



複数周波数を用いた LM 駆動時の可聴音低減

Reduction of audible noise when driving LM stimulus by using multiple frequencies

水谷沙耶¹⁾, 鈴木颯²⁾, 藤原正浩²⁾, 牧野泰才²⁾, 篠田裕之^{1, 2)}

Saya MIZUTANI, Shun SUZUKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, mizutani@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5)

概要: 超音波触覚提示において, LM という手法が主に用いられている. これは, 超音波振動子の駆動位相を適切に変化させることで, 焦点を皮膚に沿って移動させる触覚提示方法である. これまで単一周波数の超音波を用いて駆動されており, 駆動位相を高速に変化させた際に, 意図せぬ可聴音が発生する問題があった. 本研究では, 複数周波数の超音波を用いた LM 提示手法を提案した. 提案手法は, 位相を切り替えることなく LM と同様の分布変化を生成可能なため, 駆動時の可聴音を低減することができる利点がある. 本稿の騒音計を用いた実測実験では, 実際に可聴ノイズが低減していることを確認した. また, 被験者実験を通して, 提案手法の, 手のひらでの閾値が, 200Hz において従来手法よりも有意に低いことを確認した.

キーワード: 複数周波数, Lateral Modulation, 可聴ノイズ低減

1. はじめに

昨今の VR 空間において, 裸眼立体視ディスプレイ [1] や HMD[2] など視覚提示の技術は発展している. 近年, VR 空間へのさらなる没入感向上のため, 仮想物体に触覚を付与する研究 [3][4] が行われている. 中でも, 空中超音波触覚 [5][6] はユーザーが装着型デバイスを装着することなく, 非接触に触覚を提示できるという利点がある.

現行の空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD: Airborne Ultrasound Tactile Display)[7] は, 249 個の超音波振動子が搭載された超音波振動子アレイであり, 各素子の位相と振幅を制御することで, 十分高い時間分解能で空中に任意の音圧分布を生成し, 空気と皮膚の音響インピーダンス差により生じる音響放射圧により触覚を提示可能なデバイスである. 現在空中超音波触覚提示において代表的な刺激手法には AM(Amplitude Modulation) と LM(Lateral Modulation), STM(Spatio-Temporal Modulation) がある. 従来これらはすべて, 単一周波数の搬送波を用いて生成されていた. このように単一周波数を用いた触覚提示方法を, 本稿では SFLM (Single Frequency Lateral Modulation) と呼ぶことにする. AM とは送出する超音波の音響パワーを, 皮膚の受容器が感じやすい周波数で変調する手法である. LM(STM)[8][9] は, 音響パワーを一定として, 焦点を皮膚表面に沿って受容器が感じやすい周波数で移動させる手法である. 高橋らの研究 [8] によると, ヒトの掌において AM よりも LM のほうが知覚しやすいことが分かっており, 様々な触感が提示できることから [10]LM がよく利用される. しかしながら, LM および STM は焦点を移動させる際に駆動

位相を切り替える必要があり, 駆動位相を高速に変化させた際に, 意図せぬ可聴音が発生してしまうことが指摘されている [11][12]. これは VR 仮想空間への没入感の点で, 実用上重要な課題である. これまでに, この可聴ノイズを低減する位相の切替手法がいくつか提案されており [11][12][13], それらの手法を用いると, 約 4~10dB 可聴ノイズを低減できることが確認されている.

本研究では駆動時の可聴ノイズを低減する, 複数周波数の超音波を用いた LM 提示手法を提案した. 提案手法は, 複数周波数の搬送波を用いて駆動位相を変化させることなく連続的に焦点が移動する LM 刺激を提示する手法である. 本手法は音圧分布変化のために駆動位相を変化させる必要がないため, 位相切替に伴う機械音が発生しない. そのため, 結果としてデバイス駆動時の可聴ノイズは理論上低減される. 本稿の実験では提案手法の可聴ノイズが従来手法に比べてどれだけ低減されるのかを定量的に評価する. また, 提案手法による触覚提示が知覚強度の観点から従来手法に比べてどの程度差があるのかを検証する.

2. 提案手法

前述の通り, 本研究では複数周波数の搬送波を用いて, デバイスの駆動位相を変化させることなく, 連続的に焦点が移動する LM 刺激を提示する手法を提案した. 各トランスデューサに周波数を割り当てるには, いくつかの方法が考えられる. 本稿では簡単に実装できる方法として, マルチフェーズドアレイの各 AUPA ユニット (以下「ユニット」という) に周波数を割り当てる方法を考える.

図 1 のように, 各ユニットから送出された超音波が空中の点

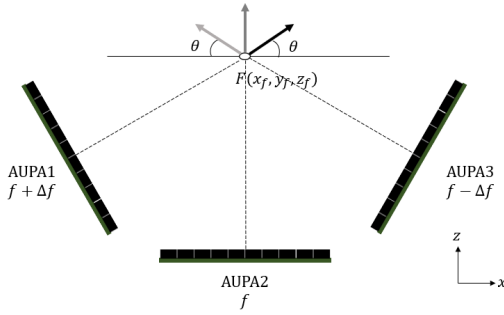


図 1: 提案手法の最小システム構成.

$F(x_f, y_f, z_f)$ に焦点を生成する状況を考える. 焦点が左右にわずかに振動する LM を実現するためのシステムの最小構成は, ユニット 1 と 3 をそれぞれ周波数 $f + \Delta f$ と $f - \Delta f$ で振動させることである. この場合, 定在波は周波数 $2\Delta f$ で一方向に移動する. ただし, ユニットの傾きは $\theta \neq \pm \frac{\pi}{2}$ であることに注意する. 各時間における焦点位置を図 2 に示す. これは, 焦点が空間的に連続的に移動する LM に相当する. 本稿では, この提案手法を MFLM (Multiple Frequency Lateral Modulation) と呼ぶこととする. MFLM は位相を切り替えることなく焦点を移動させることができるため, 位相切替時に可聴ノイズが発生してしまう問題が発生しない.

2.1 焦点速度

焦点が AUPA から十分離れている場合, 焦点に各超音波振動子から到達する超音波は, AUPA 面に垂直な成分の波数ベクトルのみもつと近似できる. そのため, これらの平面波と $z = z_f$ 平面とのなす角を θ とすると, 焦点付近の音圧 p は以下のように表される.

$$p = a \cos(\omega_1 t - k_1 x) + a \cos(\omega_2 t - k_2 x) \\ = 2a \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} x\right) \quad (1)$$

ここで, a は振幅, ω_1, ω_2 は各周波数, $k_1, k_2 (> 0)$ は x 軸方向の波数を表している. 式 (1) のうち, $\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right)$ は緩やかなキャリア成分の振幅を, $\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} x\right)$ は周波数 f 付近の包絡線の振幅を表している. キャリア波成分の振幅が最大になるとき, 音圧も最大になる. 音圧最大点に注目すると, 式 (2) のように表せる.

$$\left| \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right) \right| = 1 \quad (2) \\ \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x\right) = 2\pi\sigma \quad (\sigma \in Z)$$

よって, 平面 $z = z_f$ 上での x 方向の焦点の移動速度は次の式で表せる.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 + k_2} = \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{c}{\cos\theta} \quad (\theta \neq -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

2.2 空間パターンと有効範囲

時間 $t = 0$ で $y = 0$ 平面に現れる音圧分布に注目すると, 周波数 $f + \Delta f$ および $f - \Delta f$ の超音波は定在波のような分布を作成している. n 番目と $(n + 1)$ 番目の腹の位置 x_n と x_{n+1} は, 次の式 (4) と (5) から与えられる.

$$-\frac{k_1 + k_2}{2} x_n = n\pi \quad (4)$$

$$-\frac{k_1 + k_2}{2} x_{n+1} = (n + 1)\pi \quad (5)$$

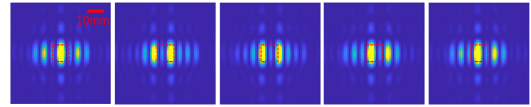


図 2: 提案手法による音圧分布変化.

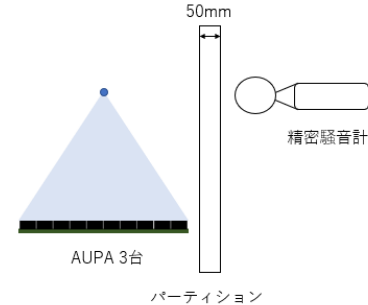


図 3: 計測システム.

したがって, 隣り合う腹の間隔 b は次のように計算される.

$$b = x_{n+1} - x_n = \frac{c}{2f \cos\theta} \quad (6)$$

f Hz の超音波により生成される焦点の径 w は次の式で与えられる.

$$w = \frac{2\lambda r}{d} \quad (7)$$

ここで, λ は波長を, r は AUPA から焦点までの距離を, d は AUPA の 1 辺の長さを表している. つまり, 間隔 b のパターンが直径 w の窓内を一方向に流れる時空間分布が形成される. さらに, 図 2 のように周波数 f で駆動される AUPA2 の効果により, 定在波の腹が一つおきに強調される.

3. 騒音測定実験

本実験の目的は, 提案手法による可聴ノイズ低減の効果を定量的に評価することである.

3.1 手順

計測システムを図 2 に示す. 設置されている 6 台の AUPA の配置は図 3 の通りである. MFLM の場合, 赤い AUPA4 台とオレンジ色の AUPA4 台にそれぞれ $f + \Delta f$ Hz と $f - \Delta f$ Hz を設定された. また SFLM の場合, すべての AUPA に Δf が設定された. ここで $\Delta f = 8, 48, 96, 200$ が設定された. また, 精密騒音計 (NL-62, リオン株式会社製) は AUPA から 25 cm の距離に設置された. 騒音計と AUPA の間に厚み 5 cm のパーティションを置くことで, AUPA からの直達波を遮断し, 純粋な環境音のみを測定した.

デバイス駆動時に精密騒音計で 10 秒間の平均サウンドレベルを計測する試行を, 各刺激に対して 5 回ずつ行った. また比較のため, デバイスを駆動していない平常時の平均サウンドレベルも同様に 5 回測定した.

3.2 結果および考察

精密騒音計を用いた計測の結果, MFLM 駆動時の環境音は SFLM 駆動時に対して約 7~17dB 低下した. 測定されたサウンドレベルの平均値について, 平常時に対するデバイス駆動時のサウンドレベル比を図 5 に示す. サウンドレベル比が 1 に近いほど, 平常時と同程度の環境音であり, 可聴ノイズの影響が少ないことを表す. いずれの周波数においても MFLM の駆動音は SFLM の駆動音に比べて小さく, 平常時と差がないことが分かった.

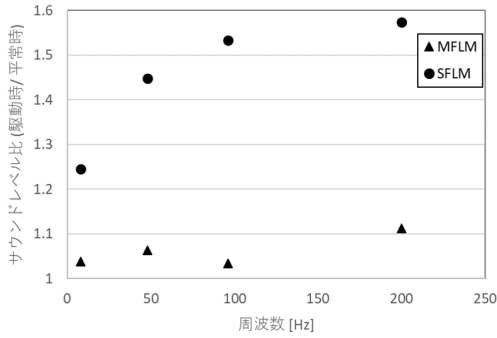


図 4: MFLM および SFLM 駆動時の平常時に対するサウンドレベル比。



図 5: 実験の外観。

4. 閾値測定実験

本実験の目的は、手のひらにおいて、提案手法による LM 刺激が従来手法の LM 刺激と同様に知覚されやすいかどうか、すなわち触覚提示手法として有効かどうかを検証することである。

4.1 手順

手のひらでの SFLM および MFLM の閾値は極限法により測定された。本実験には 22 歳から 25 歳までの 6 人の男性と 3 人の女性が参加した。実験の外観を図 4 に示す。AUPA3 台で刺激は被験者の利き手の手のひらに提示された。刺激強度は 0 から 255 の 256 段階を段階的に変化した。被験者は刺激を感じなくなった（下降試行）あるいは、刺激を感じ始めた（上昇試行）ところで“Q”キーを押すように指示された。各試行では、ベルが鳴った後に 0.5 秒間各強度の刺激が提示され、その後刺激がない時間が 0.5 秒間提示され、次の強度の刺激が提示された。各周波数の各刺激に対して、上昇試行と下降試行を 1 回ずつ行った。SFLM または MFLM どちらの閾値測定から開始するかは、被験者ごとにランダムに決定された。測定された刺激は、8, 48, 96, 200 Hz の SFLM および MFLM 刺激である。したがって各被験者ごとに 16 試行の測定が行われた。被験者はデバイスの駆動音が実験結果に影響しないように、実験中ホワイトノイズを聞いていた。

4.2 結果

測定された各刺激の相対閾値を図 5 に示す。ここでは、「デバイスの最大出力」が 0dB に設定されていることに注意する。すなわち、駆動手法によって物理的刺激が減少した場合、閾値は高くなる。有意水準 1% の片側 t 検定の結果、200 Hz において MFLM の閾値は SFLM 閾値よりも有意に低下した ($p = 2.0 \times 10^{-6}$)。一方で、8, 48Hz と 96Hz での SFLM および MFLM の閾値の間に有意差はなかった（それぞれ $p = 0.19, 0.011$ および 0.12 ）。以上の結果から、提案した MFLM は 8~200 Hz の周波数帯において、従来の刺激法よりも同等あるいは有意に感じやすいことが分かった。

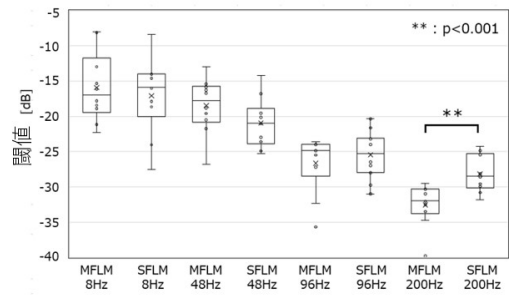


図 6: 手のひらでの MFLM および SFLM の閾値。

5. むすび

本研究では、デバイスの駆動位相を切り替えることなく LM 刺激を生成する手法を提案した。従来手法による LM 刺激生成時には、高速な位相切替に伴うデバイスから発生する可聴音が課題として指摘されていた。これは、VR 空間で空中超音波触覚提示を行うにあたって、実用上重要な課題である。提案手法では位相を切り替える必要がないため、理論上デバイス駆動時の可聴ノイズは低減される。

本稿では、精密騒音計を用いて提案手法による LM 駆動時の可聴音が従来手法による LM 駆動時の可聴音に対して実際に 7~17 dB 低減されることを確認した。また、被験者実験を通して、8~200 Hz の周波数帯において、提案手法による LM が従来手法による LM と差がないあるいは、有意に知覚されやすいことを確認した。以上より、提案手法が LM 触覚提示手法として有効であることが確認された。

ただし、提案手法では従来手法のように自由な軌道を描くことは未だ出来ない。しかしながら、今後空中超音波触覚を実用化する場合、従来手法と提案手法を組み合わせて使用することで、VR 空間での聴覚情報を阻害しない触覚提示が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] KAKEYA, Hideki; OKADA, Ken; TAKAHASHI, Hayato. "Time-division quadruplexing parallax barrier with subpixel-based slit control." *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2018, 6.3: 237-246.
- [2] Microsoft. HoloLens2. <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware> (最終閲覧日 2022/07/14)
- [3] 半田拓也. 空間内を移動させることで仮想物体の 3 次元形状と硬さの情報を提示するハプティックデバイスの開発. *映像情報メディア学会誌*, 2019, 73.1: 161-166.
- [4] 篠田裕之. 超音波を用いた空中触覚提示. *日本音響学会誌*, 2019, 76.1: 38-45.
- [5] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, Hiroyuki Shinoda, "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound," *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010.
- [6] 岩本貴之, 篠田裕之: 音響放射圧の走査によ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. 11, No.1, pp. 77-86, 2006.
- [7] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display," *IEEE Transactions on Haptics*.
- [8] TAKAHASHI, Ryoko; HASEGAWA, Keisuke; SHINODA, Hiroyuki. "Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus." *IEEE transactions on haptics*, 2019, 13.2: 334-342.

- [9] FRIER, William, et al. "Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air." *In: International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, Cham, 2018. p. 270-281.
- [10] MORISAKI, Tao, et al. "Midair Haptic-Optic Display with Multi-Tactile Texture based on Presenting Vibration and Pressure Sensation by Ultrasound." *In: SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*. 2021. p. 1-2.
- [11] Shun Suzuki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, "Reducing Amplitude Fluctuation by Gradual Phase Shift in Midair Ultrasound Haptics," *IEEE transactions on haptics*, Vol. 13, No. 1, pp. 87-93, Jan.-March 2020.
- [12] Hoshi, T. (2017). "Noise reduction of airborne ultrasound tactile display on moving stimulation point," *Trans. Virtual Reality Soc. Japan* (in Japanese), 22(3), 293-300.
- [13] Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, "Sound Depression of Airborne Ultrasound Phased Array Using Global Phase Variation Minimization," *SICE System Integration*, pp.527-529, Dec.13-15, 2018.