

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：54701

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14134

研究課題名（和文）形状記憶合金厚膜を用いた触覚・方向指示提示のための高出力触覚ディスプレイの開発

研究課題名（英文）Development of high-power tactile display for presenting tactile sensation and directional navigation using shape memory alloy thick film

研究代表者

徐 嘉樂 (Xu, Jiale)

和歌山工業高等専門学校・知能機械工学科・准教授

研究者番号：30898200

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：個人差なく人間の皮膚へ触覚情報の提示が可能な高出力触覚ディスプレイの実現を目的として研究を行った。形状記憶合金(SMA)厚膜アクチュエータの熱応答の向上を目指し、液冷によるSMAアクチュエータのパルス通電加熱時の冷却効果を検証した。PDMSバイアスばね上にリソグラフィを用いてマイクロピンを形成し、SMAアクチュエータと接合した素子を実現した。触覚受容器が感知する周波数領域において発生振幅の評価を行い、PDMSバイアスばねの粘弾性による振幅への影響が大きいことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、SMA型触覚ディスプレイの高出力を目指したが、SMAアクチュエータと組み合わせるPDMSバイアスばねの粘弾性による影響が大きいことが明らかとなった。この結果をもとに今後のバイアスばねの再設計および高出力触覚ディスプレイの実現につなげたいと考えている。また、SMAアクチュエータとPDMSバイアスばねの接合技術を確立したことによってシール構造を実現することが可能となり、防塵や防水の効果が期待でき、触覚ディスプレイの実用化に寄与できると考えている。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to realize high power tactile display that can present tactile information to human skin without individual differences between persons. By improving the thermal response of the shape memory alloy (SMA) thick film actuator, the effects of the liquid-cooling on the response of the SMA actuator were verified when SMA actuator was heated by pulse current heating. The SMA actuator was bonded to the PDMS bias spring with micro-pins after the micro-pins were fabricated on the PDMS bias spring using lithography technology. The amplitude of the SMA actuator with PDMS bias spring was evaluated at the frequency range of mechanoreceptors. It was found that the viscoelastic of the PDMS bias spring had a large effect on the vibrational amplitude of SMA actuator.

研究分野：MEMS

キーワード：触覚ディスプレイ 形状記憶合金 バイアスばね PDMS マイクロアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

人間の指先に触感や点字などの触覚情報を提示するツールとして触覚ディスプレイの研究が行われている。空気圧型、圧電型等の多様な駆動手法を用いた振動刺激素子が提案されてきたが、ポンプ等の外部機構や十分な変位と発生力を得るためにシステムが大きくなってしまいう課題がある。そのため、申請者らの研究グループでは変位および発生力の両立が可能な形状記憶合金(SMA)に着目し、独自の成膜技術や電気化学エッチング等の形成技術によりSMAアクチュエータを形成し、マイクロピン、キャップ、フレームおよびバイアスばねと組み合わせた小型でかつ薄型のSMA厚膜型触覚ディスプレイの開発に取り組んできた。

個人差なく触覚情報の提示を目指し、可動部のサイズを拡大したSMAアクチュエータ(5×5アレイ、2mmピッチ)を作製した。皮膚下の触覚受容器が知覚しやすい周波数15 Hz以上でのパルス通電駆動では冷却が律速したものの、人間の皮膚の知覚限界を超える発生力および振幅を得ることができた。より明確で刺激の感知における個人差を解消するために、高出力な刺激提示が必要となり、SMAアクチュエータの冷却速度の向上やSMA厚膜型触覚ディスプレイの出力拡大が課題であった。

2. 研究の目的

本研究は、個人差なく触感や点字などの触覚情報の提示が可能な高出力振動刺激素子の開発が目標である。SMAアクチュエータの出力において重要となるパルス通電加熱時の冷却速度を向上させるため、空冷に加え、可動部に液体を充填し、冷却効果を評価し、SMAアクチュエータの熱応答の向上を目指す。また、高出力の振幅を得るために、SMAアクチュエータと組み合わせるバイアスばねの剛性を詳細に評価し、最適な剛性のバイアスばねを形成する。また、マイクロピン、フレームおよびバイアスばねを形成し、SMAアクチュエータと接合し、発生振幅の評価を行う。さらに、SMAアクチュエータを2層張り合わせた振幅増幅型の刺激提示素子の作製プロセスの開発にも取り組む。

3. 研究の方法

個人差なく触覚情報報の提示を目指し、高出力触覚ディスプレイの開発を以下のように取り組んだ。

(1) SMAアクチュエータの冷却速度向上

SMAアクチュエータの出力において重要となるパルス通電加熱時の冷却速度の向上を目指し、可動部の空冷に加え、液体を充填した場合による冷却の効果について評価を行う。

(2) 触覚ディスプレイ出力拡大のためのバイアスばねの開発

SMAアクチュエータとバイアスばねを組み合わせた場合に出力される振幅の増大を目指し、SMAアクチュエータの剛性も考慮して、所望の剛性が得られるPDMS(Polydimethylsiloxane)バイアスばねの作製に取り組む。

(3) SMAアクチュエータおよびバイアスばね張り合わせ構造の出力特性の評価

マイクロピン、フレームおよびPDMSバイアスばねの形成手法を確立し、作製したSMAアクチュエータと接合し、発生振幅の評価を行う。さらに、SMAアクチュエータを2層接合した振幅増幅が可能な素子の作製手法の確立にも取り組む。

4. 研究成果

(1) SMAアクチュエータの冷却速度向上

作製したSMAアクチュエータを図1に示す。ヒーターの断線は発生せず、SMAアクチュエータの中心部に初期変位を与えても破断しないことを確認した。シリコンオイルを形成したSMAアクチュエータ内に充填し、SMAアクチュエータの中心部に初期変位を与え、Pt配線へ直流通電加熱によって形状回復温度に達するまでに必要な熱量を調べた。液体を充填したものは、形状回復温度(~65°C)に達するまでの熱量は空冷の場合に比べ約4倍必要であることがわかった。

次に、液冷の効果を調べるため、パルス通電加熱した際のSMAアクチュエータの発生力を測定した。図2に示すように駆動周波数の増加とともに発生力は減少した。これは充填した液体の温度が徐々に上昇する影響で、皮膚下の触覚受容器が感知しやすい周波数15 Hz以上では冷却が追い付かずベースラインが上昇するために、発生力が減少し、空冷の場合と同様に冷却が律速して発生力が減少することが明らかとなり、加熱および冷却速度のさらなる向上が必要であることがわかった。

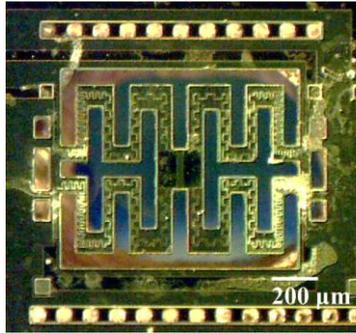


図1 作製した SMA アクチュエータ

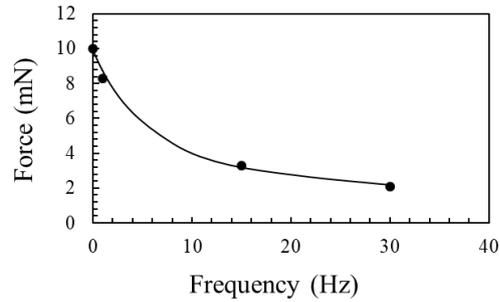


図2 液体を充填した SMA アクチュエータの発生力の周波数応答

(2) 触覚ディスプレイ出力拡大のためのバイアスばねの開発

バイアスばねと SMA アクチュエータを組み合わせた場合に出力される振幅の増幅を目指し、最適なバイアスばねの剛性を得るため、膜厚を変えた PDMS バイアスばねを作製し、剛性評価を行った。PDMS バイアスばねに SMA アクチュエータと接合する際の初期変位に相当する約 300 μm まで変位を与えても破断等は見られなかったが、PDMS の膜厚が 200 μm 程度の場合には負荷および除荷との間で大きなヒステリシスが生じることがわかった(図3)。膜厚が薄い 10 μm 程度では、ヒステリシスが小さい良好なバイアスばねの特性を得ることができた。また、SMA アクチュエータと組み合わせた場合に見込まれる発生力は約 5 mN 程度であり、変位は約 45 μm 程度であることがわかり、人間の皮膚に十分な刺激を提示できる見通しを得ることができた。

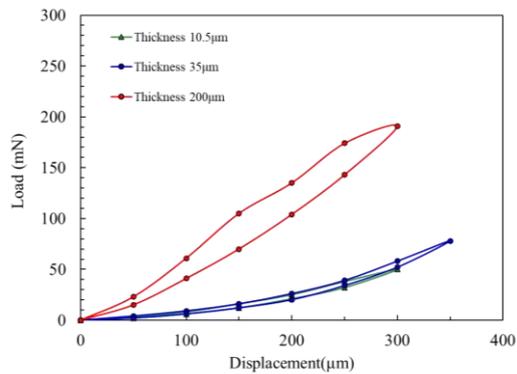


図3 PDMS バイアスばねの剛性評価

(3) SMA アクチュエータおよびバイアスばね張り合わせ構造の出力特性の評価

PDMS バイアスばね上に感光性レジスト SU-8 のピン層を形成し、貫通エッチングにより形成した Cu フレーム層と良好に接合を行うことができた(図4)。SMA アクチュエータ上に接着剤を塗布し、PDMS バイアスばね側のピン部から下地の SMA アクチュエータ中心部と位置合わせを行い、接合した。PDMS バイアスばね上のマイクロピンを精度良く SMA アクチュエータ中心部に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。また、マイクロピンによる初期変位による SMA アクチュエータおよび PDMS バイアスばねの破断は見られないことを確認した。



図4 作製したピン層および Cu フレーム層/PDMS バイアスばね層

周波数を変えてパルス通電加熱した際の SMA アクチュエータの振幅測定を行った。図5に示すように、周波数 1-5 Hz のパルス通電加熱では、数 μm 程度の振幅が得られたが、PDMS バイアスばねの粘弾性による影響が顕著に見られ、SMA アクチュエータの加熱後に出力される変位に遅れが生じることがわかった。また、皮膚受容器の感知感度の高い 20 Hz 以上の周波数では振幅が見られず、PDMS バイアスばねによる粘弾性の影響により、1 パルスあたりの応答

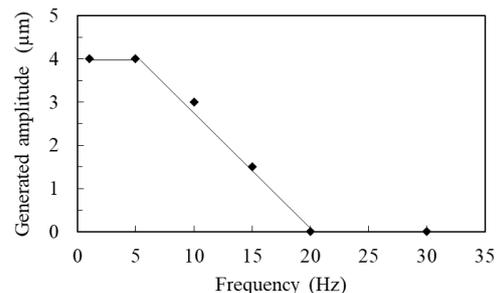


図5 PDMS バイアスばね/SMA アクチュエータの発生振幅の駆動周波数応答

に十分に追い付かなくなることで、振幅が低下することが明らかとなった。

さらに、振幅倍増を目指し、図6に示すようにスチールボールを介して、作製した SMA アクチュエータを2層接合した素子を形成したが、SMA アクチュエータの中心部と下地の SMA アクチュエータの中心部の位置合せ精度や接合時の接着剤の広がりによる影響が大きく、十分な動作評価の実現には至らなかった。

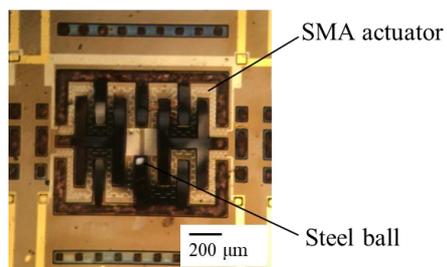


図6 作製した SMA アクチュエータ
2層張り合わせ型

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryo Saito, Yusuke Kimura, Jiale Xu, Takashi Mineta	4. 巻 141
2. 論文標題 Fabrication of Tactile Display Mechanism Using Arrayed SMA Thick Film Actuator and Si TSV Layer with Individually Connecting Diode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 p.260-264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.141.260	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Jiale Xu, Yusuke Kimura, Kazuki Tuji, Akira Maruyama, Ryo Saito, Takashi Mineta
2. 発表標題 Characterization of the cooling-fluid-filled arrayed SMA thick film actuator for high power tactile display
3. 学会等名 The 10th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiale Xu, Yusuke Kimura, Kazuki Tuji, Akira Maruyama, Ryo Saito, Takashi Mineta
2. 発表標題 Characterization of the cooling-fluid-filled SMA thick actuator array for high power tactile display
3. 学会等名 The 9th International Conference on Smart Systems Engineering 2021 (SmaSys2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------