



フレキシブル基板をコイルおよび振動体とした 高密度触覚ディスプレイ（第一報） － 試作及び心理実験による原理検証 －

High Density Tactile Display Using Flexible Substrate as Coil and Vibrating Body (I)
- Verification of Principle by Trial Manufacture and Psychological Experiments -

兵頭伸¹⁾, 藤亘輝²⁾, 溝口泉²⁾, 梶本裕之²⁾

Shin HYODO, Kouki FUJI, Izumi MIZOGUCHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, hyodo@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {fuji, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 従来の触覚ディスプレイの多くは、高密度な触覚提示を実現するために、特殊な材料や複雑な機構を必要としている。そこで本研究では、比較的入手・製造が容易なフレキシブル基板と磁石を用いて、1 mm 間隔の高密度触覚提示を可能とする手法を提案する。ピン状に形成したフレキシブル基板の近傍にネオジウム磁石を配置し、ローレンツ力により振動刺激を生成する。本稿では、提案デバイスの周波数応答および駆動ピンが他のピンに与える影響について評価するとともに、流れ場提示における識別能力を測定し、触覚提示性能の有効性を検証した。

キーワード: 高密度触覚, フレキシブル基板, ローレンツ力

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 空間における指先への高密度な触覚提示は、ユーザの没入感を高めるうえで極めて重要である。人間の指先には機械受容器が高密度に分布しており[1], 理想的には 1 mm 間隔の高密度な触覚提示が求められる[2]。

指先への高密度触覚提示は、様々な手法によって試みられている。Ros らは、 piezoアクチュエータを用いたピンマトリクス構造により、1.5 mm 間隔での触覚提示を実現している[3]。Shen らは、電圧印加によって液体が移動する電気浸透現象を利用し、約 2.4 mm 間隔の触覚提示デバイスを開発した[4]。しかし、これらの手法は、特殊な材料や、それらを動作させるための複雑な機構が必要となる。個々のアクチュエータを不要とする手法として電気触覚ディスプレイが挙げられ、高い解像度の触覚提示を実現できるが[5], 感覚強度の調整などの課題も多い。我々は、比較的容易に入手・製造可能なフレキシブル基板と磁石を用いて、高密度な触覚提示を行う手法を提案する。基板製造技術を用いた従来の触覚提示手法の多くが基板中にコイルを形成し、磁石を動かす方式であるのに対し[6], フレキシブル基板にコイル, 振動体, 弾性体の役割を担わせるシ

ンプルな構造で 1 mm 間隔の触覚提示アレイを形成する。近年同様にシンプルな構造を取るものとして液体金属を封入したソフトチューブを用いた例があるが[7], 本手法は特殊な材料を必要としないという特徴を持つ。

本研究では、フレキシブル基板と磁石を用いた、高密度触覚ディスプレイの開発し、その性能を評価した。物理実験では、本デバイスの周波数応答および駆動ピンが他のピンに及ぼす影響を測定し、心理実験では、本デバイスを用いた流れ場提示における識別能力を評価した。

2. デバイス概要

提案デバイスの構成を図 1 に示す。本デバイスは、1 mm 間隔でスリットを施したフレキシブル基板とそれに接続されたリジッド基板、ネオジウム磁石とそれを固定するフレームから構成される。湾曲したフレキシブル基板はスリットによって分割され 7 列のピンを形成しており、各ピンはハーフブリッジ回路が接続されている。これらの回路はマイクロコントローラ (Raspberry Pi Pico W) によって制御され、各ピンは独立して駆動可能である。

本デバイスは図 2 に示すようにフレキシブル基板に流れる電流と近傍に配置された磁石によって発生するロー

レンツ力により、フレキシブル基板自体を変形させる構造となっている。変形の方向は、電流および磁界の向きによって決まる。本デバイスは、フレキシブル基板の長軸側の側面がローレンツ力の影響を強く受ける。そのため、ローレンツ力が内側方向に加わると基板は上方向に、外側方向に加わると下方向に変形する。

本稿ではバイポーラ矩形波電流を流すことで、フレキシブル基板に周期的な変形を生じさせ、振動させる。

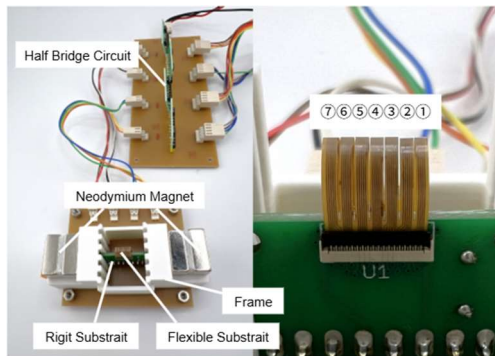


図 1 デバイスの構成

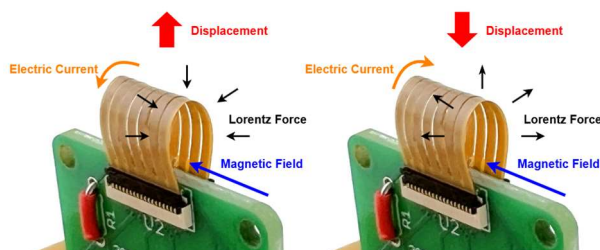


図 2 フレキシブル基板が変形する様子

3. 実験

3.1 実験 1. 周波数応答及び他ピンへの影響の測定

本実験では、様々な周波数の矩形波を入力し、それに対する変位を測定することで、本デバイスの周波数応答を評価した。また、特定のピンを駆動したときの他のピンに及ぼす影響についても測定を行った。

3.1.1 実験方法

振幅の測定には、レーザー変位計（CL-3050 および CL-P015, KEYENCE）を用いた。入力信号には、4～4096 Hz の範囲における 2 の乗数（4, 8, 16, ..., 4096 Hz）の矩形波を用い、中央のピン（図 1 のピン 4）を駆動した際の垂直方向の変位を測定した。さらに、振幅の変化が急峻であった周波数帯に対しては、変化量に応じて 500 Hz, 100 Hz, 50 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz 間隔で段階的に周波数を細分化し、測定を行った。

各周波数に対する振動提示は 500 ms とし、これを 6 回繰り返して測定を実施した。測定された出力波形は、図 3 に示すように、3000 Hz 程度の高周波成分が含まれていた。そこで、提示した周波数成分を抽出するために入力信号の

半周期ごとの移動平均処理を施した。これにより、補正波形は矩形波ではなくなるが、振幅の測定には問題ないと考えられる。

また、出力波形は時間とともに上昇傾向を示した。そこで、各波形に対して線形フィッティングを行い、ベースラインの傾きを補正した。さらに、64 Hz 以上の入力に対しては、非線形な傾向を補正するために、LOWESS（Locally Weighted Scatterplot Smoothing）による平滑化を適用した。

以上の処理を施した補正波形に対して、矩形波 1 周期ごとに最大値と最小値を抽出し、その差を振幅とした。

加えて、60 Hz の矩形波で各ピンを個別に駆動し、他のピンにおける変位を同様の手法で測定した。これにより、隣接ピン間における振動の伝播や干渉の有無を評価した。

3.1.2 実験結果

計測の一例として、64 Hz の矩形波入力に対する出力波形を図 3 に示す。赤線は測定された元の波形、青線は補正後の波形である。

また、本デバイスの周波数応答のグラフを図 4、2500 Hz から 3500 Hz における拡大図を図 5 に示す。補正後の波形は 3190 Hz で最大値 95 μm を示した。また、2700 Hz および 3300 Hz 付近にもピークが観測され、900～1000 Hz 付近では振幅がほぼ 0 に近い値を示した。

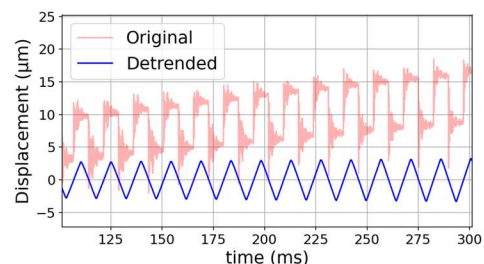


図 3 64 Hz の矩形波入力に対する出力振幅

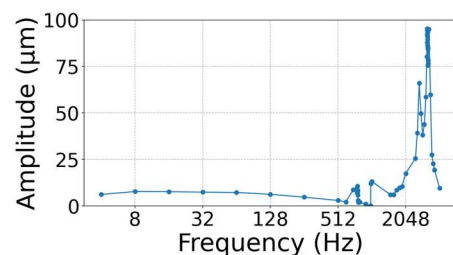


図 4 周波数応答

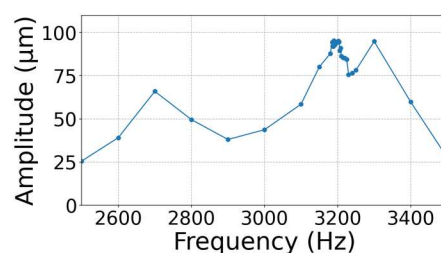


図 5 2500 Hz から 3500 Hz における拡大図

次に、各ピンを 60 Hz の矩形波で駆動した際に、他のピンに生じた変位を測定した結果を図 6 に示す。横軸は駆動ピンの位置を示し、縦軸は振幅を表している。端のピンを駆動した場合には、駆動ピンそのものの振幅が大きく、他のピンとの振幅差も大きい。一方、中央付近のピンを駆動した場合には、駆動ピンそのものの振動は小さくなり、ピン間の振幅差も小さくなる傾向が見られた。

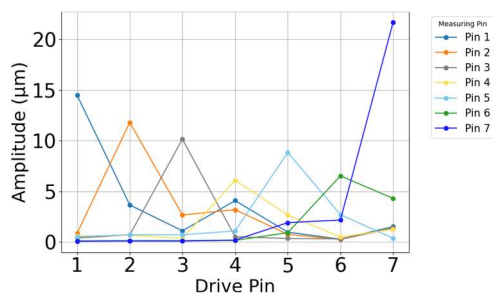


図 6 各ピンを駆動したときの他のピンの出力振幅

3.2 実験 2. 流れ場提示による識別能力の評価

本実験では、流れ場を提示し、その流れ場方向の正答率を測定することで、本デバイスの方向識別能力を評価した。さらに、各実験条件において主観的評価も行った。

3.2.1 被験者および実験環境

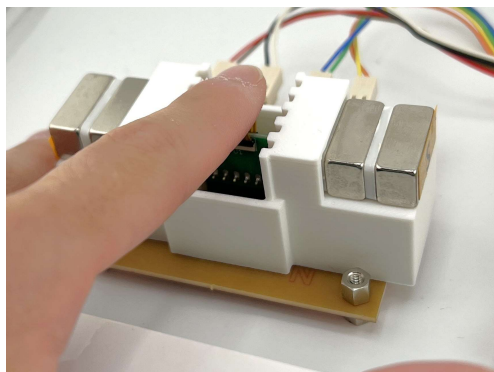


図 7 実験の様子

実験の様子を図 7 に示す。実験は、21～24 歳の 8 名（男性 5 名、女性 3 名、左利き 1 名）を被験者として実施した。被験者は椅子に着座し、デバイスと同程度の高さに設置した台の上に手首を置いた状態で実験を行った。フレキシブル基板中央に利き手の人差し指の腹を軽く乗せ、加圧しないよう指示した。

3.2.2 実験条件

本実験では、被験者の利き手の人差し指に対して、60 Hz の振動を用いた流れ場を提示した。流れ場は、1 つの刺激提示時間（DOS）を 120 ms、2 つの刺激間の間隔（SOA）を 100, 120, 140 ms とし、図 1 のピン 1～7 または 7～1 の順で、それぞれ 1 回ずつ振動を提示した。

3.2.3 実験手順

まず、各 SOA 条件について 10 回ずつ計 30 回流れ場を提示し、被験者にはその流れ方向（右、左）を回答させた。提示する SOA 条件および流れ方向の順序はランダムに決定した。

続いて、再度各 SOA 条件で流れ場を提示し、流れ場の滑らかさ（1:滑らかでない, 7:滑らか）・明瞭さ（1:明瞭でない, 7:明瞭）・自然さ（1:不自然, 7:自然）について、7 段階リッカート尺度で主観評価を行った。

3.2.4 実験結果

各 SOA 条件での正答率を図 8 に示す。どの SOA 条件においても、被験者は全員 50% 以上の正答率を示し、平均正答率は 70% を上回った。この実験結果に対して Friedman 検定を行った結果、各 SOA 条件において有意差は見られなかった。

各 SOA 条件での主観評価の結果を図 9 に示す。各評価項目においても同様に Friedman 検定を行った結果、各 SOA 条件において有意差は見られなかった。

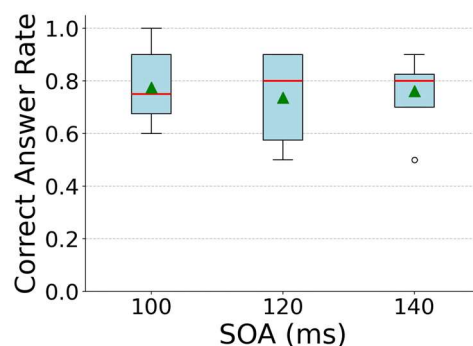


図 8 各 SOA 条件での正答率

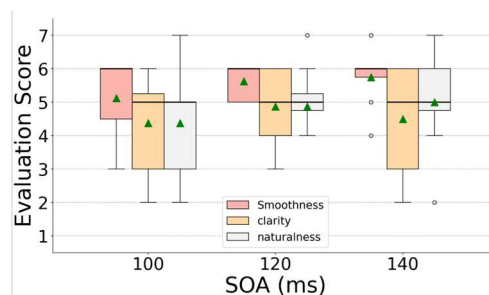


図 9 各 SOA 条件での主観評価

4. 考察

実験 1 では、指を接触させずに振動を計測しているため、実際に指を置いた際の振動特性とは異なる可能性がある。特に、皮膚との接触によってエネルギーが吸収・減衰されることで、振幅は実際には大きく低下することが予想される。それにもかかわらず、本実験により各ピンが確かに振動すること、ならびにピン間で振動の独立性が保たれていることを確認できた点には意義がある。

なお、指を接触させた状態での正確な振動計測は、計測

機器の設置や皮膚の動的特性の影響などにより技術的に困難である。したがって、最終的には心理実験により、提示される振動が知覚可能であるかを確認することが実用上有効であると考えられる。今回実施した心理実験は、新たな知覚現象の発見を目的としたものではなく、あくまで本デバイスによる振動提示が主観的にも認識可能であることの検証を主な目的としている。

4.1 実験 1. 周波数応答及び他ピンへの影響の測定

図 3 の赤線で示される波形が上昇傾向を示すのは、本デバイスの構造が上方向への変位に対しては比較的自由である一方、下方向への変位は制約を受けやすいためであると考えられる。第 2 章で示したように、ローレンツ力はフレキシブル基板の長軸側の側面に強く作用し、フレキシブル基板には、押しつぶす方向または引き延ばす方向に力が加わる。したがって、押しつぶす方向、すなわち振幅の上昇側で力のつり合いが取りやすいことは、構造的に妥当であるといえる。

図 4 より、本デバイスは 2700 Hz、3190 Hz および 3300 Hz 付近に共振ピークを示し、それぞれ異なる固有振動モードに対応していると考えられる。一方、900～1000 Hz 付近で変位が 0 に近い値を示したのは、反共振により複数の固有モードが干渉し合い、ローレンツ力が打ち消しあったためであると推察される。

図 6 において、ピンが中央に近いほど振幅が小さくなるのは、ピンが中央に近いほど隣接ピンの影響を受けやすいためであると考えられる。特に中央付近のピンでは、隣接ピンとの機械的干渉や摩擦が生じやすく、それにより振動が阻害されて振幅が低下すると推察される。一方で、端のピンは片側にしか隣接ピンが存在しないため、干渉の影響が小さく、振幅が大きくなる傾向が見られる。

4.2 実験 2. 流れ場提示による識別能力の評価

図 8 より、すべての条件において平均正答率 70%以上となり、本デバイスが一定以上の方向識別能力を有することが示された。ただし、通常の振動子による流れ場提示の正答率がほぼ 100%に達すると考えられることを踏まえると、本デバイスにおける正答率はやや低い結果となった。

また、約半数の被験者から、「一方向の動きに続いて反対方向への動きが提示された」との報告があった。今回用いた 60 Hz の振動はマイスナー小体にもみならずパチニ小体の有効応答範囲（約 60～1000 Hz）にも含まれる。特に矩形波には高調波成分が多く含まれることから、パチニ小体が強く応答した可能性がある。パチニ小体は空間解像度が低いため、その活動が空間的なあいまいさを生み、結果的に識別精度を低下させた、あるいは往復するような知覚を引き起こした可能性がある。

また、図 8 および図 9 から、各 SOA 条件において流れ場の正答率と各評価項目に有意差は見られず、SOA 条件による流れ場の質は変わらないと考えられる。

さらに、一部の被験者からは「振動の強度が単一の触覚ディスプレイとして不十分である」との意見や、「熱を強く感じる」との報告もあった。したがって、本デバイスは振動の強度および発熱に関する課題がある。

5. 結論と今後の課題

本稿では、フレキシブル基板と磁石を用いた振動デバイスを提案し、その基本性能および識別能力の検証を行った。

実験 1 では、周波数応答を調査し、2700 Hz、3190 Hz、および 3300 Hz 付近で共振、900～1000 Hz で反共振が生じていることを確認した。

実験 2 では、流れ場提示による識別能力を評価し、すべての条件において 70%以上の正答率が得られた。

今後は、各ピンの振動の独立性向上、振動強度の増強、発熱への対策などを行う予定である。さらに、本手法の 2 次元マトリクス構造への拡張などを試みる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957 の助成を受けたものです

参考文献

- [1] R. S. Johansson, A. B. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin," *J Physiol*, Vol. 286, No. 1, pp. 283-300, 1979.
- [2] N. Garcia-Hernandez, F. Bertolotto, F. Cannella, N. G. Tsagarakis, D. G. Caldwell, "How tactor size and density of normal indentation tactile displays affects grating discrimination tasks," *IEEE Trans Haptics*, Vol. 7, No. 3, pp. 356-366, 2014.
- [3] P. M. Ros, V. Dante, L. Mesin, E. Petetti, P. D. Giudice, E. Pasero, "A new dynamic tactile display for reconfigurable braille: implementation and tests," *Front Neuroeng*, Vol. 7, Art. 6, 2014.
- [4] V. Shen, T. Rae-Grant, J. Mullenbach, C. Harrison, C. Shultz, "Fluid Reality: High-Resolution, Untethered Haptic Gloves, using Electroosmotic Pump Arrays," *Proc. UIST*, Art. 8, pp. 1-20, 2023.
- [5] M. Sobue, I. Mizoguchi, H. Kajimoto, "Optimal design of electrode placement in electro-tactile display and cutaneous sensory presentation to multiple fingers," *Proc. CHI EA*, Art. 738, pp. 1-5, 2025.
- [6] J. J. Zarate, H. Shea, "Using pot-magnets to enable stable and scalable electromagnetic tactile displays," *IEEE Trans Haptics*, Vol. 10, No 1, pp. 106-112, 2017.
- [7] A. Kurokawa, M. Shimizu, M. Ando, H. Noma, "Mouse Embedded Soft Vibration Actuator for Exploring Surface Textures," *Proc. of AsiaHaptics*, 2024.