

# 細径形状記憶合金による振動触覚提示が可能な指先装着型デバイスの開発

安達 祐輝<sup>1,a)</sup> 嵯峨 智<sup>1,b)</sup>

**概要：**メタバース技術の発展に伴い、Head Mounted Display と同時に利用可能な触覚提示デバイスの開発は盛んに行われている。特に Augmented Reality 環境では実際の触覚を阻害しないデバイスが求められる。本研究では、非常に細い繊維状の細径形状記憶合金を用いた、指先腹部にワイヤで振動触覚を提示する装着型デバイスを提案する。この SMA はモーターなどのアクチュエータと比較して、軽量かつ静音で、自然冷却でも放熱時間が短く、高速応答が可能である。本稿では、入力信号の ON/OFF の割合を変化させた場合、振動触覚の知覚に与える影響を調査し、ON 時の割合が 20%において振動触覚が強く明瞭になることが分かった。

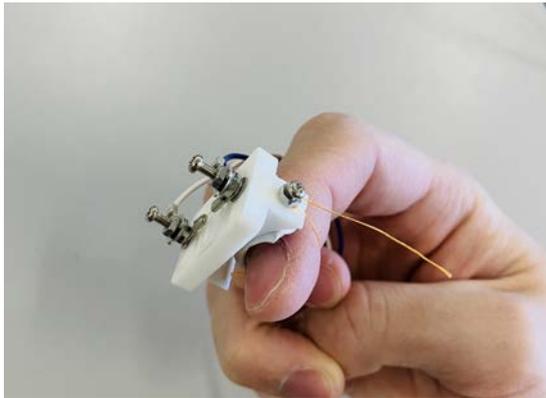


図 1: 製作したプロトタイプ

## 1. はじめに

メタバース技術の発展に伴い、Head Mounted Display と同時に利用可能な触覚提示デバイスの開発も盛んに行われている。特に Augmented Reality (AR) 環境では実際の触覚を阻害しないデバイスが求められる。AR 環境で使用することを想定した触覚提示デバイスは、想定されるシーンごとに数多く提案されており [1]、コンテンツへの没入感向上という観点で重要視されている。装着型触覚提示デバイスにおいて、特に形状記憶合金 (Shape Memory Alloy: SMA) を利用した提示手法 [2], [3], [4] は、他のアクチュエータと比較して駆動音が静かであるという優位性がある。しかし、質量が大きい、応答性が悪い、タスクや HMD へ

の干渉という問題点があった。

本研究では、非常に細い繊維状の細径 SMA を用い、指先腹部に接するワイヤを介して触覚を提示することで、前述した問題点を解決した、振動触覚を提示する指先装着型のデバイスを提案する (図 1)。本稿では、提案手法を基にプロトタイプを製作し、入力信号の ON/OFF の割合を変化させた場合の振動触覚について、物理的な振幅、周波数の測定と実験協力者による主観評価の結果を報告する。

## 2. 関連研究

Aoki ら [5] は、指先装着型力覚提示デバイスにおいて、違和感や疲労感が生じないデバイスの質量は、少なくとも 2.1g であることを示している。また、ベルトと比較してワイヤの方が弱い力で圧覚を作り出すことができることも示している。また、Mizukami ら [6] は、線径 50  $\mu\text{m}$ 、長さ 5mm の SMA にパルス電流を加えることで、300 Hz までの周波数範囲で知覚可能な振動を発生できることを示している。さらに、複数のアレイ状の SMA を時間差をつけて駆動することで、皮膚上の任意の場所にファントムセッションや仮現運動の発生が可能である。

本研究では、上記 2つの研究成果をもとに、非常に細い繊維状の細径 SMA を用いた指先装着型デバイスを製作した。指先腹部の接する箇所にワイヤを用いることで、軽量化および指腹部の露出による実環境との接触を実現している。また、従来の SMA を用いた触覚提示手法は、主に圧覚提示を対象としており、振動触覚についてはあまり検討されていない。本手法は単一の機構で振動触覚だけでなく圧覚も提示できる可能性がある。

<sup>1</sup> 熊本大学

<sup>a)</sup> adachi@saga-lab.org

<sup>b)</sup> saga@saga-lab.org

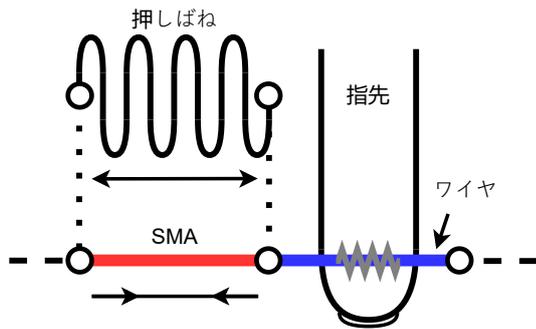


図 2: 提案手法の動作概略: SMA により張力を生成し、押しばねにより復元させる。これらの繰り返し動作により指先のワイヤを振動させ、触覚を生起させる。

### 3. 提案手法

ヒトが振動を知覚する際、皮膚組織下に存在する機械受容器であるマイスナ小体、パチニ小体などによって電気信号へ変換され、脳に伝達される。本手法では、特にパチニ小体で知覚される周波数帯 (50 Hz~400 Hz) で SMA を振動させ、指先腹部に振動触覚を提示する。パチニ小体の受容野は大きく、また周波数により  $1\mu\text{m}$  程度の変位でも応答するほど高感度であるため、SMA の微小振動を知覚することができる [7]。図 2 に提案手法の動作概略を示す。指先腹部に SMA が直接接触すると、通電収縮時の発熱で火傷の可能性があるので、ワイヤを介して振動触覚を提示する。また、SMA が元の長さに戻る際に、少し緩むことで指先腹部に張力がかからなくなってしまうため、押しばねにより張力を維持する。

### 4. プロトタイプ

提案手法を基に製作したプロトタイプ (図 1) について、アクチュエータ、システム構成、設計・組立に分けて述べる。

#### 4.1 アクチュエータ

アクチュエータである SMA は、BMF50 (トキ・コーポレーション) を使用した。この SMA は線径  $50\mu\text{m}$  と非常に細く、全長  $L$  の約 4% の変位量を取り出すことができる。なお、最大変位量を取り出すために必要な標準駆動電流は 80 mA である。プロトタイプは指の横幅に収まることが望ましいため、圧着のしやすさの観点からも SMA の長さは  $L = 5\text{mm}$  とした。このとき、標準駆動電流を流すために必要な電圧は 211 mV である。

#### 4.2 システム構成

図 3 に提案プロトタイプのシステム構成を示す。制御機器として XIAO ESP32C3、SMA への標準駆動電流の供給

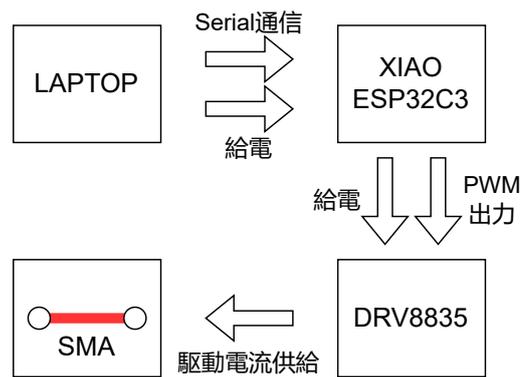


図 3: 提案プロトタイプの制御システム構成: PC からマイコン (ESP32C3) へ制御信号を送り、モータドライバ (DRV8835) を経由し、SMA を駆動する。

にモータドライバとして DRV8835 を使用した。DRV8835 への給電には、ESP32C3 の 3V3 ピン (3.3 V, 最大 700 mA) を割り当てた。20 kHz の PWM 出力で duty 比によって電源 ON 時の電力を制御し、任意の時間で ON/OFF の切り替えを行うことで入力信号を決定している。なお、今回は 5 ms の中で電源の ON/OFF を切り替えることで、Pacini 小体の刺激に適した 200 Hz の入力信号を生成する。

#### 4.3 設計・組立

押しばねおよび装着部は Autodesk Fusion で 3D モデルを作成し、Poly-Lactic Acid (PLA) を使い 3D プリンタで印刷した。これは金属製の押しばねを使用すると、SMA と接続した際、短絡する可能性が非常に高いためである。また、SMA の収縮に対応するため、ばね定数が小さくなるよう、間隔、幅を設計した。図 4 に作成した PLA 押しばね (3D モデル) を示す。



図 4: PLA 押しばね (3D モデル)

メガネ端子に圧着した SMA と各パーツの固定には M2 ネジ、ナットを使用した。片方の端子のみ PLA 押しばねを貫通して装着部と固定している。指先腹部に接するワイヤは、釣糸の中でも弾性係数が大きく伸びにくい PE ライ

ンを使用し、可動端子に結び付けている。ワイヤの固定端子側は装着部側面にあるナットで固定している。プロトタイプの質量を測定したところ、5gであった。

## 5. 検証

入力信号の ON/OFF の割合を変化させた場合に提示される振動触覚について、物理的な振幅、周波数の測定と実験協力者による主観評価について述べる。

### 5.1 振動測定

プロトタイプが任意の周波数の入力信号に対し、物理的に振動しているかを測定する。入力信号は 200 Hz, ON: 50%, 振動の測定には CCD レーザ変位計 LK-G80 (KEYENCE) を使用した。PLA 押しバネの可動側端子に軽く張力がかかるようにワイヤ部の長さを調節し、端子の根元にレーザが垂直に照射されるように位置を調整した。また、レーザの散乱を押さえるため照射部を油性マーカーで黒塗りにした。装置のサンプリング周期を 20  $\mu$ s, サンプリング点数を 65536 点に設定し、測定を行った。図 5 に測定環境を示す。なお、実験室の室温は 22°C であった。

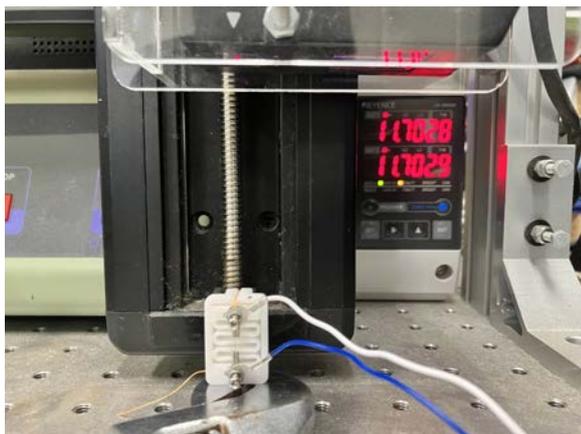
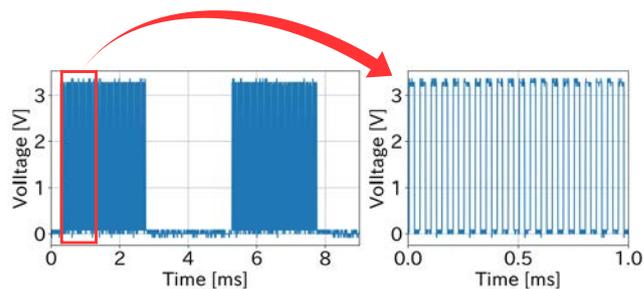


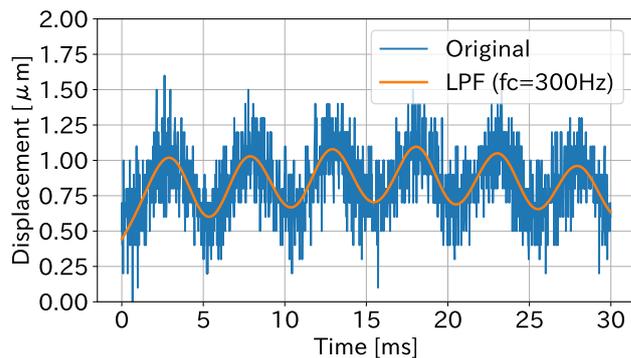
図 5: 測定環境

図 6a にオシロスコープで観測した ESP32C3 から DRV8835 への入力波形 (200 Hz, ON: 50%), 図 6b に振動測定結果を示す。測定した物理的振動は 200 Hz で入力信号 (図 6a) と一致していることが分かる。また、振幅の変位量は 0.5  $\mu$ m 程度であることが分かった。

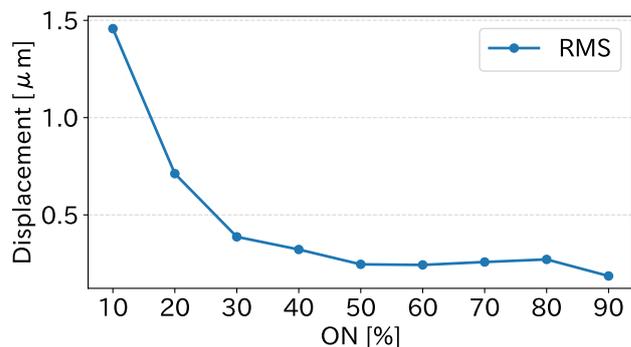
次に、同測定環境で入力信号は 200 Hz のまま ON の割合を 10%刻みで 10-90%まで変化させた場合の振幅をそれぞれ測定した。図 6c にそれぞれの波形の振幅について、実効値を算出し比較する。これは高周波ノイズの影響を取り除いて、振幅を比較するためである。実効値に注目すると、入力信号の ON 時の割合の増加に伴い、変位量は非線形に減少している。これは ON 時の割合が大きいほど SMA が自然冷却による伸張によって元の長さに戻る前に、再度収縮してしまうからだと考えられる。



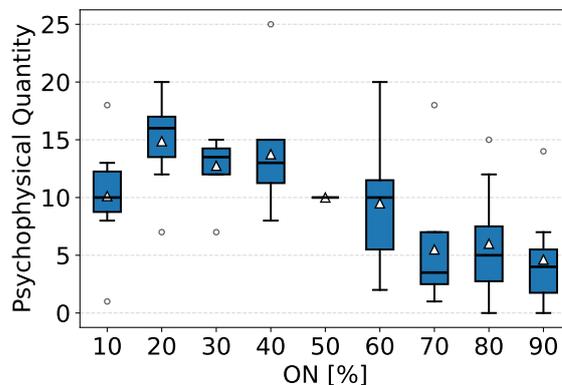
(a) 入力波形 (200 Hz, ON: 50%)



(b) 振幅波形 (200 Hz, ON: 50%)



(c) 各振幅の実効値比較



(d) マグニチュード推定結果

図 6: 入力信号, 振幅実測値および知覚実験の結果

## 5.2 振動触覚の評価

5.1 節での実験をうけ、200 Hz で ON/OFF の割合を変化させた場合に感じる振動触覚について、マグニチュード推定を利用した評価実験を行った。なお、実験協力者は 8 名 (平均年齢 22.9 歳, 男性 7 名, 女性 1 名, 全員右利き) で一人当たりの所要時間は 20 分程度, 実験室の室温は 22°C であった。

実験協力者に調査の目的を説明し, プロトタイプを右手人差し指に装着した。装着に際し, 安定性のため柔らかい粘着剤を指とプロトタイプの間挟み, 固定した。ワイヤは指先腹部に軽く接する程度に留め, 過度な圧迫をしないように調節した。まず, 標準刺激である 200 Hz, ON: 50% の信号による振動触覚を提示し, 知覚できるかを確認した。次に, 標準刺激と同周波数で ON 時の割合が 10-90% (10% 刻みで 50% を除く) の内一つを比較刺激として選択し, 標準刺激と比較刺激を交互に 10 s 程度ずつ提示した。その後, 標準刺激によって提示される振動触覚を 10 とした場合, 比較刺激によって提示される振動触覚の振幅がいくつに感じるかアンケートに回答してもらった。提示する ON 時の割合の順番は, 順序効果を避けるため, 乱数生成を用いランダムとした。全割合について調査した後, 自由記述のコメントについても回答してもらった。図 6d にマグニチュード推定の結果を示す。

心理的物理量の中央値, 平均は 20% 付近で最大, 30-40% でも比較的高い値を維持している。反対に, 50% 以降は明確に低下しているおり, 70-90% では小さい値に集中している。特に注目すべき点は, 図 6c より変位量が最大であった 10% の条件が, 必ずしも心理的物理量の最大にならない点である。これは, SMA の変位量が大きすぎる, SMA が収縮している時間が短すぎるといった要素が考えられる。

プロトタイプ全体に対して, “手指の角度を変えると振動の感じ方が変化してしまう”, “指先が冷たいと振動触覚を感じにくい”, “入力信号が切り替わるタイミングで大きめの振動触覚を知覚した” という意見も挙がった。

## 6. 課題

製作したプロトタイプは, 現状指先への装着において粘着剤なしでは不安定な構造となっている。また, 5g と大多数のデバイスよりも軽量ではあるが, Aoki ら [5] が示した指先装着型力覚提示デバイスにおいて, 少なくとも違和感や疲労感が生じないデバイスの質量である 2.1g を超過している。したがって, デバイスの固定方法および質量, サイズのさらなる縮小化を再検討する必要がある。これらの解決により, 手指の角度による振動触覚の変化や疲労感を低減できると考えられる。

本稿では電源 ON 時の割合のみに焦点を当て, 変位量および心理的物理量を調査した。今後は, 周波数を変化させた場合も含めて議論することで, 交互作用を加味した上で

の最適な振動触覚のパラメータを決定する。

## 7. おわりに

本稿では, 非常に細い繊維状の細径 SMA を用い, 指先腹部に接するワイヤを介して触覚を提示することで, 応答性がよく, タスクや HMD に干渉しない, 軽量かつ静音な振動触覚を提示する指先装着型のデバイスを提案した。プロトタイプを製作し, 調査を行った結果, 変位量と心理的物理量の間には必ずしも比例関係が存在せず, ON 時の割合が 20% の場合に最も大きい振動触覚を提示できることが示された。本研究の知見と周波数ごとの変位量および心理的物理量の比較を通して, 最適な振動触覚のパラメータを決定し, さらなる軽量化, 多指への拡張により, 長時間使用可能な提示できる触覚の自由度が高いデバイスの製作を目指す。

## 参考文献

- [1] Thomas Muender, Michael Bonfert, Anke Verena Reinschluessel, Rainer Malaka, and Tanja Döring. Haptic Fidelity Framework: Defining the Factors of Realistic Haptic Feedback for Virtual Reality. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, pp. 1–17, New York, NY, USA, April 2022. Association for Computing Machinery.
- [2] Takuro Nakao, Kai Kunze, Megumi Isogai, Shinya Shimizu, and Yun Suen Pai. FingerFlex: Shape Memory Alloy-based Actuation on Fingers for Kinesthetic Haptic Feedback. In *Proceedings of the 19th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '20, pp. 240–244, New York, NY, USA, November 2020. Association for Computing Machinery.
- [3] Robert Pettys-Baker and Brad Holschuh. Reconfigurable, Adhesive-Free, Wearable Skin Strain Device. In *Adjunct Proceedings of the 2023 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing & the 2023 ACM International Symposium on Wearable Computing*, UbiComp/ISWC '23 Adjunct, pp. 267–270, New York, NY, USA, October 2023. Association for Computing Machinery.
- [4] Robert Scheibe, Mathias Moehring, and Bernd Froehlich. Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments. In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, March 2007.
- [5] Takafumi Aoki, Hironori Mitake, Danial Keoki, Shoichi Hasegawa, and Makoto Sato. Wearable haptic device to present contact sensation based on cutaneous sensation using thin wire. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '09, pp. 115–122, New York, NY, USA, October 2009. Association for Computing Machinery.
- [6] Yosuke Mizukami and Hideyuki Sawada. Tactile information transmission by apparent movement phenomenon using shape-memory alloy device. *International Journal on Disability and Human Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 277–284.
- [7] Roland S. Johansson and Åke B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neurosciences*, Vol. 6, pp. 27–32, January 1983.