



# 指先に水平方向の振動を提示する 柔軟なコイル構造触覚ディスプレイの開発

Soft Coil Actuator for Tangential Vibrotactile Feedback to the Fingertip

黒川朝陽<sup>1)</sup>, 清水真陽<sup>1)</sup>, 安藤潤人<sup>2)</sup>, 野間春生<sup>2)</sup>

Asahi KUROKAWA, Masaharu SHIMIZU, Mitsuhiro ANDO, and Haruo NOMA

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, akurukawa@mxdlab.net)

2) 立命館大学 情報理工学部 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

**概要:** 本研究の目的は、狭い部位に対して多点で複数の周波数成分を持った振動刺激を提示する触覚ディスプレイを開発することである。そのために、柔軟な振動アクチュエータを並列に配置し、同時に独立して駆動する触覚ディスプレイを開発した。駆動部は液体金属を封入したソフトチューブを永久磁石の周囲に巻きつけた形状であり、交流を印加することで電磁力により磁石に対して水平方向に微振動する。実験では本デバイスが提示できる周波数帯域を調べるために、入力する矩形波の周波数を変化させた場合に出力される振動の周波数特性を計測した。

**キーワード:** 触覚ディスプレイ, ソフトマテリアル, ソフトコイルアクチュエータ

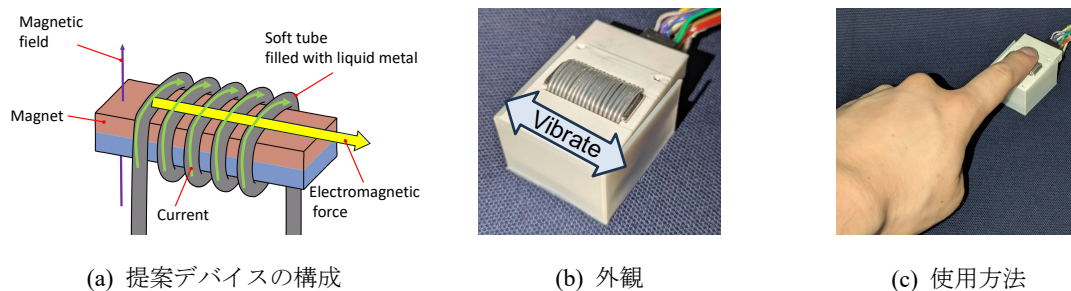


図 1 ソフトコイルアクチュエータ

## 1. はじめに

仮想物体の情報を提示するための技術は、主に視聴覚に関して、高解像度な刺激を与えるべく発展してきた。しかし、HMD のコントローラに搭載されるような触覚ディスプレイでは手のひら全体に一律の刺激を与えるのみで、独立した多点で刺激をするような高解像度の触覚は考慮されず、もし、指先といった小さな部位に対して、現実と同等の高解像度の触覚刺激を提示することができるようになれば、仮想の物体を実際に触って知覚を得ることができる。これは例えばオンラインショッピング体験の向上に寄与すると考える。

本研究の目的は、このような高解像度な触覚ディスプレイを開発することである。先行して開発された類似のデバイスには、高分子ゲルアクチュエータ[1]や超音波ディスプレイ[2]などがある。これらはどちらも狭い領域に対して同時に様々な周波数成分を持った振動を提示する

が、高分子ゲルアクチュエータは低周波帯で単純な振動を提示すること、超音波ディスプレイでは同時に多点を刺激することがそれぞれ困難であった。これらの課題を踏まえて、本研究室では以前にソフト振動アクチュエータ (Soft Vibration Actuator, 以下 SVA)[3] および SVA-Mouse[4]を開発した。SVA は指先などの狭い部位に対して複数の周波数で同時に多点を刺激できる。しかし、垂直振動で触覚提示をしているために、触れ方によってはチューブの変位を阻害し、触れ方によって知覚する振動の特性が大きく変化してしまう課題があった。そこで本研究では、水平方向に振動する構造をとることで、指で触れている間に振動を阻害されにくくなる構成を試みる。

## 2. 提案手法

指先に対して高解像度な刺激を提示し、水平方向に駆動する触覚ディスプレイとして、ソフトコイルアクチュ

エータ(Soft Coil Actuator, 以下 SCA)を開発した。その構成を図1(a), 外観を図1(b), 使用方法を図1(c)に示す。SCAは使用者の指先に接触させた状態で指と共に動かして使用し、ユーザの能動的な動きに応じた刺激を提示する触覚ディスプレイである。

図1(a)に示すようにSCAの上部には一つの磁石と複数本のソフトチューブから構成される駆動部を配置している。ソフトチューブには液体金属を封入しており、永久磁石に巻きつけることでコイル構造を構成している。永久磁石が発生させる磁界はソフトチューブに対して垂直方向に作用しているため、液体金属に交流を印加すると、電磁力によりソフトチューブは水平方向に振動する。本デバイスでは複数本のソフトチューブを用いて巻き数が5のコイルを並列配置しているため、それぞれのチューブに対して独立な入力電流を印加すると、独立に振動させることができ、その結果高密度な触覚を提示できると考える。

### 3. 周波数応答の計測実験

#### 3.1 実験概要

開発したSCAの周波数特性を調べるために、矩形波電流を印加した場合の応答を計測した。人の指先に存在し振動を知覚する触覚受容器であるマイスナー小体及びパチ

ニ小体は、それぞれ30~40 Hz, 150~200 Hzで知覚感度が高くなることが知られている[5][6]。

#### 3.2 振動波形の計測

まず、SCAにより提示される振動と入力波形の関係の傾向を調べるため、周波数範囲よりも広い範囲の10 Hz, 50 Hz, 250 Hzで1Aの矩形波電流を入力し、測距センサ(Panasonic, HG-C1050)により振動の変移を計測した。センサのサンプリングレートは1 kHz, 繰り返し精度は15  $\mu\text{m}$ である。計測においてSCAは液体金属チューブを1本のみ使用し、コイルの巻き数は1とした。

計測結果のノイズを低減するために5点移動平均を適用し、プロットしたものを図3に示す。横軸は時間を、縦軸は変位量をそれぞれ表している。Peak to Peakにて振幅を調べると10 Hzでは146.4  $\mu\text{m}$ , 50 Hzでは136.8  $\mu\text{m}$ , 250 Hzでは24.0  $\mu\text{m}$ であることがわかった。10 Hzや50 Hzといった低周波の振動では振幅が100  $\mu\text{m}$ 以上と大きく、入力周波数とほとんど同一の周期で振動していることが図から読み取れる。一方、250 Hzという高周波の振動では振幅が24.0  $\mu\text{m}$ と小さく、入力周波数と同一の振動成分を確認することはできなかった。

#### 3.3 入力周波数に対する応答の計測

SCAのより詳細な区分での振動の応答を調べるため、入力する矩形波の周波数の範囲を、10~250 Hzとし、10 Hz刻みで25条件を計測した。その他条件は振動波形の計測の時と同一である。この実験により得られた計測結果は、各入力周波数ごとに、ノイズを低減するために5点移動平均を適用した後、離散フーリエ変換した。これにより、各入力周波数ごとに、最も強く含まれる周波数成分の周波数と、入力周波数の成分の強度を算出した。

入力周波数に対する最も強く含まれる周波数成分をプロットしたものを図4に示す。入力周波数が180 Hz以下の場合に、出力周波数は入力周波数に概ね同一であった。一方、入力周波数が190 Hz以上の場合には出力周波数は

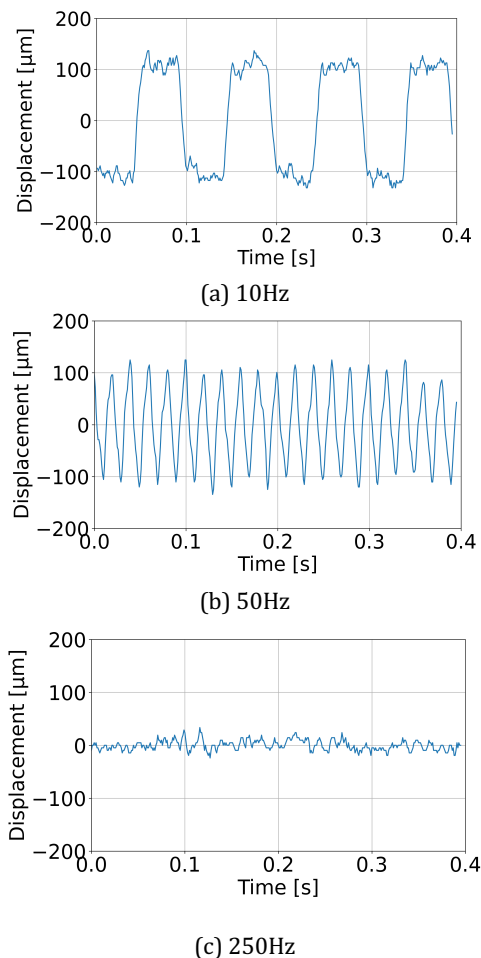


図3 周波数の異なる矩形波を入力した場合の出力

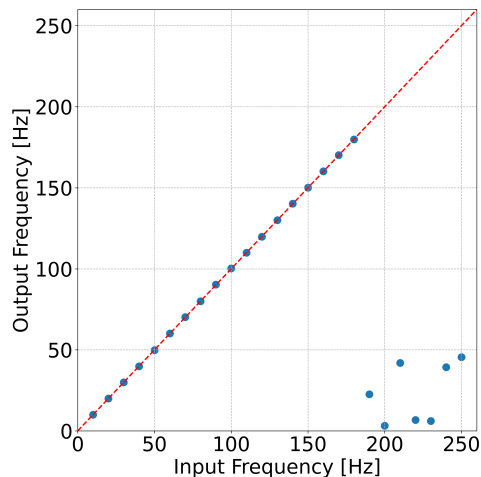


図4 入力周波数に対する出力周波数

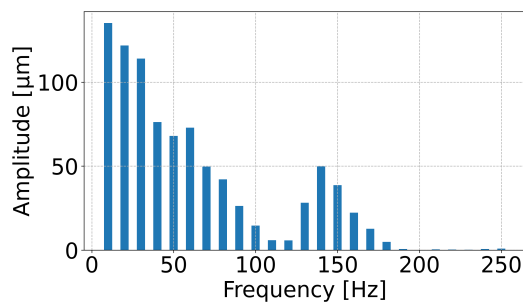


図5 入力周波数と同一周波数成分の出力変位

50 Hz 以下であった。

離散フーリエ変換した計測結果について、入力周波数と同一の振動成分を算出しプロットしたものが図5である。50 Hz 以下では50  $\mu\text{m}$  以上の、180 Hz 以下の振動では4  $\mu\text{m}$  以上の変位が確認された。

図4から、入力周波数が180 Hz 以下のすべての場合で、出力もほとんど同一の周波数の振動成分を強く持ち、190 Hz 以上では入力周波数とは異なる成分を最も強く持っていることがわかる。よって、本デバイスは180 Hz 以下の周波数では入力電流に応じた出力振動を発生させられると考える。

図5からは振動の変異が低周波帯で高く、高周波になるにつれて低くなることがわかる。なお、140 Hz 周辺で再び高くなることがわかるが、これは共振点であると考えられる。50 Hz 以下の刺激では50  $\mu\text{m}$  以上の振幅が提示され、180 Hz 以下の入力について出力された振動が4  $\mu\text{m}$  以上の振幅が提示されていることがわかる。ここで、人の指先は高周波になるにつれ知覚感が向上し、50 Hz 以下の刺激に対しては14  $\mu\text{m}$  以上の、50 Hz から300 Hz の刺激に対しては0.3  $\mu\text{m}$  以上の微小な皮膚の変形を知覚可能であることが知られている[6]。本デバイスで提示された振動の変位は人が知覚可能な皮膚の変形量を超えているため、180 Hz 以下の周波数で人の指先に対して知覚可能な振動を提示できることが示唆された。

以上の結果から、本デバイスは10 Hz から180 Hz の範囲で振動を提示することができ、これらはマイスナー小体と、パチニ小体の最適周波数の一部において知覚可能な皮膚変形量以上の振動を提示できることがわかった。よって、本デバイスが人に対して十分な周波数帯域で振動を提示できることが示唆された。

この結果の制限は、提示される振動がそのまま知覚されるとは限らないことである。SCA の駆動部が軽量かつ柔軟であるために、実際に皮膚がアクチュエータに触れて振動を知覚する場合には異なる振動特性を発揮し得る。したがって今後は、皮膚接触時の物理的条件を考慮に入れた上で、知覚に基づく振動特性を評価することが重要である。

#### 4. おわりに

本研究では柔軟なアクチュエータを用いたコイル構造触覚ディスプレイであるSCAを開発した。計測では人が知覚しやすい周波数帯域での振動の特性を調べ、十分な周波数帯域で振動できることがわかった。加えてSCAはコイルを複数並列し、それらを独立に駆動させられるため、狭い部位に対して高密度な触覚提示が可能である。よって本触覚ディスプレイは、狭い部位に対して多点で複数の周波数成分を持った振動刺激を提示できると示唆された。この成果と、仮想上の細かな質感を再現する触覚レンダリング技術を組み合わせることにより、仮想物体と指先を通してインタラクションするような、現実に近い高解像度な触覚提示ができると考える。

今後は、柔軟な振動子を使っているが故の皮膚を含めた場合の振動特性について、知覚ベースの計測を行うことで明らかにする。また、本研究ではコイル上にしていたチューブを巻かずに個別のチューブに分けることにも取り組む。これにより、1 mm の空間解像度を持った触覚刺激を提示でき、指先の2点弁別閾値以下のより現実に近い高解像度な触覚提示ができると考える。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 22H00542 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] 昆陽雅司, 田所諭, 高森年, 小黒啓介, 徳田献: “高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触覚ディスプレイ,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.4, pp.323-328, 2001.
- [2] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “AUTD3: Scalable airborne ultrasound tactile display,” IEEE Transactions on Haptics, vol. 14, no. 4, pp. 740–748, Oct.–Dec. 2021.
- [3] 清水真陽, 安藤潤人, 野間春生: “指先における微細な触知覚再現のためのソフト振動アクチュエータを用いた高密度触覚ディスプレイ,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol 29, No. 4, pp. 293-301, 2024.
- [4] 黒川朝陽, 清水真陽, 安藤潤人, 野間春生: “ソフト振動アクチュエータを用いた仮想物体の表面の質感を能動的に探索するための触覚提示システム,” 日本バーチャルリアリティ学会第29回大会論文集, 2024.
- [5] V. B. Mountcastle, *Medical Physiology*, vol. I. St. Louis, MO, USA: C. V. Mosby Co., pp. 340–342.1980.
- [6] A. J. Brisben, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson, “Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand,” J. Neurophysiol., vol. 81, no. 4, pp. 1548–1558, Apr. 1999.