



スマートフォンのスピーカを使用した振動触覚提示の基礎検討

伊藤まどか¹⁾, 佐久間亮太²⁾, 石塚裕己³⁾, 平木剛史⁴⁾

Madoka ITO, Ryota SAKUMA, Hiroki ISHIZUKA, and Takefumi HIRAKI

- 1) 筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, ito@pml.slis.tsukuba.ac.jp)
- 2) 筑波大学 大学院人間総合科学研究科 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, sakuma@pml.slis.tsukuba.ac.jp)
- 3) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, ishizuka@bpe.es.osaka-u.ac.jp)
- 4) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp)

概要: スマートフォンなどのスマートデバイスにおける振動触覚は、様々なアプリケーションで用いられている。しかし、スマートフォンで振動触覚を発生させるための振動アクチュエータは周波数特性が平坦でないため、多様な振動触覚を提示することが難しい。そこで本研究では、スマートデバイスの内蔵スピーカによる空気振動を用いて、広帯域において平坦な特性を持つ振動触覚提示を実現する手法を提案する。本稿では、提案手法についてスマートフォンを用いて実装し、スピーカからの空気振動の圧力と振動波形を測定することで、どの程度の力が提示できているか調べるとともに、意図した周波数の空気振動が提示できることを確認する。

キーワード: 振動触覚, スピーカ, スマートフォン

1. はじめに

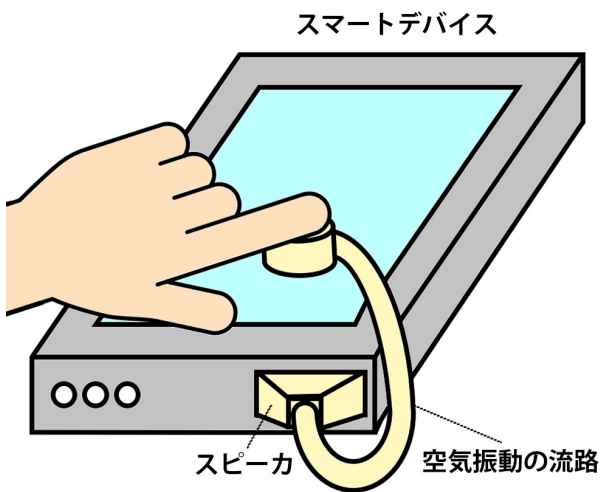


図 1: 提案手法の模式図

スマートフォンやタブレットなどのスマートデバイスにおける振動触覚は、メッセージアプリケーションの通知やゲームのフィードバック等々、様々な場面で用いられている。スマートデバイスで振動触覚を発生させるためには、振動アクチュエータが広く用いられており、特に Linear Resonant Actuator (LRA) が代表的である。しかし、LRA は共振周波数以外の周波数帯域では振動の強度が低下するため、材質感などの多様な振動触覚を提示することは困難である。この問題を解決するために、振動アクチュエータを使わずにタッチパネルを持つデバイスで触覚を提示する方法として、静電吸着 [1] やピンアレイ [2] を利用した研究が進められて

いるが、どちらの手法もスマートデバイスに追加で電源やアクチュエータを付与する必要があり、大型化しやすいため、スマートデバイスへの適用は難しい。

一方で、オーディオスピーカはその振動周波数特性が広い範囲で平坦であり、また振動周波数と強度を独立に制御できる。この特性に着目し、スピーカの空気振動によって振動触覚を提示する手法 [3] が提案されており、またこれを応用して、超音波 [4] や、空気の噴射 [5] による空気振動を一点に収束させて触覚を提示する手法も検討されている。しかし、これらの研究では一定の大きさを持つスピーカが必要であるため、スマートフォンなどの持ち運びを前提としたデバイスへ組み込むことは容易ではない。

そこで本研究では、スマートデバイスの内蔵スピーカによる空気振動を用いて振動触覚を提示することで、スマートフォンに特別なデバイスを付与することなく、広帯域において平坦な特性を持つ振動触覚提示を実現する手法を提案する。具体的には図 1 のように、スマートフォンの内蔵スピーカの出力部から空気振動をチューブを通して指先に伝える流路を作成し、これによりスピーカの空気振動を用いた触覚提示を実現する。

本稿では、提案手法についてスマートフォンを用いて実装し、実際に振動触覚が提示できることを確認する。また、スピーカからの空気振動の圧力と振動波形を測定することで、どの程度の力が提示できているか調べるとともに、意図した周波数の空気振動が提示できることを確認する。

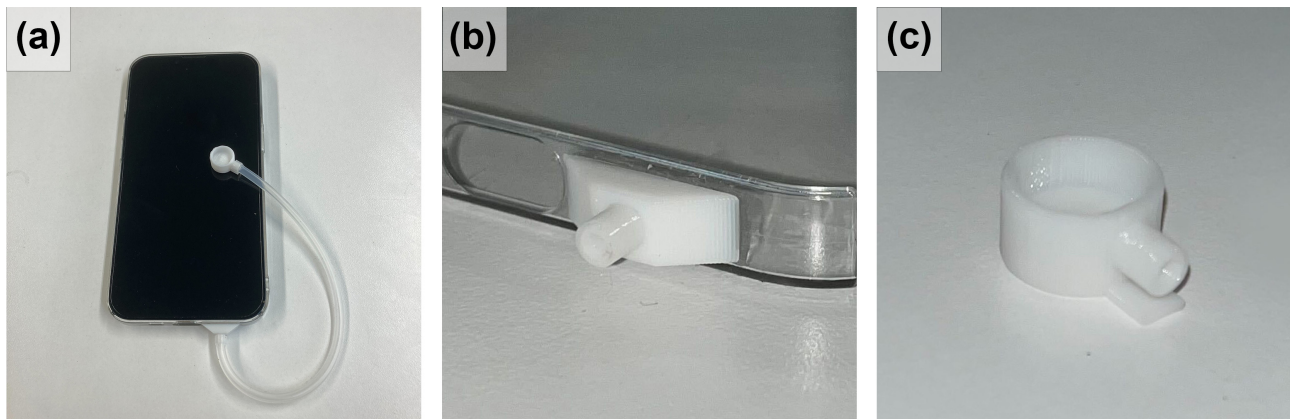


図 2: (a) 提案手法の全体図 (b) スピーカ接触部 (c) 指先接触部

2. 提案手法

本研究では、スマートフォンのスピーカから指先へ空気振動を伝達させることにより、スマートフォンにアクチュエータを付与することなく、広帯域において平坦な特性を持つ触覚提示を実現する。人間が知覚できる強度の空気振動を指先に提示するため、可能な限り伝達する途中での空気振動の減衰を防ぐ必要がある。スマートフォンのスピーカから生じる空気振動を減衰させずに伝達する手法としては、3D プリンタで空気流路を造形し、これを用いる手法が知られており [6]、本研究でも 3D プリンタで造形した構造を用いて空気振動を伝達する流路を構成する。

ここで、スピーカを覆う構造（以降、スピーカ接触部と呼ぶ）についてはスピーカからの空気振動をより細い流路へと伝達する際に、空気振動が内壁に反射して逆方向に伝播しないようにするために、中空の四角錘台の構造を使用した。また、空気振動を指先に伝える構造（以降、指先接触部と呼ぶ）について、空気振動は指の腹に伝達されるので、流路の出口は指の腹程度の大きさの円形とした。また、指で指先接触部をスマートフォンに押し当てて使用できるように、指先接触部の底面は平らな形状とした。一方で、指先はスマートフォンの画面上で動かせる必要があるため、スピーカ接触部と指先接触部の構造については柔軟なチューブで接続することとした。これにより、指の移動に対応できるだけでなく、直径も伸縮可能であるため、密閉した状態で他の構造物と接合できる。

実際に設計、作成した構造を図 2a に示す。上述したように、空気振動を伝達する構造はスピーカ接触部（図 2b）、チューブ、指先接触部（図 2c）の 3 つで構成されている。スピーカ接触部は、中空の四角錘台にチューブの内径より少し大きい中空の円柱を組み合わせた形状であり、チューブを押し広げて気密を保つことができる構造となっている。スピーカ接触部については、スマートフォンのケース（iPhone 13 透明ハードケース、あいほん屋）に接着剤（9077S, 3M）で接着して使用した。チューブには内径 2 mm のシリコンチューブ（MGJG-2 × 4, モノタロウ）を使用した。指先接触部については、底面を塞いだ中空の円柱の側面にチューブを取

り付けられる構造を付加したものとなっている。スピーカ接触部と指先接触部は 3D プリンタ（Ender3, Creality 3D）で造形し、材料素材には Poly Lactic Acid (PLA) を使用した。また、スマートフォンは iPhone 13 (Apple) を用いた。

3. 実験

3.1 空気振動の波形の計測

まず、触覚の振動検出閾値が比較的小さく、感度が高い 100 Hz から 1,000 Hz において、意図した周波数の振動が提示可能であることを示すために、指接触部における空気振動の波形を調べた。その際、図 3 のように指先接触部の上面にマスキングテープ（モノタロウ）を配置し、それを空気振動により振動させ、その変位を計測した。なお、マスキングテープは空気振動の変位を非接触で検出するために使用した。

3.1.1 測定条件



図 3: 空気振動の波形の計測を行った実験環境の様子

指先接触部の底面は除振台（VPG2836, 株式会社ナベヤ）に両面テープ（5000NS20, 日東電工）を用いて固定した。そして、スマートフォン用のファンクションジェネレータアプリケーション（Audio Function Generator, Thomas Gruber）を用いて、スマートフォンのスピーカから 100 Hz、1,000 Hz、そして触覚の振動検出閾値が特に小さく感度が高い 300

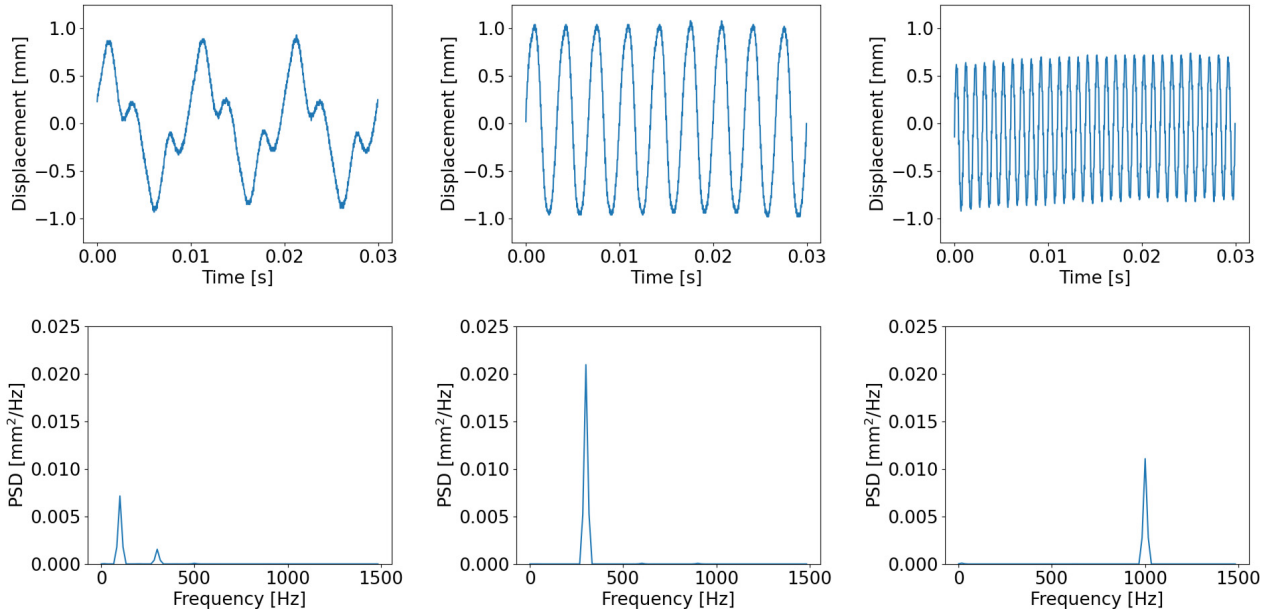


図 4: 100 Hz、300 Hz、1,000 Hz の空気振動によるマスキングテープの変位とパワースペクトル密度

Hz の正弦波の空気振動を発生させた。この振動の測定にはレーザーヘッド (LC-2440, キーエンス) を接続したレーザー変位計 (LC-2400, キーエンス) を用いた。レーザー変位計の出力はオシロスコープ (DS1104, RIGOL) を用いて計測した。

3.1.2 結果

測定した 100 Hz、300 Hz、1,000 Hz の空気振動によるマスキングテープの変位とパワースペクトル密度を図 4 に示す。測定したすべての周波数において、ファンクションジェネレータで選択した周波数と同じ周波数の波形が観測できた。よって、低周波、触覚知覚において特に振動検出閾値が小さく感度の高い 300 Hz、高周波において、意図した周波数の空気振動が提示可能であることが確認できた。ただし、100 Hz においては、100 Hz と 300 Hz が混在した振動が発生しており、これはスピーカ特性によるものだと考えられる。

3.2 圧力の計測

次に、どの程度の圧力を提示できるかを確認するため、図 5 のように指先接触部の上面の空気振動による圧力を空気圧センサを用いて計測した。

3.2.1 測定条件

ファンクションジェネレータアプリケーションを用いて、スマートフォンのスピーカから 100 Hz~1,000 Hz の空気振動を 25Hz の間隔で発生させ、更に触覚知覚において高い感度を持つことが知られている 200 Hz から 300 Hz においては、12.5 Hz ごとに発生させた。その振動を空気圧センサで計測するため、指先接触部の上面にチューブを接続できるように、中心に穴が開いた円盤の上に中空の円柱が組み合わさった構造を接着剤 (9077S, 3M) で貼り付け、指先接触部と空気圧センサ (ABP2DANT001PGAA5XX, Honeywell) をシリコンチューブで接続した。空気圧センサの出力はオ



図 5: 圧力の計測を行った実験環境の様子

シロスコープ (DS1104, RIGOL) を用いて計測した。

3.2.2 結果

測定された周波数ごとの空気振動の圧力の最大値を図 6 に示す。まず、測定したすべての周波数帯において 15 kPa 以上の圧力の提示が観測された。チューブの直径が 2 mm であるため、それを基に力を計算すると、1.5 N 以上の力が提示できており、これは市販の指先用触覚ウェアラブルデバイス [7] と同程度の力である。加えて、周波数特性が LRA などの振動アクチュエータと比べて平坦であることが確認できた。

4. まとめ

本稿では、スマートデバイスの内蔵スピーカによる空気振動を用いて、特別なアクチュエータを付与することなく、広帯域において平坦な特性を持つ振動触覚提示を実現する手法を提案した。また、スピーカからの空気振動の圧力と

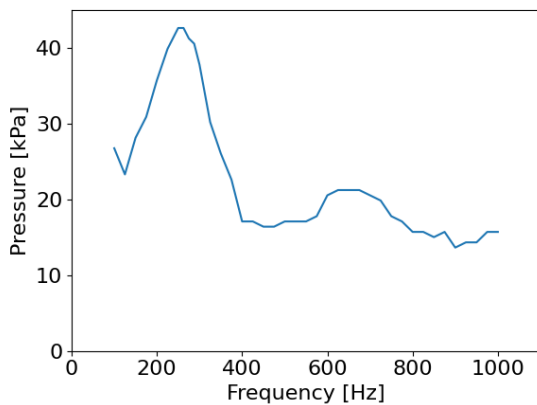


図 6: 周波数ごとの空気振動の圧力の最大値

振動波形を測定することで、市販の指先用触覚ウェアラブルデバイス以上の大きさの振動が、意図した周波数で提示できていることを確認した。今後の展望として、空気振動のボリュームと圧力の関係性や、スピーカからの空気振動と LRA などの振動子の振動を相補的に組み合わせた振動触覚提示、およびそれを用いたテクスチャ感提示について取り組んでいく。

謝辞 本研究は、筑波大学 研究基盤支援プログラム（S タイプ）、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト（JP-MJER1501）の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces, *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283–292 (2010).
- [2] Jang, S., Kim, L. H., Tanner, K., Ishii, H. and Follmer, S.: Haptic edge display for mobile tactile interaction, *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 3706–3716 (2016).
- [3] Kaneko, S. and Kajimoto, H.: Development of a one-dimensional lateral tactile display for the sensation of texture using a speaker array, *International Asia-Haptics conference*, Springer, pp. 143–149 (2016).
- [4] Iwamoto, T., Tatezono, M. and Shinoda, H.: Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound, *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Springer, pp. 504–513 (2008).
- [5] Shultz, C. and Harrison, C.: LRAir: Non-contact Haptics Using Synthetic Jets, *2022 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, IEEE, pp. 1–6 (2022).
- [6] Laput, G., Brockmeyer, E., Hudson, S. E. and Harrison, C.: Acoustruments: Passive, acoustically-driven, interactive controls for handheld devices, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2161–2170 (2015).
- [7] Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V. and Prattichizzo, D.: Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 580–600 (online), 10.1109/TOH.2017.2689006 (2017).