



Perceivable MinimumShift : 指腹上で知覚可能な超音波触覚刺激の最小移動幅

加藤滉一¹⁾, 森崎汰雄²⁾, 鈴木颯¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Koichi KATO, Tao MORISAKI, Shun SUZUKI, Yasutohi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

- 1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, kato@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)
2) NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

概要: 近年の超音波触覚技術は、従来の振動触覚よりも空間解像度が高く知覚される圧覚の提示が可能となった。本研究では、超音波刺激の提示位置を指腹上で微小に変位させることで、圧覚刺激で知覚可能な最小移動幅を評価し、従来の振動触覚よりも小さな移動幅で知覚可能であることを示す。実験により、圧覚刺激では 1.3mm の移動幅で刺激の動きを知覚できることが示された。これにより、点字や虫の動きのような細かな表現を要する触覚再現が可能であると考えられる。

キーワード: 超音波触覚, 空中触覚, 空間解像度, ミニマムシフト

1. 緒言

非接触に触覚刺激を提示する方法として、空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display: AUTD) が提案されている。AUTD を用いることで、身体にデバイスを装着することなく非接触に触覚刺激を提示できる。この AUTD では、超音波振動子の位相を制御することにより、空間上に多様な音圧分布を形成し、音響放射圧によって非接触な触覚を提示することができる [1, 2, 3]。これまで、空中タッチパネル [4, 5] や手の誘導 [6, 7] などのアプリケーションに使用されている。

AUTD で提示できる力は高々数十 mN と低いため、人々が触覚刺激をより明瞭に感じる手段として超音波の変調が提案されてきた。特に振幅変調 (Amplitude Modulation: AM) を利用した振動触覚刺激は広く用いられており、知覚感度の高い比較的高周波の変調 (200Hz 程度) が利用されている。また、刺激提示位置の変調 (Spatio-Temporal Modulation: STM [8, 9]、Lateral Modulation: LM [10, 11]) においても触覚刺激を強く知覚させることができることがわかってきており、近年森崎らによって、この LM 刺激を応用することで振動感の伴わない静的な圧覚が提示可能であることが発見された [12]。

LM で生じられる圧覚は、物体に静的に触れた際に生ずる接触感の再現に加え、超音波触覚で提示可能な空間解像度を向上させることが可能だと考えられる。圧覚は高密度に配置された SA-I (Slowly-adaptive type-I mechanoreceptors) によって媒介されるため、LM による圧覚の刺激位置とそのシフト (刺激位置の僅かな移動) は高い空間解像度で知覚できると考えられる。このような圧覚による空間解像度の高さは、触覚形状再現の先行研究により部分的に確認されている。曾明らは、指の水平移動に応じて指腹の圧覚の提示位

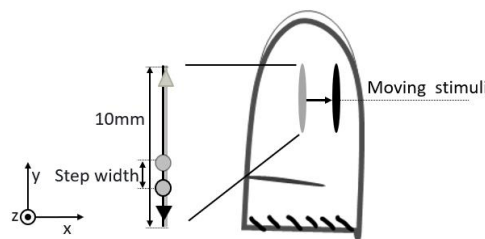
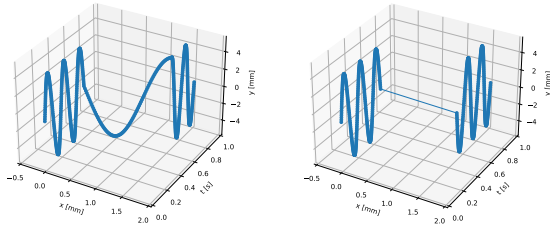


図 1: 本実験で使用した LM 刺激の軌道と指腹でのシフトの模式図

置をシフトすると、そのシフトが明確に知覚され、結果として凸面をなぞる感覚が生じることを実験的に示した [13]。しかし、圧覚により表現可能な空間解像度は定量的に評価されておらず、凸面提示以外の高い空間解像度が求められる他のアプリケーションに適用できるかは不明である。

本研究は、超音波空中触覚における圧覚の空間解像度を評価し、圧覚を用いた触覚再現のためのガイドラインを確立することを目的とする。この論文では、知覚可能な刺激位置の最小移動幅 (ミニマムシフト) を基本要素として定量的に評価に焦点を当てた。実験の結果、圧覚による知覚可能なミニマムシフトは、従来利用されてきた振動触覚に比べて 2.7 倍低かった。圧覚を使用した場合のミニマムシフトは 1.3 mm であり、振動触覚を使用した場合は 3.5 mm であった。これらの結果から、LM による圧覚提示を用いることで、超音波が指腹に微細な動きの感覚を提示できることが示唆された。



$$f_{LM} = 5Hz, \Delta x = 1.5mm, v_x = 10mm/s$$

$$f_{LM} = 5Hz, \Delta x = 1.5mm, v_x = \infty$$

図 2: 超音波焦点が描く軌道の例

2. 提示刺激

本研究では、指の腹における LM 刺激と AM 刺激の知覚可能なミニマムシフトを調査する。

この実験で使用された LM 刺激は、図 1 に示すように線形に移動する LM 刺激である。指に対して長手方向を y 軸、短手方向を x 軸とし、刺激位置は y 軸に沿って正弦波的に周期運動をする。すなわち、焦点の y 座標 r_y は以下の式で与えられる：

$$r_y = R \sin(2\pi f_{LM} t), \quad (1)$$

ここで t は時間を表す。この実験では、移動半径 R を $R = 5mm$ に設定し、LM の周波数は $f_{LM} = 5Hz$ と $30Hz$ に設定された。 $f_{LM} = 5Hz$ は振動感覚のない触覚刺激を提示する周波数として採用され [12]、 $f_{LM} = 30Hz$ は振動感覚を生じる条件として使用された。また、LM の焦点を移動する際の空間ステップ幅も先行研究をもとに $f_{LM} = 5Hz$ の場合は $0.25mm$ 、 $f_{LM} = 30Hz$ の場合は $0.5mm$ に設定された [12]。

AM 刺激については、 $f_{AM} = 50Hz$ と $200Hz$ の二つの周波数を設定した。これらの周波数は、受容野が広いパチニ小体によって主に知覚される振動 ($f_{AM} = 200Hz$) とそうでない振動 ($f_{AM} = 50Hz$) を区別するために選ばれた。

実験では、触覚刺激を右手の人差し指の指腹に提示し、その後 x 軸に沿って左または右にシフトした。ここで、左は橈骨方向、右は尺骨方向を指す。 x 軸に沿ったシフトの開始位置 (指腹の中心) から終点までの距離 Δx は、 $\Delta x = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5$ 、および $4.0mm$ に設定した。刺激の移動速度 v_x は、 $v_x = 5mm/s, 10mm/s, 30mm/s$ 、および ∞ に設定した。これらの速度は、シフトを知覚するのに適していると考えられる $10mm/s$ 、シフトを知覚するには遅い条件として $5mm/s$ 、ハードウェア性能上の最大値である $30mm/s$ が採用された。 ∞ の速度は、刺激が出発点から終点へと不連続にジャンプする刺激として設定した。

図 2 は、 $f_{LM} = 5Hz, \Delta x = 1.5mm, v_x = 10mm/s$ および $f_{LM} = 5Hz, \Delta x = 1.5mm, v_x = \infty$ の条件下での焦点軌道の時間プロットを示している。



図 3: 本実験で使用した実験装置

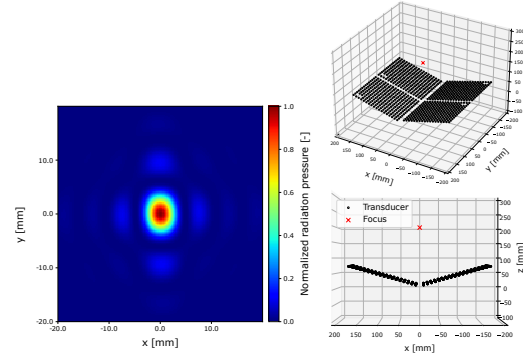


図 4: 実験装置の AUTD セットアップでの超音波焦点位置での音響シミュレーション

3. 実験装置

この章では、立体映像と連動した超音波による空中触覚を実現するために、本研究で使用した実験装置について説明する。

図 3 に示されているように、実験設定は四つの AUTD3 [14]、裸眼立体視ディスプレイ (ELF-SR1 Spatial Reality Display, SONY)、指の三次元情報を取得するための深度カメラ (RealSense D435, intel)、そして指を安定させるための固定具から構成される。AUTD は、音響エネルギーを指に効率よく集中させるために 20 度傾けられた。照射される超音波は ELF-SR1 によって反射され、指腹に触覚刺激を提示した。

実験の被験者が裸眼立体視ディスプレイの前面に浮かぶマーカーに右手の人差し指を接触させると、AUTD から超音波が放出され、指腹に触覚感覚を提示した。刺激位置は、深度カメラによって得られた指腹の三次元情報に基づいて計算された。また、指を固定具に保持することで、被験者の疲労と指の位置の不安定性を軽減した。

図 4 は、被験者の指腹に提示された超音波焦点の放射圧分布のシミュレーション結果を示している。超音波焦点の直径は x 方向で約 $4mm$ (半値幅) である。このシミュレーションでは、各超音波振動子を点音源として考え、その指向性は実験で使用された実際の振動子のデータシートに基づいて決定された。さらに、放射圧分布は音圧の二乗に比例すると仮定した。

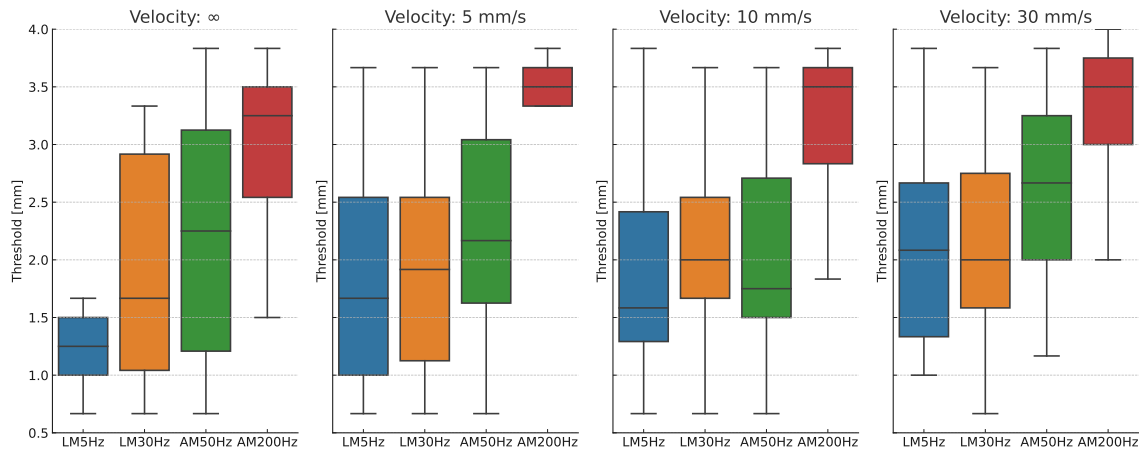


図 5: 各条件での移動幅の閾値

4. 実験

4.1 実験方法

実験には 22 歳から 27 歳の男性 8 名と 23 歳の女性 2 名が参加した。最初に被験者は、裸眼立体視ディスプレイに表示されたマーカーに右手の人差し指の腹を置くよう指示された。指が正しくポジショニングされると、刺激の提示を開始する合図としてアラームが鳴り、その後提示された超音波刺激が指腹の x 軸に沿って移動した。移動方向（左または右）はランダムに設定された。

参加者には、刺激の移動の知覚に関する質問がされた：

Q：提示された刺激は動きましたか？（「Yes」または「No」で回答）

このアンケートは、提示刺激のシフトを知覚した場合の閾値を評価することを目的としている。

閾値を評価するために、二重階段法を使用した。シフトの移動幅はこの質問への回答に基づいて変化し、初期の移動距離は下降系列で 4 mm、上昇系列で 0.5 mm に設定され、「Yes」と答えた場合は 0.5 mm 減少し、「No」と答えた場合は 0.5 mm 増加した。実験は、シフトが 4 mm を超えることや 0.5 mm を下回ったりしないよう設計されており、両系列ともに 6 回の反転が記録されるまで繰り返された。閾値は、これら 6 回の反転の最後の 3 回分のシフトの移動幅を平均して決定された。

4.2 結果

各移動速度と刺激の種類におけるシフトの閾値を、図 5 に示す。最小の閾値は $f_{LM} = 5Hz, v_x = \infty$ の条件で 1.3 mm、最大の閾値は $f_{AM} = 200Hz$ で、 $v_x = 5mm/s, 10mm/s, 30mm/s$ の各条件で 3.5 mm だった。

Shapiro-Wilk 検定により、4 種類の提示刺激： $f_{LM} = 5Hz, f_{LM} = 30Hz, f_{AM} = 50Hz$ 、および $f_{AM} = 200Hz$ の閾値には正規性が確認された ($p > 0.05$)。ANOVA により、刺激の種類における閾値の有意差が示された ($F = 18.60; p < 0.001; \eta^2 = 0.202$) が、移動速度による違いは示されなかった ($F = 1.46; p = 0.233; \eta^2 = 0.011$)。

Tukey の範囲検定による多重比較解析では、 $f_{AM} = 200Hz$ の刺激と他の条件間に有意差が見られたが ($f_{LM} = 30Hz$ および $f_{AM} = 50Hz; p < 0.05$, $f_{LM} = 5Hz; p < 0.001$)、 $f_{LM} = 5Hz, f_{LM} = 30Hz$ 、および $f_{AM} = 50Hz$ のペア間では確認されなかった。

5. 考察

図 5 に示されているように、 $f_{LM} = 5Hz$ の触覚刺激の動きの幅を知覚する閾値は約 1.3 mm であり、 $f_{AM} = 200Hz$ の振動刺激 (3.5 mm) よりも小さい。振動が強く感じられる $f_{AM} = 200Hz$ の閾値は他の刺激よりも大きい。これは、200 Hz の振動が広い受容野を持つパチニ小体を強く刺激するため、刺激位置の周囲の広い範囲で生じた振動感によって、シフトに対する感度が低下した可能性がある。これは、振動感による空間的なマスキングによって刺激の動きに対する識別閾値を鈍くする効果があったことを示唆している。

$f_{LM} = 30Hz$ および $f_{AM} = 50Hz$ の閾値は $f_{LM} = 5Hz$ よりも大きい、 $f_{AM} = 200Hz$ よりも小さい。30 Hz および 50 Hz の周波数は、比較的狭い受容野を持つマイスナー小体を強く発火させ、200 Hz の振動刺激ほどパチニ小体を強くは活性化しなかったことが、 $f_{LM} = 30Hz$ および $f_{AM} = 50Hz$ で観察された閾値の理由と考えられる。

$f_{LM} = 5Hz$ で確認した低い閾値は、緒言で述べた高い空間解像度を要するアプリケーション、例えば小さな昆虫が動く感覚の触覚再現や指の 3D ポジショニングなどに適していることを示唆している。 $f_{LM} = 5Hz$ および $v_x = \infty$ を使用すると、1 cm 程度のサイズの虫、例えば蟻が皮膚上でこの触覚を再現でき、指の 3D ポジショニングは 1-2 mm の精度で達成できると考えられる。

6. 結言

本研究では、超音波触覚技術における指の腹で知覚できるミニマムシフトを評価し、振動感覚のない LM 刺激が従来の振動触覚 (200 Hz の AM 刺激) よりも小さいシフトを知覚できることを明らかにした。

直線形状の LM 刺激の場合、1.3 mm のシフトが知覚可能であり、AM 刺激による振動触覚では、 $f_{AM} = 200\text{Hz}$ の閾値が 3.5mm であった。この結果は、LM による圧覚提示を利用したアプリケーションにおいて、従来の振動刺激と比較してより細かな動きの表現が可能であることを示している。今後の研究では、この細かい動きの感覚が、虫が皮膚を這う感覚等の、特定の触覚体験を再現できるかどうかを調査する。

参考文献

- [1] T. Iwamoto and H. Shinoda, “Ultrasound tactile display for stress field reproduction-examination of non-vibratory tactile apparent movement,” in *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference*. IEEE, 2005, pp. 220–228.
- [2] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [3] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, “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, 2013, pp. 505–514.
- [4] Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue, and H. Shinoda, “Haptoclone (haptic-optical clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback.” in *CHI*, 2016, pp. 1980–1990.
- [5] T. Romanus, S. Frish, M. Maksymenko, W. Frier, L. Corenthy, and O. Georgiou, “Mid-air haptic bioluminescence in mixed reality,” in *2019 IEEE international symposium on mixed and augmented reality adjunct (ISMAR-Adjunct)*. IEEE, 2019, pp. 348–352.
- [6] S. Suzuki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Midair hand guidance by an ultrasound virtual handrail,” in *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 2019, pp. 271–276.
- [7] E. Freeman, D.-B. Vo, and S. Brewster, “Haptiglow: Helping users position their hands for better mid-air gestures and ultrasound haptic feedback,” in *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 2019, pp. 289–294.
- [8] W. Frier, D. Ablart, J. Chilles, B. Long, M. Giordano, M. Obrist, and S. Subramanian, “Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2018, pp. 270–281.
- [9] W. Frier, D. Pittera, D. Ablart, M. Obrist, and S. Subramanian, “Sampling strategy for ultrasonic mid-air haptics,” in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2019, pp. 1–11.
- [10] R. Takahashi, K. Hasegawa, and H. Shinoda, “Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2018, pp. 276–288.
- [11] —, “Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 13, no. 2, pp. 334–342, 2019.
- [12] T. Morisaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. 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.
- [13] Z. Somei, T. Morisaki, Y. Toide, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Spatial resolution of mesoscopic shapes presented by airborne ultrasound,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2022, pp. 243–251.
- [14] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2021.