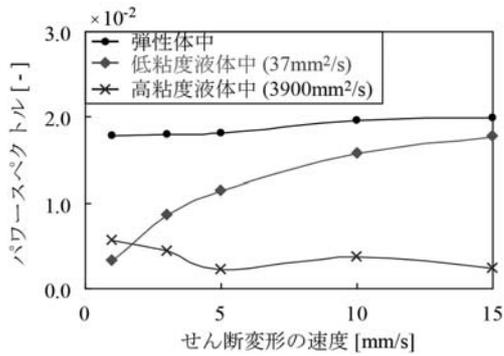


図8 液体フィルタの粘度を変えた場合のせん断変形速度に対する応答の違いの計測結果

復元力よりも液体が素子に与える力が大きくなるため、復元速度が遅くなる。このため、せん断力変化の周波数が高くなると、ピエゾ抵抗素子が初期形状に戻ることができず、ピエゾ抵抗素子の抵抗値は常に一定となる。このため、高粘度の液体を用いて試作した触覚センサでは、低周波の繰り返し加重に強く応答したと考えられる。

この結果は、液体中に任意の粘度の液体を封止することで、特定の周波数帯域で応答するメカニカルなバンドパスフィルタを形成できることを示唆している。これは人の触覚受容器と類似した特性であり、例えば物体をなぞった時に生じる振動の周波数から物体の表面状態を把握するといった触感計測にも応用できると考えられる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、ピエゾ抵抗素子を液体中に配置し、弾性体に埋め込むことすべりによって生じるせん断力の時間変化を計測する触覚センサを実現した。このセンサは、例えばロボットによる最小限の把持力での物体把持を実現するために必要な物体のすべりの検知に有効だと考えられる。提案するセンサは、初期荷重によらずせん断力変化に応答し、また使用する液体フィルタの粘度によって計測可能な力の変化周波数を変えることができることを確認した。

このように特定の周波数の加重のみを検出するセンサ特性は、人の触覚受容器と同様の性質を持つといえる。こうした点から、今後、提案する液体フィルタ構造を用いることで、物体の表面テクスチャを計測するセンサを実現し、人が物体表面の形状を検出するメカニズムの解明へとつなげたいと考えている。

#### [成果の発表, 論文等]

- Kentaro Noda, *et. al.*, "A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever in elastic material," *Sensors and Actuators A*, Vol. 127, No. 11, pp. 295-301, 2006.
- Kentaro Noda, *et. al.*, "Flexible tactile sensor sheet with liquid filter for shear force detection," *Proc. of MEMS '09*, 2009.