



# 超音波の Lateral Modulation 刺激における 刺激点移動の高解像化による振動感抑制

森崎汰雄<sup>1)</sup>, 藤原正浩<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1,2)</sup>, 篠田裕之<sup>1)</sup>

Tao MORISAKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県 柏の葉 5-1-5, morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

2) JST さきがけ

**概要:** 集束超音波を用いると、非接触に触覚を提示出来る。超音波の提示力は数グラムのため、その知覚強度を向上させる Lateral Modulation(LM) 刺激が提案されている。LM 刺激では、刺激位置をわずかに周期変位させ振動感を与える。しかし、非振動の圧覚はより感じにくく、超音波で提示するのは未だに困難である。圧覚提示の糸口として、著者らは刺激点移動の刻み幅をごく小さくした際に、LM 刺激の振動感が軽減されることを実験的に発見した。本研究では、LM 刺激の刻み幅と振動感の関係について被験者実験を通じ定量評価する。

**キーワード:** 超音波触覚, 圧覚提示, 振動感抑制

## 1. 緒言

触覚提示技術は、ゲームや VR への没入感向上や遠隔で触れ合えるコミュニケーションに利用される。特に、フェーズドアレイ技術を用いて超音波を集束させると、デバイスに身に着けることなく、非接触な触覚提示が実現できる [5, 1]。超音波触覚は、空中タッチパネル [10] や、立体映像とのインタラクションシステム [9] などに応用されている。

非接触な反面、超音波触覚の提示力は高々数グラムに制限される。このため、超音波触覚の知覚強度を向上させる手法として、Amplitude Modulation(AM) 刺激 [4] と Lateral Modulation(LM) 刺激 [11] が提案されてきた。AM 刺激は提示した超音波の振幅を周期変動させ振動感を提示する手法である。LM 刺激は、超音波の振幅を変化させずに刺激位置を周期的に微小変位させる手法である [11]。

しかし、従来の AM 刺激と LM 刺激はいずれも振動感が感じられ、超音波での圧覚提示は依然として困難であった。超音波フェーズドアレイで対象空間を取り囲み強力な定在場を生成した場合でも、その触覚を感じるためには自らの手を動かす、いわゆるアクティブタッチである必要があった [6]。

超音波による非振動な圧覚提示の糸口として、著者らは、刺激点移動の刻み幅を極端に小さくすることで、LM 刺激の振動感を低減できることを実験的に発見した。この振動感抑制は、著者らの主観によれば、特に 10 Hz 以下の LM 刺激で顕著であった。この原理は未解明だが、これまでに、接触型の振動子において 10Hz 以下の振動刺激が圧覚を生起できることは知られている [8]。

本研究では、7 Hz の LM 刺激において、刺激点移動の刻み幅と得られる振動感の関係について評価する。知覚強度を維持したまま振動が抑えることができれば、超音波によ

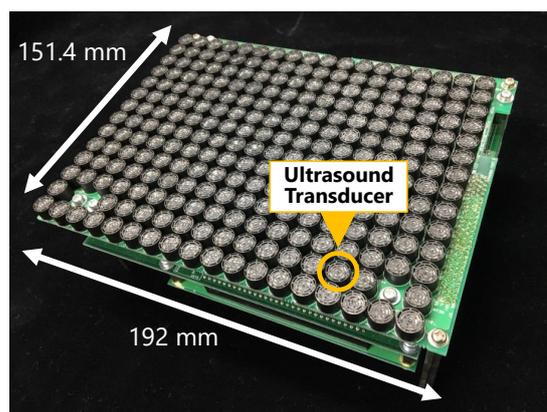


図 1: 本論文で使用した空中超音波フェーズドアレイ

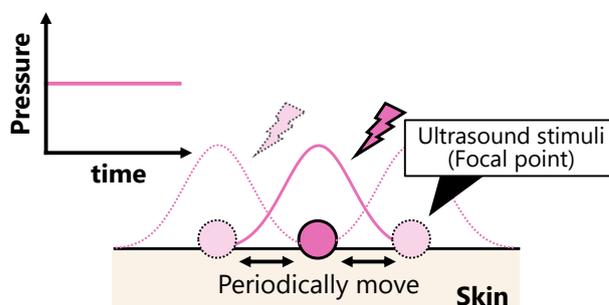


図 2: 超音波による Lateral Modulation 刺激の模式図

る圧覚提示手法の確立につながる。

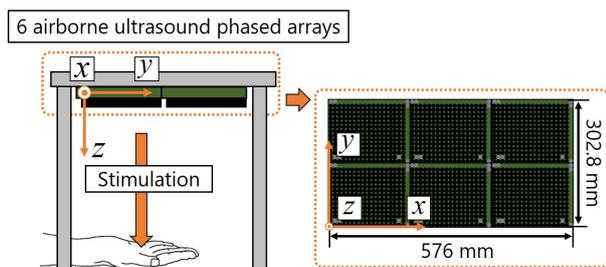


図 3: 実験装置



図 4: 実験の様子

## 2. 原理

### 2.1 空中超音波フェーズドアレイ

本研究では超音波触覚を提示するのに空中超音波フェーズドアレイ (Airborne Ultrasound Phased Array: AUPA) を用いた (図 1) [5, 1]。AUPA とは振幅と位相を個別に制御できる超音波振動子をアレイ状に並べたものである。各位相を適切に設定すれば一点に超音波を集束でき、その集束点には数グラムの非接触な力が生じる。本論文では、一台あたりに 40 kHz の超音波振動子が 249 個ずつ搭載された AUPA を 6 台使用した [7]。

### 2.2 超音波による Lateral Modulation 刺激

超音波の Lateral Modulation (LM) 刺激とは、超音波による刺激点 (集束焦点) の位置を、皮膚表面に沿って周期変位させる刺激手法である [11]。図 2 に LM 刺激の模式図を示す。LM 刺激を用いることで超音波刺激の知覚強度は高まり、その変位の周波数が 50 Hz の時に知覚強度が最大になることが知られている [11]。また、刺激点移動の速度が、皮膚表面を伝搬する弾性波の速度に一致することで、知覚強度が高まることも知られている [2]。一方で、刺激点移動の刻み幅と得られる触感の関係は良く調べられていない。

## 3. 被験者実験

本実験では、超音波の LM 刺激において、その刺激点移動の刻み幅を変化させ、その時に得られる振動感と知覚強度について評価した。比較のため、刺激点の位置を変化させない静圧刺激についても同様に評価を行った。

### 3.1 実験装置

実験装置を図 3 に示す。本装置においては、6 台の AUPA が下向きに中空に固定されており、被験者はそのアレイ面に手のひらが向くように自らの腕を机に置く。また、被験者はヘッドフォンでホワイトノイズを聞き、外部音を遮断した状態で実験を行った。実際の実験の様子を図 4 に示す。

### 3.2 実験手順

被験者は 5 人で、22-25 歳の男性であった。

今回使用した刺激は、7 Hz の LM 刺激である。また、その移動幅は左右に 3 mm ずつであった。このパラメータは、筆者らの事前検討において振動感が最もよく軽減された条件であった。この LM 刺激において、刺激点移動の刻み幅は 3, 1, 0.5, 0.2 mm の 4 種類に変化させた。被験者にはこ

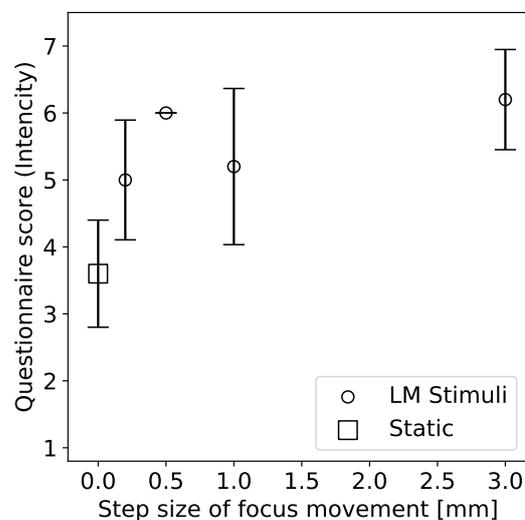


図 5: Q1 回答の平均値 (提示刺激は知覚できたか)。エラーバーは標準偏差を示す。

れに静圧刺激を加えた 5 種類の刺激がランダムな順番で提示された。

被験者は超音波による刺激を手のひらに 3 秒間受け、その後二つの質問に 1 (全くそう思わない) から 7 (非常にそう思う) で回答した: Q1) 提示された刺激ははっきり知覚された, Q2) 提示刺激において、振動が感じられた。

## 4. 結果

図 5 に Q1 の結果を、図 6 に Q2 の結果をそれぞれ示す。縦軸は被験者全員の平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。また、静圧刺激の結果は刻み幅 0 mm として扱い、四角のマーカで併記した。

## 5. 議論

実験結果より、7 Hz の超音波 LM 刺激において、刺激点移動の刻み幅を細かくすることで、知覚強度を維持しつつ振動感を抑制できると考えられる。特に、刻み幅が 0.2, 0.5 mm の時の Q2 (振動感) の結果は 4 点を下回っていた。また、Q1 における LM 刺激のすべてのスコアは 4 点以上で

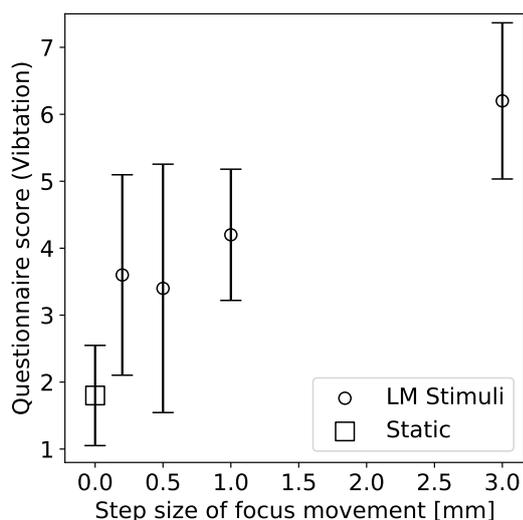


図 6: Q2 回答の平均値 (振動を感じたか)。エラーバーは標準偏差を示す。

あった。LM 刺激の周波数、最大の移動幅も含めてより良い条件を探索することで、超音波による強力な圧覚提示ができる可能性がある。

振動感が抑制される原理は未解明であるが、予想としてマイスナー小体の活動を抑制出来ている可能性がある。マイスナー小体とは 7 Hz 付近の振動にも反応する触覚受容器であり [3]、7 Hz の LM 刺激で得られる振動感は主にマイスナー小体によるものであると考えらえる。今後は皮膚表面の変位を観察することで、受容器反応の検証など原理解明にも取り組む。

## 6. 結言

本研究では、超音波の Lateral Modulation(LM) 刺激において、刺激点移動の刻み幅を細かくした際の振動感と知覚強度を評価した。実験結果より、7 Hz で左右に 3 mm ずつ変位する LM 刺激において、その刻み幅を 0.5 mm 以下にすることで振動感を軽減できることが分かった。また振動感が軽減された場合でも、LM 刺激の知覚強度は静圧刺激 (移動しない刺激点) より高かった。

今後は、LM 刺激の周波数や変位幅も変化させ、振動感を抑制しつつ高い知覚強度を維持できる最適な条件を探索する。また、レーザ変位計などで皮膚表面の変位を計測し、振動感抑制の原理解明も試みる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 16H06303 と JST CREST JP-MJCR18A2 の助成を受けたものである。

## 参考文献

[1] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. 2013. UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 505–514.

[2] William Frier, Damien Ablart, Jamie Chilles, Benjamin Long, Marcello Giordano, Marianna Obrist, and Sriram Subramanian. 2018. Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 270–281.

[3] A Gescheider, Stanley J Bolanowski, and Kathleen R Hardick. 2001. The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system. *Somatosensory & Motor Research* 18, 3 (2001), 191–201.

[4] Keisuke Hasegawa and Hiroyuki Shinoda. 2018. Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array. *IEEE transactions on haptics* 11, 3 (2018), 367–377.

[5] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. 2010. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics* 3, 3 (2010), 155–165.

[6] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. 2015. Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 362–367.

[7] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. 2016. Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display. In *International AsiaHaptics conference*. Springer, 99–103.

[8] Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, Akinori Yoshida, and Naoki Saiwaki. 2005. A tactile synthesis method using multiple frequency vibrations for representing virtual touch. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 3965–3971.

[9] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. 2016. HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback.. In *CHI*. 1980–1990.

[10] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. 2014. HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*. 663–667.

[11] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. 2019. Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus. *IEEE Transactions on Haptics* (2019).