



# 非接触触覚刺激の時空間変調パターンによる知覚強度の比較

水谷沙耶, 神垣貴晶, 鈴木颯, 高橋諒子, 松林篤, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之

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, [mizutani@hapis.k.u-tokyo.ac.jp](mailto:mizutani@hapis.k.u-tokyo.ac.jp))

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)

**概要:** 空中超音波触覚提示法の実用上の課題の一つに、提示力の弱さがあげられる。そのため、限られた提示力のもとで、なるべく知覚されやすい刺激パターンを見出しておく必要がある。本稿では、固定点での強度変調よりも刺激が強く感じられる LM 刺激において、その変調パターンを変化させたときの知覚強度の差異を実験により検証した。

**キーワード:** 時空間変調、非接触触覚提示

## 1. はじめに

空中超音波触覚ディスプレイ(AUTD)[1][2]とは、超音波振動子アレイの各振動子の位相を制御し超音波を集束させ、音響放射圧によって触覚を提示する装置である。AUTD を用いれば、十分高い時間分解能で、皮膚表面に圧力分布を作り出すことができるが、一つの問題はその提示力の弱さにある。例えば現在までに開発されている、20cm 角の AUTD 一台が発生させることのできる最大力は高々16mN である[3]。

AUTD を用いて皮膚の一点に刺激を提示する場合、従来は、音響パワーを受容器が感じやすい周波数で変調する Amplitude Modulation(AM)が用いられてきたが、近年、音響パワーは一定としながら焦点位置を皮膚に沿って振動させる Lateral Modulation(LM) 法によって AM の場合よりもより強い刺激が知覚されることが報告されている[4]。その先行研究では、焦点位置を単振動させた場合の効果が検討されているが、本研究では、LM 法をそれ以外の変調パターン、すなわち焦点位置が不連続に変化する場合にも拡張し、その効果を被験者実験により検証する。

## 2. 提案手法

### 2.1 関連研究

高橋らは論文[4]の中で、図1のように軌跡(線分)を描くように焦点を皮膚に沿って往復させる LM の刺激パターンを検証した。その被検者実験において、固定点に印加

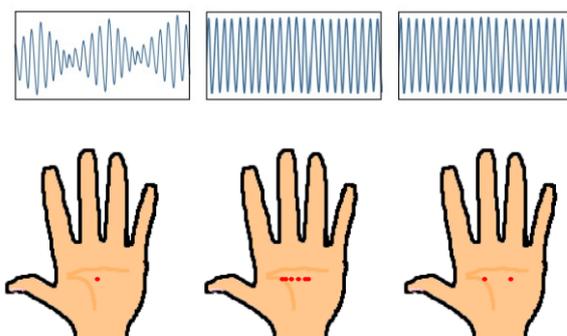


図 1: (左) AM (中央) 多点 LM (右) 2点 LM の(上)振幅 と(下)刺激提示位置

される力を時間的に変化させる AM よりも強い振動感覚が知覚できることを示した。このような焦点の連続的な移動による LM 刺激を、ここでは多点 LM と呼ぶことにする。先行研究で主張されている知覚強度向上の効果は、空間的に変調された刺激に対する人間の知覚特性によるものであると結論づけている。空間的刺激の知覚効果について詳細に調査を行うことにより、提示された振動触覚刺激を主観的に強化する、より効率的な時空間変調パターンが見出される可能性があることを示唆している。

### 2.2 提案する時空間変調パターン

本研究では、図1のように線分の端点にのみ交互に刺激を提示するという刺激パターン(2点 LM)を検証する。2点 LM は、AUTD に実装する際に位相の切り替えが少なく、装置への信号伝送負荷が低減すると同時に、位相切り替えに伴う装置からの発生音を低減する利点がある。

Saya MIZUTANI, Takaaki KAMIGAKI,  
Shun SUZUKI, Ryoko TAKAHASHI,  
Atsushi MATSUBAYASHI, Masahiro FUJIWARA,  
Yasutoshi MAKINO, Hiroyuki SHINODA

### 3. 実験

#### 3.1 実験概要

実験システムの実際の外観図を図2に示す。4台のAUTDを用いて、AM、多点LM、2点LMの3種類のパターンを被験者の非利き手の手のひらに提示した。

先行研究を参考にし、焦点移動距離と空間周波数をそれぞれ、その効果が有効であると明らかにされている14mmに固定し10~200Hzの範囲で実験を行った。

いずれの実験においても、被験者には実験中、装置から発生する音によるノイズが結果に影響しないよう、ホワイトノイズを聞いてもらった。

##### 3.1.1 実験1

10人の男女を対象として実験を行った。変調をかけていない空中超音波焦点を無毛部である手のひらに提示し、その後刺激を与えた。刺激をAM刺激、多点LM刺激、2点LM刺激の3種類、空間周波数を10, 50, 100, 200[Hz]の4種類とした全14種類の条件において試行を行った。各試行において、被験者には刺激を感じるかどうかを答えてもらった。被験者の回答により刺激強度を変化させ、各条件における閾値を測定した。

##### 3.1.2 実験2

5人の男女を対象として実験を行った。実験1と同様に、変調をかけていない空中超音波焦点を無毛部である手のひらに提示し、その後刺激強度が同じである多点LM刺激と2点LM刺激を順に提示した。提示した物理的な力は両刺激法で等しく、使用した装置が発生できる最大印加力とした。被験者には最初の刺激に対して二つ目の刺激が強く感じたか、弱く感じたか、それとも同じくらいの強さだと感じたかを三件法で答えてもらった。空間周波数を10, 30, 40, 80, 100, 150, 200[Hz]の7種類とし、10Hzから上げていく上昇と200Hzから下げていく下降とをそれぞれランダムに5回ずつ行った。

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 結果(実験1)

図3に各被験者から得られた閾値の平均を示す。0dBは4台のAUTDが出力可能な最大印加力を意味する。周波数に依らず、多点LM刺激はAM刺激よりも強く感じられるという結果が得られた。高橋らによる先行研究の実験結果と比較することにより、本実験が高橋らの実験を正しく再現でき、さらに本実験結果が正しいということが確認できる。

図3によると、10Hzから200Hzの周波数帯においては、2点LM刺激はAM刺激にくらべ閾値低下が顕著である。10Hzにおいて2点LM刺激は多点LM刺激よりも知覚されやすい。しかし、50Hzおよび100Hzにおいてはその関係性は逆転し、多点LM刺激のほうが2点LM刺激よりも知覚されやすいという結果が得られた。また、200Hzにおいては、二つの刺激の知覚されやすさは同じであるという結果となった。

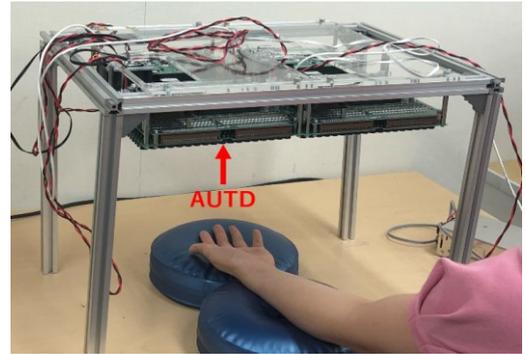


図2: 使用した装置と実験の様子

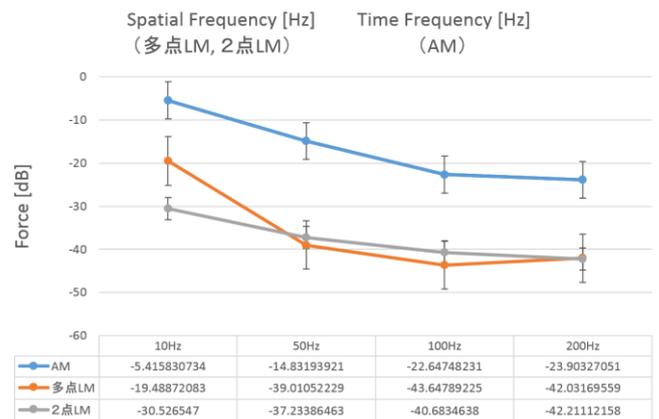


図3: AM, 多点LMおよび2点LMの平均閾値の比較

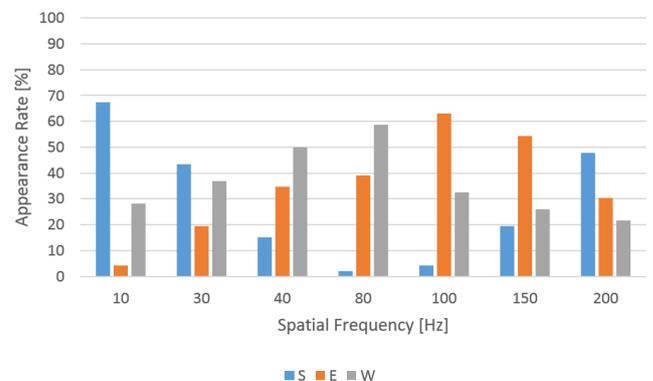


図4: 多点LMと2点LMとの知覚強度の比較

#### 3.2.2 結果(実験2)

多点LM刺激に比べ2点LM刺激が強い(S)と感じたか、弱い(W)と感じたか、もしくは同じ強さ(E)だと感じたかを被験者に回答してもらった際のS, W, Eの出現率を、各周波数ごとにまとめたものを図4に示す。10Hzにおいては、刺激の触感が顕著に違い、被験者は知覚強度の比較に迷う場面が多かった。しかしながら、多点LM刺激よりも2点LM刺激のほうが強く感じたという回答が70%と、弱く感じたという回答を大きく上回った。このことより、触感の違いは知覚強度比較に影響を与えなかったと考えられる。一方80Hzでは、ほとんど全ての試行において多点

LM 刺激のほうが2点 LM 刺激よりも強く感じる、あるいは同じくらいの強さであると回答されている。100Hz 以上では、同じ強さを感じるという回答の割合が 50%以上となった。

#### 4. おわりに

本論文では、空中超音波焦点の LM 刺激パターンの一つとして、線分の端点にのみ交互に刺激を提示するという刺激パターン（2点 LM）を検証した。2点 LM は生成する焦点が少ないために、装置への信号伝送量を低減できる利点がある。

被験者実験により、先行研究で提案されている AM 刺激、多点 LM 刺激および2点 LM 刺激の閾値を測定し、比較した。また、最大印加力において、多点 LM 刺激と2点 LM 刺激の知覚強度を比較した。

3種類の時空間変調パターンについて、得られた平均閾値を比較すると、AM 刺激に比べ LM 刺激の閾値低下は 10Hz から 200Hz の周波数帯において顕著であった。また、10Hz において、2点 LM 刺激の平均閾値は多点 LM 刺激の平均閾値よりも 10dB 低く、50Hz 以上の周波数においては両者の平均閾値には最大 3dB 程度の差しか見られなかった。10Hz, 30Hz および 200Hz において2点 LM 刺激は多点 LM 刺激に比べ知覚強度が増加し、40Hz から 150Hz の周波数帯においては多点 LM 刺激のほうが2点 LM 刺激知覚強度が強いという結果となった。

今後の展望として、変調パターンの違いが人間の知覚強度にどのように影響を及ぼしているのか、知覚のメカニズムを調べる。

また、本稿の被験者実験で、多点 LM 刺激から2点 LM 刺激に変化したことに、被験者が気が付かない場合があった。提示パターンが違うにもかかわらず同じ感触に感じられる理由について探求することも今後の課題とする。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費 16H06303 の支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, and Hiroyuki Shinoda, "Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound," EuroHaptics 2008, LNCS 5024, pp. 504-513, 2008.
- [2] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda. "Noncontact Tactile DisplayBased on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound," IEEE Trans. on Haptics, Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010.
- [3] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之: 空中超音波フェーズドアレイによる触覚ディスプレイ, 第 13 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3A2-2, 2008.
- [4] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki

Shinoda, "Lateral Modulation of Midair Ultrasound Focus for Intensified Vibrotactile Stimuli," EuroHaptics 2018: Haptics: Science, Technology, and Applications, pp. 276-288.