



空中超音波を用いた複数指への同時触覚提示による平面再現

Non-contact Presentation of Mechanical and Thermal Stimuli Using Airborne Ultrasound

菅原 広晶¹⁾, 小丹枝 涼哉¹⁾, 岩渕 颯太¹⁾, 鈴木 颯¹⁾, 神垣 貴晶¹⁾, 牧野 泰才¹⁾, 篠田 裕之¹⁾
Hiroaki SUGAWARA, Ryoya ONISHI, Sota IWABUCHI, Shun SUZUKI, Takaaki KAMIGAKI, Yasutoshi
MAKINO and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-0885 千葉県柏の葉 5-1-5, sugawara@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 近年, 空中超音波による触覚提示が注目を集めている. 超音波による様々な刺激提示手法が提案され, テクスチャ感覚の再現技術などは発展してきている. 一方, 音響エネルギーが分散してしまうため, 広い領域に静的な圧力分布を提示するのは困難であり, 面に触った感覚の再現などは未だ達成されていない. 本研究では, 面感覚を再現する研究のパイロットスタディとして, 刺激の提示位置を人差し指, 中指へ限定し, 様々な刺激に対する面感覚の評価を被験者実験を通して行った.

キーワード: 空中超音波, 空中ハプティクス, 触覚

1. 序論

近年, 空中超音波による触覚提示技術 [1,2] が注目を集めている. この技術は, 空気中を伝搬する超音波が皮膚などのインピーダンスが異なる境界に生じる音響放射圧により実現される. 触覚提示箇所にデバイスを付ける必要がないため, 触覚付き空中タッチパネルなど幅広く応用が期待されている [3-5]. また, VR や AR への活用も期待されており多くの研究が行われている [6,7].

空中超音波による触覚提示を VR に応用するためには, 仮想物体の表面形状を再現することが不可欠である. これまでに, 静的な圧覚提示方法を応用し, 物体のエッジを再現する方法 [8] が提案されている. 一方, 平面や曲面を再現する手法は未だ提案されていない. これは, 面を再現するために触覚を提示する面積を拡大しようとすると, 超音波のパワーが分散してしまいほとんど触覚を生起できなくなってしまうためである.

本研究では空中超音波によって面感を再現する研究のパイロットスタディとして, 照射領域を指先 2 本に絞ってパワーを稼ぎ前述の問題を回避し, どのような刺激パターンが平面だとより感じられるかを被験者実験した. 実験では, 人差し指と中指へ照射位置や焦点数, 変調周波数などを変えて, それぞれの刺激パターンに対して平面と感ずるかどうかが, 振動を感じるかを調査した.

2. 実験

2.1 刺激デザイン

空中超音波で 2 本の指に触感を提示する方法としては, 大きく分けて二つのアプローチが考えられる. 一つは単一の超音波焦点を動かし, 刺激点二点を行き来させるよう動かす方法である. もう一つはそれぞれの指に同時に焦点を生

成する多焦点音場 [9] を生成する方法である. 前者は音響エネルギーが分散されないため強い触覚を生起できる一方, 移動を伴うので意図しない振動感が生起されてしまう可能性がある.

また, 接触対象の形状に応じて指内の刺激位置は異なる. 本実験では, 平面と 2 本の指の間に凸部をもつ曲面を想定し, 指の中央と内側に刺激を提示することで, これらの面の違いを提示できるかを調査する. 本実験では, MediaPipe [10] を使用して指の位置を計測し, 検出された人差し指と中指の位置を指の中心とし, そこから 4 mm 内側にずらした位置を指の内側とした.

さらに, 通常物体表面に触る際は振動刺激はない. 森崎らの研究 [11] によると, 皮膚表面に沿って, 低周波数で焦点を動かす方法 (Lateral Modulation, LM) によって, 比較的振動感の少ない疑似的な圧覚を生起できる. 本研究ではこの手法を採用し, 刺激点を中心とした半径 2 mm の円周上を 5, 15 Hz で周回させる刺激を使用した.

以上, 本実験では, 8 種類の刺激パターン (焦点数 2 パターン × 刺激位置 2 パターン × LM 周波数 2 パターン) を用いた.

2.2 実験手順

実験に用いたセットアップの写真を図 1 に示す. セットアップは, 空中超音波フェーズドアレイ (AUTD3 [12] デバイス 12 台), 深度デプスカメラ (RealSense D435, Intel), サーモグラフィカメラ (OPTPI 45ILTO29T090, Optris), 被験者への指示を表示するためのディスプレイ, 回答用のテンキーから構成される. 深度デプスカメラと MediaPipe [10] を用いて 2 本指の位置のセンシングを行った. なお, サーモグラフィカメラは指先に形成した焦点の可視化に用いた [13].

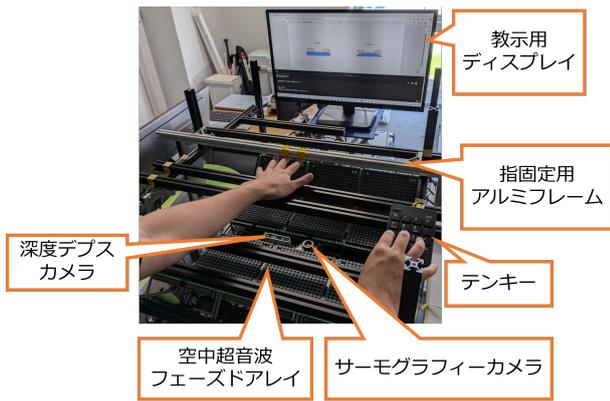


図 1: 実験セットアップ. 触覚の提示中に手が動いてしまうのを防ぐため, 固定用のアルミフレームを使用した.

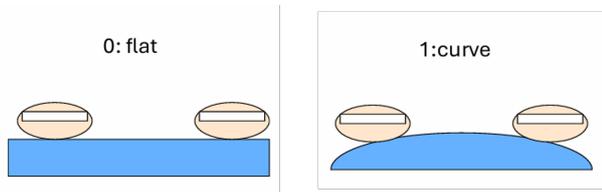


図 2: 実験中に提示した画像. 平面か曲面かを選択する際にイメージを統制するために提示した.

被験者は所定の位置に手を固定したあと, 前述の 8 種類の刺激のいずれか一つが提示された. 被験者は各刺激に対して 2 つの質問に回答した. 1 つ目の質問は, 刺激が平面に感じるか曲面に感じるかの 2 択であり, 図 2 を見て回答するよう指示した. 2 つ目の質問は, 振動感の有無について, 全く振動感がないを 1, 振動感がとてもあるを 7 とした, 7 段階のリッカート試験である. 各刺激はこれらの質問に回答し終わるまで提示され続けた. 質問に回答後, 5 秒のインターバルの後, 次の刺激が提示された. 各被験者に対して, 8 種類の刺激がそれぞれ 3 回ずつランダムな順序で提示された. また, 実験終了後にフリーコメントを求めた.

実験中, 被験者にはホワイトノイズを聞かせて, 音により刺激を判別できないようにした.

また, 実験者はサーモグラフィーカーメラの映像から空中超音波が意図した通りに照射されていることを確認しながら実験を行った. 図 3 に, 実際の実験中のサーモグラフィーカーメラにより焦点を可視化した図を載せる.

実験には 8 人の被験者 (男性 6 人, 女性 2 人) が参加した.

2.3 実験結果

図 4 に, 8 種類の刺激に対して平面に感じたときを 1, 曲面に感じるときを 0 と評価した箱ひげ図を載せる. また, 図 5 に振動感に対するリッカート試験の結果を載せる.

それらの結果に対して 3 元配置分散分析を行うと, 結果は表 1 のようになった.

表 1 から分かるように, 有意水準を 1% としたとき, 平面感においては焦点数と焦点位置により差異が生じていると判断できる. また, 振動感において, 焦点数と LM 周波数

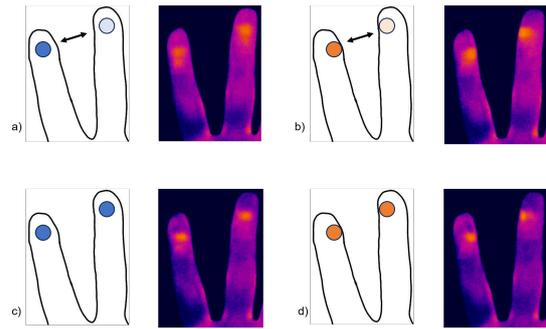


図 3: 刺激提示時の超音波焦点の可視化. (a) 単焦点-中央, (b) 単焦点-内側, (c) 多焦点-中央, (d) 多焦点-内側.

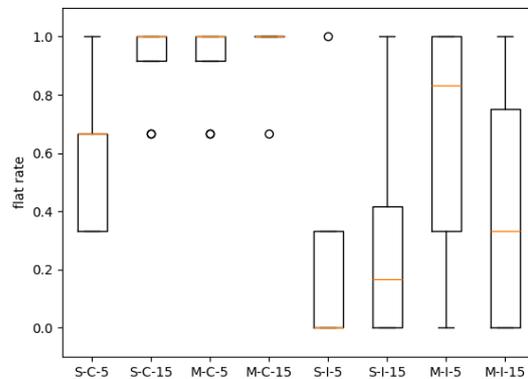


図 4: 各刺激に対する平面評価. S が単焦点, M が多焦点を, C が中央, I が内側を, 末尾の数字は LM 周波数を表す. 縦軸は平面に感じたときを 1, 局面に感じるときを 0 とした際の各被験者毎の平均値.

により差異が生じていると判断できる.

差異の詳細を確認するために, 事後検定として Welch の t 検定を行った. 結果として, 有意水準を 1% だとすると, 平

表 1: 3 元配置分散分析による p 値. 各因子の種類は N が焦点数, P が焦点位置, F が LM 周波数を表す.

因子の種類	平面感の p 値	振動感の p 値
N	2.36×10^{-3}	1.14×10^{-15}
P	1.80×10^{-7}	5.80×10^{-1}
F	4.92×10^{-1}	4.18×10^{-4}
NP	4.92×10^{-1}	9.70×10^{-1}
NF	4.24×10^{-2}	2.54×10^{-1}
PF	7.72×10^{-2}	5.80×10^{-1}
NPF	8.90×10^{-1}	5.30×10^{-1}

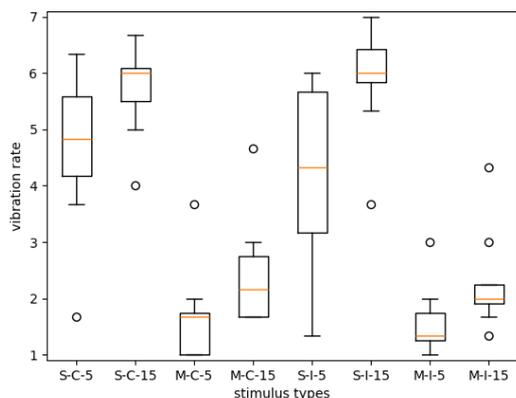


図 5: 各刺激に対する振動感の評価。S が単焦点, M が多焦点を, C が中央, I が内側を, 末尾の数字は LM 周波数を表す。縦軸は全く振動感がないを 1, 振動感がとてもあるを 7 としたリッカート評価の各被験者毎の平均値。

面感 は単焦点が多焦点より有意に小さく ($p = 7.39 \times 10^{-3}$), 焦点位置を中心に形成したほうが内側に形成するより有意に大きい ($p = 9.34 \times 10^{-7}$)。また, 振動感 は, 単焦点が多焦点より有意に大きい ($p = 2.11 \times 10^{-14}$)。一方, LM 周波数が小さいほうが振動感が有意に大きくなるとは言えない (1.57×10^{-2})。

また, 被験者のフリーコメントには, 「いくつかの刺激で交互に刺激されていることが分かるパターンがあり, 面とは思えなかった」, 「刺激の位置で平面かを判別したため, 画像がなかったら曲面だと感じないかもしれない」などがあった。

2.4 議論

2.4.1 平面・曲面感

焦点位置に関して, 中心位置に焦点を照射した場合は平面だと判断し, 内側に曲面と判断する割合が増加している。内側に焦点を形成した場合に回答のばらつきが大きいのは, そもそもこのような曲面に触れる機会が少ないためだと考えられる。

今回の実験で, 焦点位置によって平面と曲面の違いを提示できる可能性が示唆された。ただし, 実際に提示された刺激が本当に平面・曲面であったかは本実験では知ることができない。今回の実験では, 平面か曲面かの二択しか聞いていない。被験者のコメントを鑑みるに, そもそもどちらを触った感覚とも違うものを知覚していた可能性もある。今回の刺激がどの程度, 実物を触ったときの感覚に近いかを調査する実験が将来の研究として求められる。

また, 今回の実験では固定した指と物体を想定した実験を行ったが, 実際に物体に触れたときには接触面を撫でる動作により平面かを判別することが多い。そのため, 指先と仮想物体が横に滑るような動作をした際に平面として違和感がないかを調査する必要がある。

2.4.2 振動感

多焦点と比較して単焦点のほうがより振動感が大きいと評価された。単焦点においては, ある指に対して超音波刺激がある状態とない状態が交互に訪れるため, 振動を感じると考えられる。

単焦点において, LM 周波数が小さいと回答のばらつきが大きいのは, 振動感の定義に個人差があるためと思われる。指が交互に刺激されていることが近くされた際に, これを振動と捉えるか, 物体自体がパタパタと傾きつつ動いていると捉えるのかを本実験では特に統制していない。このような個人差が結果に現れたものだと考えられる。

また, 今回の実験では単焦点と多焦点で超音波による放射圧が異なるため, 差異が出た可能性もある。知覚強度を統制した状態でも同様に振動感に違いがあるか調べる必要もある。

さらに, 今回の実験では指先を 2 本に限定していたが, 日常生活において指 2 本のみで物体に触れることは少ない。そのため, 照射領域を増やした実験を行いたい。今回の実験から, 平面感を提示するには単焦点ではなく, 多焦点を用いる必要があることが示唆されている。一方で, 領域を広げると空中超音波のパワーが分散してしまうことが予想される。したがって, 静的な圧力として知覚できる空中超音波のパワーの限界値がどの程度なのかを調べることも重要である。

3. 結言

本論文では, 空中超音波による触覚提示において, 異なる焦点数と焦点位置, LM 周波数の組み合わせに対する平面・曲面感と振動感の評価をより行った。被験者実験の結果によると, 刺激位置によって, 平面・曲面の違いを提示できる可能性が示唆された。また, 低い LM 周波数の多焦点音場を用いることで振動感を抑えられることがわかった。

今後は本実験で得られた知見を足がかりとし, より多彩な刺激パターンについて評価したり, 面感のリアリティを評価する実験などを行い, 空中超音波によって面感を再現する研究を進めていく予定である。

謝辞 本研究は JPMJMS239E-01 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [2] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. *UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces*, p. 505–514. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2013.
- [3] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptoclone (haptic-optical

- clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1980–1990, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [4] Cédric Kervegant, Félix Raymond, Delphine Graeff, and Julien Castet. Touch hologram in mid-air. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [5] Ryuji Hirayama, Diego Martinez Plasencia, Nobuyuki Masuda, and Sriram Subramanian. A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping. *Nature*, Vol. 575, No. 7782, pp. 320–323, 2019.
- [6] Jonatan Martinez, Daniel Griffiths, Valerio Biscione, Orestis Georgiou, and Tom Carter. Touchless haptic feedback for supernatural vr experiences. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 629–630, 2018.
- [7] Ted Romanus, Sam Frish, Mykola Maksymenko, William Frier, Loïc Corenthy, and Orestis Georgiou. Mid-air haptic bio-holograms in mixed reality. In *2019 IEEE international symposium on mixed and augmented reality adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 348–352. IEEE, 2019.
- [8] 加藤滉一, 森崎汰雄, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之. 空中超音波を用いたエッジ感の非接触提示. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2022.
- [9] Diego Martinez Plasencia, Ryuji Hirayama, Roberto Montano-Murillo, and Sriram Subramanian. Gs-pat: high-speed multi-point sound-fields for phased arrays of transducers. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 39, No. 4, pp. 138–1, 2020.
- [10] Camillo Lugaresi, Jiuqiang Tang, Hadon Nash, Chris McClanahan, Esha Uboweja, Michael Hays, Fan Zhang, Chuo-Ling Chang, Ming Guang Yong, Juhyun Lee, et al. Mediapipe: A framework for building perception pipelines. *arXiv preprint arXiv:1906.08172*, 2019.
- [11] Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Non-vibratory pressure sensation produced by ultrasound focus moving laterally and repetitively with fine spatial step width. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, No. 2, pp. 441–450, 2021.
- [12] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 740–749, 2021.
- [13] Ryoya Onishi, Takaaki Kamigaki, Shun Suzuki, Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Two-dimensional measurement of airborne ultrasound field using thermal images. *Physical Review Applied*, Vol. 18, No. 4, p. 044047, 2022.