

[研究助成 (A)]

PDMS バイアスバネおよび形状記憶合金厚膜を用いた
触覚ディスプレイの開発

Development of tactile display using PDMS bias spring and shape memory alloy thick film

2221018

研究代表者
(助成金受領者)和歌山工業高等専門学校
知能機械工学科

准教授

徐 嘉 楽

共同研究者

山形大学 大学院理工学研究科

教 授

峯 田 貴

[研究の目的]

触覚ディスプレイは文字や記号等を再現し、人間の指先等に提示するツールである。これまで圧力型や電磁型等の様々な駆動手法の触覚ディスプレイの開発がされてきたが、十分な発生力や振幅を提示するためにシステムが大きくなってしまう課題がある。

そこで著者らは、モバイル機器への搭載を目指し、変位および発生力の両立可能な形状記憶合金 (SMA) アクチュエータおよびバイアスバネを組み合わせた小型かつ薄型の触覚ディスプレイの実現に取り組んできた。SMA アクチュエータとバイアスバネ接合時に精度の高いアライメントが必要となる。高いアライメント精度を実現することを目的に本研究では、下地が見えるように透明な PDMS (Polydimethylsiloxane) 膜を均一に形成し、SMA アクチュエータと接合することでアライメント精度の向上を図るとともに、PDMS 膜厚を調整することで、所望の剛性を得る。さらに、従来の手法ではキャップ層等を樹脂の重ね塗りにより形成していたが、安価で加工が容易な Cu 基板を用いて、精密なエッチングによりキャップ層およびフレーム層を形成することで、プロセスの簡易化を図る。

[研究の内容、成果]

1. PDMS バイアスバネの設計、形成および剛性評価

1.1 PDMS バイアスバネの設計

SMA アクチュエータの高温相および低温相での反力とバイアスバネの反力のつり合いにより発生力と振幅を発生する。SMA アクチュエータの剛性も考慮し、100~150 N/m の剛性が得られるように PDMS の膜厚を約 10 μm ~200 μm と異なる数種類のバイアスバネを作製し、最適膜厚を実験的に選定した。

1.2 PDMS バイアスバネの形成および剛性評価

PDMS バイアスバネの作製プロセスを Fig. 1 に示す。犠牲層を形成したダミー基板上に、主剤および硬化剤を 10:1 の割合で混合した PDMS をスピニング法を用いて PDMS バイアスバネを形成した (Fig. 1(a))。フォトリソグラフィにより樹脂製のマイクロピンを PDMS バイアスバネ上に形成し (Fig. 1(b))、ダミー基板から剥離し (Fig. 1(c))、穴付きのアクリル治具と接合した (Fig. 1(d))。Fig. 2 に示すようにマイクロニードルによりマイクロピンに変位を与え、反力をフォースゲージによって測定した。

PDMS バイアスバネ上にピン層を精度良く一括で形成することができた。PDMS バイアスバネの反力および変位の測定結果を Fig. 3 に示す。作製した膜厚の異なる PDMS バイアス

ばねに SMA の初期変位よりも大きい $300\ \mu\text{m}$ の変位を与えてもいずれの PDMS バイアスばねでも破断等が発生せず、元の形状に回復することを確認した。

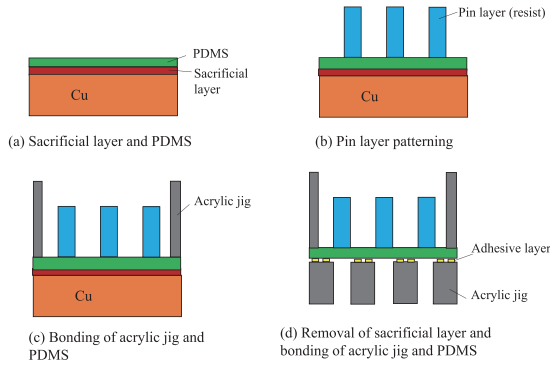


Fig. 1 Fabrication process of PDMS bias spring for stiffness measurement

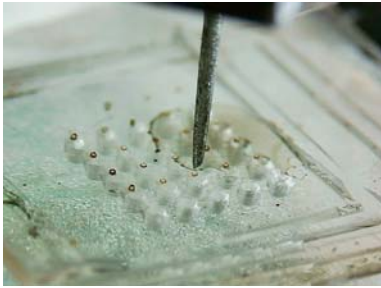


Fig. 2 Stiffness measurement of PDMS bias spring

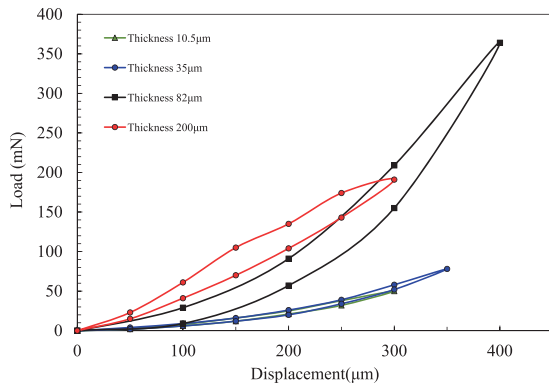


Fig. 3 Stiffness measurement results of PDMS bias spring

PDMS バイアスばねの膜厚が $80\ \mu\text{m}$ ~ $200\ \mu\text{m}$ の場合では、バイアスばねに負荷を加えて $50\ \mu\text{m}$ ずつ、合計 $300\sim 400\ \mu\text{m}$ 変位を与え、除荷した際にヒステリシスが生じることがわかった。一方で膜厚が約 $10\ \mu\text{m}$ ~ $30\ \mu\text{m}$ では、ヒステリシスがほとんど生じず、変位 $300\ \mu\text{m}$

程度では目標となる $150\ \text{N/m}$ 程度の剛性が得られることがわかった。

2. Cu キャップ層およびフレーム層の作製

2.1 キャップ層の作製

キャップ層およびフレーム層の作製プロセスの簡易化を目指し、Cu 基板の精密なエッチングによるキャップ層およびフレーム層の形成を検討した。また、キャップ層およびフレーム層の段付き構造の形成にも取り組んだ。

キャップ層の作製プロセスを Fig. 4 に示す。研磨した Cu 基板上にレジストをパターンニングし (Fig. 4(a))、Cu 基板を電解エッチングした (Fig. 4(b))。エッチングした表面をレジストで保護し (Fig. 4(c))、裏面からエッチングにより中空構造を形成した (Fig. 4(d))。Cap 層の形成結果を Fig. 5 に示す。各キャップ層の開口部は、電解エッチングによりサイドエッチングを抑制した $300\sim 400\ \mu\text{m}$ 程度の開口部を良好に形成することができた。

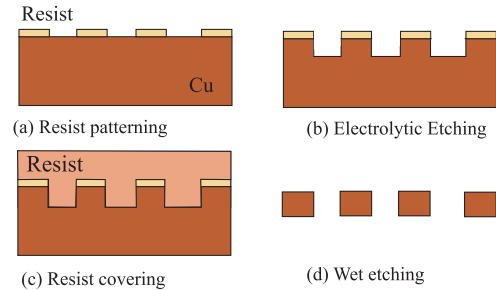


Fig. 4 Fabrication process of Cap layer

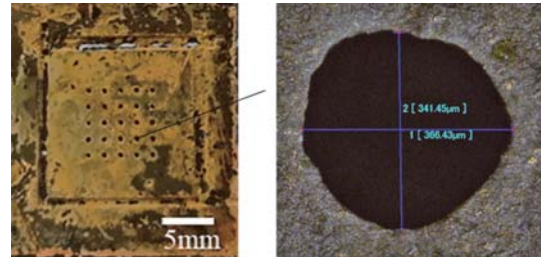


Fig. 5 Fabricated Cap layer

2.2 フレーム層の形成

キャップ層よりも開口部の広いフレーム層作製の検討を行った。キャップ層と同様に研磨した Cu 基板上にレジストをパターンニングし、

電解エッチングを行ったが、Cu 基板が貫通する前にレジストパターンにクラックが生じることがわかった。次にレジストをパターンニングし (Fig. 6(a))、硝酸溶液によるエッチングも試みたが、Cu 基板を貫通する前にレジストの剥離が生じた (Fig. 6(b))。最後に、電解エッチングおよび硝酸エッチングを組み合わせたエッチングを試みた。電解エッチングにより深さ $200\text{ }\mu\text{m}$ 程度をエッチングし、残りの約 $200\text{ }\mu\text{m}$ を硝酸エッチングにより、貫通エッチングすることで良好に中空構造を形成することができた (Fig. 7)。

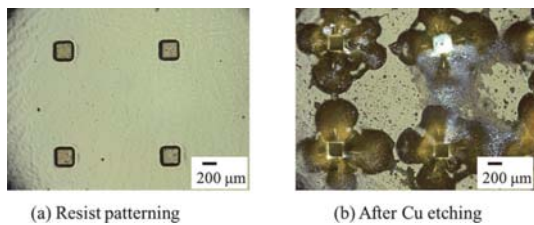


Fig. 6 Cu etching with nitric acid

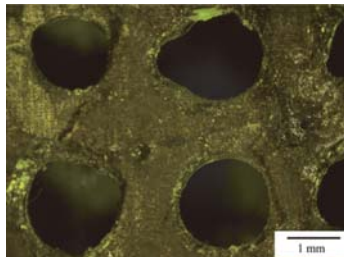


Fig. 7 Penetration of etching through the Cu frame layer

2.3 キャップおよびフレーム層の段付き構造の形成

作製したキャップ層側にステンシルマスクを介してエポキシ接着剤を塗布し、フレーム側より現物合わせによりアライメントを行い、キャップ層と接合した (Fig. 8)。Fig. 8 に示すように良好に接合を行うことができ、Cu キャップおよびフレーム層の段付き構造の形成プロセスを確立した。

3. SMA アクチュエータの作製

SMA アクチュエータは山形大学の峯田教授の研究グループによって作製された。SMA アクチュエータの作製プロセスを Fig. 9 に示す。

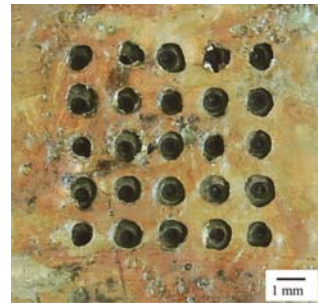


Fig. 8 Fabricated Cu cap and frame structure

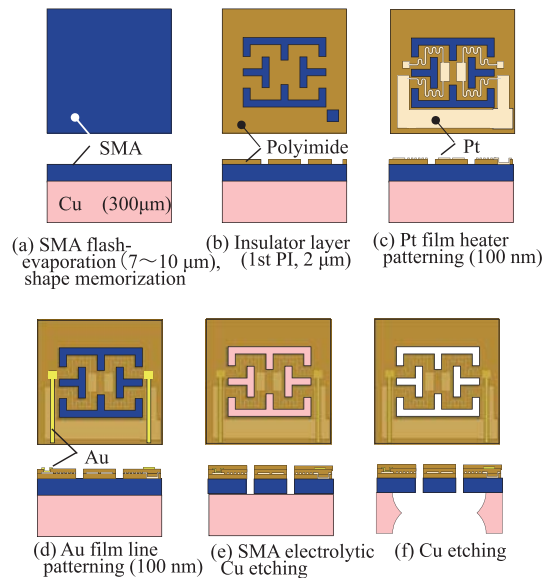


Fig. 9 Fabrication process of SMA actuator

鏡面研磨した Cu 基板の上にフラッシュ蒸着法により SMA 膜を成膜し、アニール処理をした (Fig. 9(a))。絶縁層をパターンニングし (Fig. 9(b))、スパッタリングにより Pt ヒータ配線および Au 配線を形成した (Fig. 9(c), (d))。電解エッチングにより SMA をエッチングした (Fig. 9(e))。最後に Cu 基板を貫通エッチングにより、中空構造を形成した (Fig. 9(f))。

4. PDMS バイアスばねおよび SMA アクチュエータの接合プロセス

犠牲層を形成したガラス基板上に PDMS 膜を形成し、酸素プラズマ処理を行い、フォトリソグラフィによってピン層を形成した。エッチングにより形成した Cu フレーム層と現物合わせにより位置合わせを行い、ピン付き PDMS バイアスばねおよび Cu フレーム層を接合した。

接合結果を Fig. 10 に示す。Cu フレーム層および PDMS バイアスばねの間で剥離することなく、良好に接合することを可能にした。また、フレーム層の開口部中心にピン部を良好に形成することができた。下地の犠牲層を溶解してガラス基板から剥離した。ステンシルマスクを用いてエポキシ接着剤を SMA アクチュエータ上に塗布し、PDMS バイアスばね側のピン部から下地の SMA アクチュエータの中心部に位置合わせを行い、接合した。接合結果を Fig. 11 に示す。精度良くマイクロピンおよび SMA アクチュエータを接合することができ、高いアラ

イメント手法を実現することができた。マイクロピンによる初期変位によって、PDMS バイアスばねおよび SMA アクチュエータが破断せず、変形することを確認した。また、シール構造になることで防水と防塵の効果で、飛躍的に触覚ディスプレイの実用化に近づくと考えられる。

[今後の研究の方向，課題]

所望の剛性を有する透明な PDMS バイアスばねを形成し、本研究の目的である SMA アクチュエータとバイアスばね接合時の高い精度での位置合わせ手法の確立は達成できたと考えられる。また、精密なエッチング手法によりピン層およびフレーム層の形成手法を確立した。ピン層およびフレーム層を接合し、段付き構造を形成することができた。

今後の方針は PDMS バイアスばねと接合した SMA アクチュエータの動作特性を評価し、Cu キャップ層側と接合し、人間の指に刺激提示を行い、振動パターンによる刺激知覚について評価を行っていく。

[成果の発表，論文等]

- ・ 徐嘉樂，天野晏年，峯田貴，“触覚ディスプレイ用 PDMS バイアスばねの形成および剛性評価”，第 41 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム（発表予定）

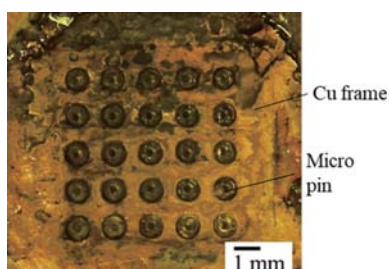


Fig. 10 After bonding of Cu frame and PDMS bias spring with micro pin

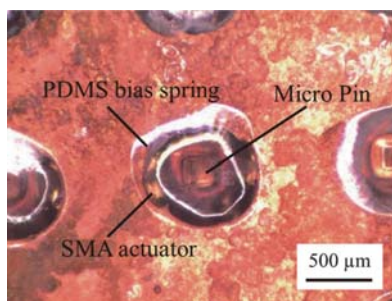


Fig. 11 After bonding of SMA actuator and PDMS bias spring with micro pin