

[研究助成 (A)]

分布型触覚センサ Soft-MPS Array の開発

Development of Distributed Tactile Sensor Soft-MPS Array

2201017



研究代表者

京都先端科学大学
ナガモリアクチュエータ研究所

助教

長濱 峻 介

[研究の目的]

ロボットに触覚を与え、それらの情報を用いることは、人との接点の検出や物体のマニピュレーションにおいて有用である。触覚センサには多くの種類があり、近年は柔らかい材料で構成された触覚センサが多く報告されている。触覚をセンシングするメカニズムとしては、抵抗式、磁気式、圧電式、静電容量式、光学式など多くの手法がある。

抵抗式の触覚センサの1つとして、Soft-Magnetic Powdery Sensor (Soft-MPS) が提案されている。Soft-MPSは、強磁性体の粉体と柔軟材料（シリコーンゴム）で構成された安価な構成の抵抗式触覚センサである。成型時に、感圧部である金属粉を磁場で固定した状態で、未重合の柔軟材料を流し込み、重合することで金属粉を柔軟材料中に固定する。この構造により、柔軟かつ高感度な抵抗式触覚センサを実現している。

一方で、ソフトマテリアルで構成されたセンサであるため、力と抵抗値の関係にヒステリシスが存在する。ヒステリシスが存在することで、センサは力の検出時に誤認識してしまう。この問題を解決することは、ソフトマテリアルを使用している限り原理上は不可能である。ここで、生物の皮膚に着目すると、これらも柔軟な材料で構成されているため、ヒステリシスが存在するはずであるが、生物はそのことを問題として

いないように思える。柔軟な皮膚の内部には、サイズが小さい触覚器が高密度に分布的に配置されている。そして、機械的刺激の大きさに応じて皮膚が変形することで、反応する触覚器の個数が変わり、このことが力の大小の認知に影響を与えていると考えられる。このような生物の皮膚構造や触覚知覚の機序に、ヒステリシスの問題を解決する要因があると考え、生物に倣って複数の微小な触覚センサの情報を用いることで機械的刺激を計測するシステムの実現を目指す。本研究では、分布型にしたSoft-MPSの特性の評価と、基板への接合方法を検証した。

[研究の内容、成果]

1. 分布型触覚センサ Soft-MPS Array の製作

分布型触覚センサ Soft-MPS Array を製作するための型の設計と、センサの信号を処理するための回路の検討を行った。

磁石を複数備えた型を用い、Soft-MPS Array の製作を行う。本研究では、3×3のセンサノードを備えたSoft-MPS Array を製作した。上部の型および下部の型に対して、500メッシュの篩を用いて金属粉（#200鉄粉、協和純薬工業株式会社）を加えた。その後、棒磁石を用いて、型に備え付けた磁石の磁力線の反発を利用し、開放されている磁力線上に拘束されている金属粉を整えた（図1a）。スペーサーを介して上下の型を合わせ、未重合の

Ecoflex™ 00-50 を注ぎ硬化させることで、Soft-MPS Array を得た (図 1b)。

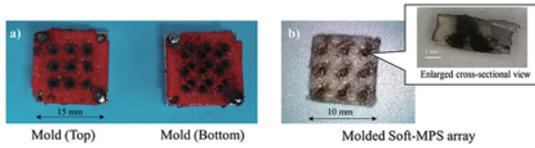


図 1 Soft-MPS Array; a) 型, b) 外観

3×3 のセンサの信号を処理する上で、省配線化のために、キーボードなどの回路で見られるキーマトリックス方式を応用した信号処理用の回路を製作した (図 2)。マイコンの Output ピン (OUTPUT1~3) の電圧の High と Low を切り替えることで、情報を取得したいセンサノード (SoftMPS-Node) を選択する。また、Input ピン (INPUT1~3) で、各センサノードの抵抗値の変化を電圧値として取得する。PCB 基板を製作し、Soft-MPS Array を両面のカプトンテープと銀ナノ接着剤により基板の電極に接着した。なお、マイコンは Arduino, 抵抗としては 1 MΩ の金属皮膜抵抗, ダイオードは 1SS380VM を使用した。

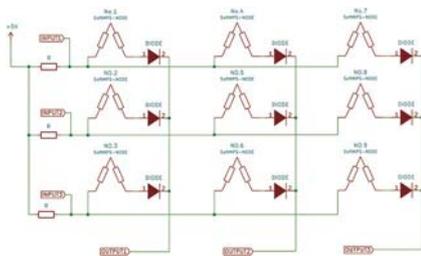


図 2 信号処理用の回路

1.2 実験

製作した Soft-MPS Array の力に対する応答の評価を行った。センサノードの真上に力を印可した場合と、センサノードの間に力を印可した場合における実験を行い、センサの応答特性の評価を行った。力を印可する箇所の変更は精密ステージによりセンサの位置を変更することで行い、力の計測は卓上万能試験機 (オートグラフ AGS-X, 株式会社島津製作所) を用いて行った (図 3)。力の印可は圧縮用の直径 2 mm

のピンを介して行い、力の印可速度は 1 mm/min とし、0.5 mm の往復変位を与えたときのセンサの電圧応答を計測した。各実験で力を印可する箇所と番号の対応を図 4 に示す。

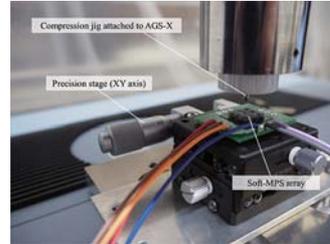


図 3 実験のセッティング

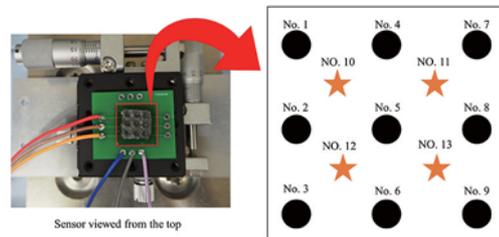


図 4 力を印可した位置

1.3 実験結果

1.3.1 センサノードの真上に力を印可した場合

図 4 の No. 1~No. 9 の箇所に変位を与えた際の電圧応答を計測した。一例として、図 5 に No. 7 の付近に力を印可した際の電圧応答の結果を示す。グラフより、No. 7 の電圧変化が大きいことが確認できる。しかしながら、グラフ上の No. 1 および No. 8 で取得した電圧でも電圧降下が見られた。

また、0.0319 N 程度の力が印可されてから電圧値が変化し始めていることから、今回の製法ではその力以下での変形では抵抗値が変化し

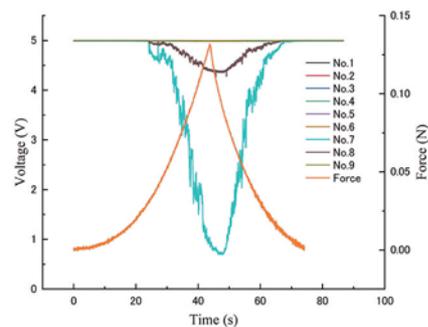


図 5 No. 7 に印可した力に対する電圧応答

ていなかったことが分かる。

1.3.2 センサノードの間に力を印可した場合

図4のNo. 10~No. 13に変位を与えた際の電圧応答を計測した。一例として、図6にNo. 11付近に力を印可した際の電圧応答の結果を示す。グラフより、すべてのセンサノードが反応していないことが確認できる。

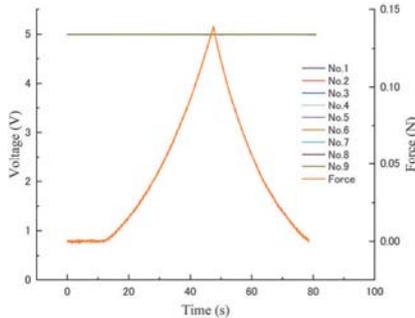


図6 No. 11に印可した力に対する電圧応答

2. 柔軟材料の接合技術の開発

銀ナノ接着剤をSoft-MPSと基板の接着に使用していたが、接着剤が広がるため位置精度が悪く、また接着力が弱く剥がれやすい問題があった。一方で、Soft-MPSは大部分が難接着材であるシリコンゴムで構成されているが、金属粒子を含んだ界面を持つため、回路素子の接着に用いられるハンダにより接着可能であることが期待できる。そこで、本研究では、接着の位置精度と接着力の向上を目的とした接着方法として、ハンダにより柔軟材料を接着する手法を提案する。

2.1 金属界面を利用した柔軟材料の接合

Soft-MPSと回路基板を接合するプロセスに関して述べる。まず、Soft-MPSの作製を行った。従来の作製方法と同様に、磁石を備えた型に金属粉（鉄粉 200メッシュ、共和純薬工業）を整列させ、柔軟材料（Ecoflex 00-20, Smooth-On inc.）を流し込むことで、金属粉を固定化することでSoft-MPSを得た。金属粉には200メッシュのSoft-MPS中の金属粉の界面の酸化被膜を除去するために、Soft-MPSにフラックスを塗布した。また、回路基板の電極と

同じ形状で穴のあいたマスクを用い、スキージで穴にハンダペーストを流し込むことで、クリームハンダ（XG-Z40 SMD Sn63/Pb37 25-45 μm）を回路基板上に塗布した。その後、Soft-MPSの金属界面（図7）が回路基板に合わさるように、ピンセットでアライメントを行い、回路基板上にSoft-MPSを設置した。恒温槽で任意の温度で加熱することで、ハンダを溶かした。加熱後、クリームハンダは完全に固まり接合するまでに一定の時間を要するので、加熱終了から24時間以上は静置した後、評価実験を行った。図8にプロセスの概要を示す。

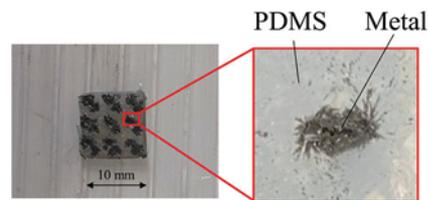


図7 Soft-MPS上の金属界面

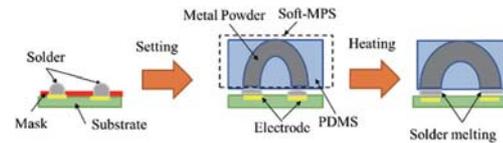


図8 ハンダによる接合のプロセス

2.2 実験

2.2.1 接合強度の確認

銅板に接合したSoft-MPSに対して、せん断方向および引張方向に力を印可した際の強度の確認を行った（図9）。Soft-MPSと銅板の接合が切れた際の力を接着力とした。フォースゲージ（ZTS-20N, IMADA CO., LTD.）の電圧値をAnalog Discovery2を用いて計測し、その電圧値を力に変換することで力の計測を行った。

接合の際、加熱時の温度条件を変化させることで、温度に応じた接合強度を確認した。クリームハンダの融点は200℃程度であるため、接着の際にはSoft-MPSを200℃から上下に20℃ずつ刻んだ温度で加熱した。その結果、恒温槽を160℃以下に設定して加熱した場合はSoft-MPSと銅板が接着せず、240℃以上に設

定した場合はゴムが変形し、鉄粉が漏れ出てしまった。温度の設定は、180℃、200℃、220℃の3つのパターンで実験を行った。

引張方向の力の試験は、図10の実験装置を用いて行った。Soft-MPSを引張用の紐を取り付け可能な形状に成型することで、引張試験を行った。リファレンスとして銀ナノ接着剤を用いた場合との接合強度の比較を行った。

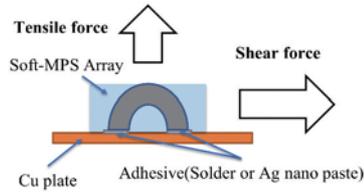


図9 接合強度試験の概要図

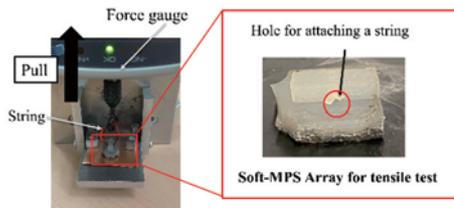


図10 引張試験に用いたサンプル形状

2.2.2 導電性の確認

Soft-MPSをクリームハンダにより基板と接合した後、フォースゲージを介して力をセンサに印可し、力に対するセンサの電圧応答を評価した。

2.3 実験結果

2.3.1 接合強度の確認

クリームハンダによる接着（温度条件：180℃、200℃、220℃）した場合の最大引張力の結果を図11に示す。なお、各条件のサンプルに対し3回ずつ試験を行い、その平均値をグラフにした。

銀ナノ接着で接着した条件と比較すると、引張方向の強度が向上していることが確認できた。図11より、破断時の引張力に関しては、高温の条件（220℃）は他の温度条件（180℃、200℃）と比較すると強度が小さいことが確認できる。

なお、ここではデータを示していないが、せん断試験においても、接着剤による接合と比較すると、強度が大きくなった。

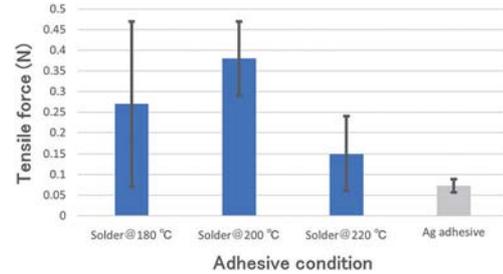


図11 引張方向の接合強度

2.3.2 電気的性質の確認

力を印可した際の電圧応答を図12に示す。Soft-MPSに力を加えたことにより、電圧が変化していることが確認できる。このことから、印可した力に応じてセンサの抵抗値が変化したことが分かる。ヒステリシスが大きいのは、柔軟な材料であるShore 00-20のシリコンゴムを使用したからだと考えられる。

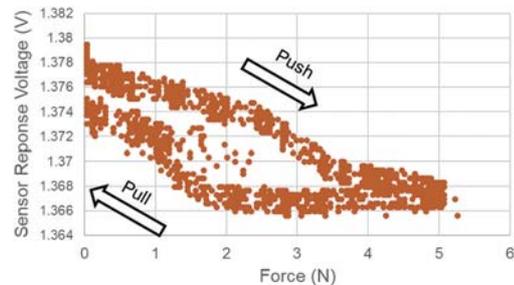


図12 力に対する電圧応答

[今後の研究の方向, 課題]

図2のようなセンサ信号処理用基板の製作において、基板が過度に大きくならないように処理に関わる回路を各Soft-MPSノードの大きさに収まるように設計を行った際に、市販の表面実装用ダイオード（1206程度の大きさ）では小型化に限界があることが分かった。そのため、100 μm程度の小さいSoft-MPSノードを実現するためには、小型のダイオードを基板上に製

作する必要がある。このように、高密度な分布型センサシステムを実現するためには、Soft-MPS ノードの小型化だけでなく、信号処理用の基板自体の小型化も今後は実現していく必要がある。

また、Soft-MPS の基板への接合が安定していないことが確認できたため、安定したデータの取得のために、安定的な接合に関する技術を構築することとした。クリームハンダを用いることで、導電性を確保しつつ、導電性接着剤と比較すると強固に接着できることを確認した。本接合手法は、Soft-MPS のみではなく様々な難接着物を接着する手法となることが期待できる。

今後は、Soft-MPS ノードの小型化と、ディスペンサロボットを用いたハンダの塗布による微小な金属界面の小型基板への接合などの技術を開発することで、Soft-MPS Array のセンサノードをより高密度にして、センサシステムを人間の皮膚に近づけていく。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 長濱峻介, 右田かよ, 菅野重樹, 分布型触覚センサ Soft-MPS Array の開発, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021, 1P1-M01, 2021 年 6 月
- [2] 長濱峻介, 本間大樹, 菅野重樹, 金属界面を利用した柔軟素子の回路基板への接合方, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022, 2A2-R07, 2022 年 6 月