



# 空中超音波による振動と圧覚の同時提示に基づく テクスチャ感の非接触提示

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

Tao MORISAKI, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 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)

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:** 集束超音波を用いれば非接触に触覚を提示できる。本デモでは、集束超音波で圧力と振動の感覚を同時に提示し、これらを適切な強度比の元組み合わせることで様々な触覚テクスチャ(ざらざら、さらさら、ぬるぬる)を再現する。再現した触覚は空中 3D 映像と合わせて提示する。

**キーワード:** 圧覚、振動、空中超音波、触覚再現

## 1. 緒言

物体に触れるとき、人間はその表面の触感、すなわち触覚テクスチャを知覚する。この触覚テクスチャを触覚ディスプレイで再現できれば、例えばバーチャルリアリティ空間内において高い没入感の元、バーチャル物体に触れることができる。これまでに設置型や装着型など様々なデバイスでこのテクスチャ提示は行われてきた [1]。

空中超音波を用いた非接触な触覚提示においては、その提示力の弱さからテクスチャのレンダリングは未だ困難な問題である。超音波触覚の提示には、Airborne ultrasound tactile display(AUTD)と呼ばれる超音波振動子のアレイを用いる [2]。AUTD は超音波を皮膚に集束することで、様々な圧力分布を非接触に提示できる。すなわち、AUTD を用いればユーザは装置を装着することなく様々な触覚刺激パターンを感じられる。しかし、AUTD による提示力は弱い(数グラム程度)ため、その知覚強度を高めるためには、提示される圧力分布の時空間変調が常に必要である。この変調により、AUTD の提示可能な感覚は振動や動きを伴う特殊な感覚に限定されるため、AUTD によるリアルなテクスチャのレンダリングは困難であった。

近年、テクスチャの再現に向けて、超音波刺激でも静的な圧力の感覚(圧覚)を提示できる刺激法が発見されている [3](図 2)。圧覚は人間が物体に触れる際に必ず感じる感覚であり、人間が物体表面を指で触れそのテクスチャを知覚するには振動に加えこの圧覚が同時に生起している [4]。またテクスチャ知覚の役割を果たす機械受容器の 1 つ(メルケル細胞)が静的な圧力に主に反応することからも、圧覚はテクスチャの再現に不可欠な感覚といえる。Morisaki らは、超音波焦点を低周波かつ滑らかに周期移動(例えば回転)させることで、0.21–0.24 N 相当と強力な圧覚が生起することを報告している [3]。

本研究では、様々なテクスチャを非接触に表現するため

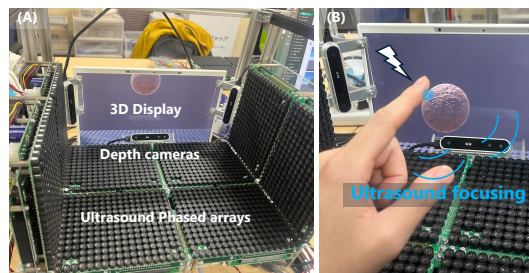


図 1: 本デモ展示で用いる、超音波を用いた非接触な触覚再現ディスプレイ。

に、超音波触覚刺激を用いて振動と圧覚を同時に知覚させる方法を提案する。また、この提案した振動-圧覚の同時提示に基づき、参加者が触覚テクスチャを持つ空中立体像に触れることができる空中触覚ディスプレイを開発、そのデモ展示を行う。この提案コンセプトである振動-圧覚の同時提示はその一部が SIGGRAPH ASIA 2021 Emerging Technology で展示されているが、本展示では大型の AUTD を用いることでより高い放射圧の元テクスチャ再現を行う [5]。

## 2. 触覚提示システム

### 2.1 概要

図 3 に展示する超音波を用いたテクスチャ提示システムを示す。このシステムは超音波触覚刺激を提示するための 8 台の AUTD [6]、ユーザの手をトラッキングするための 3 台のデプスカメラ (Realsense D415)、立体映像ディスプレイ付きの Windows 11 PC (ConceptD 7 SpatialLabs Edition, Acer) で構成される。AUTD とデプスカメラらはすべてこの立体映像ディスプレイ付き PC に接続され、制御された。一台の AUTD には、249 個の 40 kHz 超音波振動子が搭載されており、合計で 1992 台の超音波振動子が同時に使用された。各 AUTD ユニットの通信は EtherCat で通信され、同期的に動作した [6]。

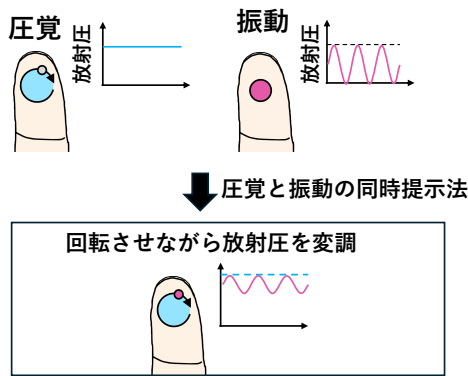


図 2: 超音波における、圧覚と振動の同時提示法。

本システムでは、ユーザの指と立体映像の接触点を取得し、その接触点に対し超音波触覚刺激を提示する。まず、3つのデプスカメラによりユーザの手の3次元座標を点群として取得する。その手の点群と立体映像として提示される3D CGに張られたメッシュとの接触を判定する。ここでは、各点群と各メッシュ頂点の距離が3 mm以内にそのメッシュ頂点を接触済みとして扱った。最終的に接触があったと判定されたメッシュ頂点座標の平均座標の一点のみを指とCG(立体映像)の接触点とし、その接触点に超音波触覚刺激を提示する。振動を圧覚を生起するための超音波刺激のデザインは次章で説明する。

## 2.2 振動と圧覚の同時提示法

本システムにおける、振動と圧覚の同時提示法の模式図を図2に示す。

圧覚を提示するために、超音波焦点を指上で回転させた。回転の中心立体映像と指との接触点であり、その回転の周波数は5 Hz、半径は3 mm、焦点移動の空間刻み幅は0.1 mmとした。これらにパラメータは振動や焦点の動きが知覚されないように先行研究に基づき決定した[3]。

この圧覚に加えて振動も提示するため、回転している焦点の放射力を変調した。例えば200 Hzの振動を圧覚に重畳する場合には、200 Hzでその振幅を変調した。振動と圧覚の強度比は変調波形の振幅で制御した。振動振幅の強度を $A_{\text{vib}}$ とすると、実際にユーザに提示される放射力の時間波形 $F(t)$ は以下式で表現できる。

$$F(t) = A_{\text{vib}} F_{\text{Max}} \left( \sin \frac{f_{\text{vib}}}{2\pi} t + \frac{1}{2} \right) + F_{\text{Max}} (1 - A_{\text{vib}}) \quad (1)$$

ここで、 $f_{\text{vib}}$ は変調周波数、 $F_{\text{Max}}$ は提示可能な最大の放射力である。また、 $A_{\text{vib}}$ の範囲は $0 \leq A_{\text{vib}} \leq 1$ である。

## 2.3 本展示における体験

本展示では、参加者は3種類の異なる触感(つるつる、さらさら、ざらざら)を備えた立体映像に自由に触れることができる。図に、実際に提示する立体映像とその映像に対応させて提示する触覚刺激の模式図を示す。ここでは金属、苔、岩肌の3種類の映像を提示しており、またそれぞれの映像に対しつるつる、さらさら、ざらざらを再現するための触覚刺激が付与されている。つるつるは、圧覚(5 Hzでの焦

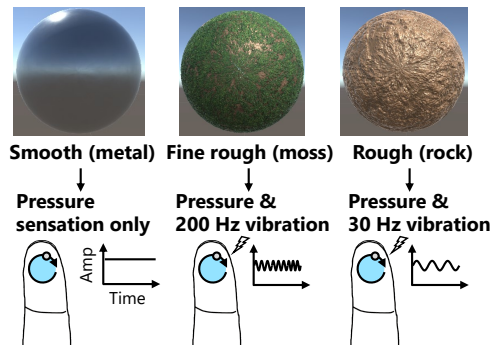


図 3: 本デモ展示で用いる、超音波を用いた非接触な触感再現ディスプレイ。

点の回転)だけが提示される。さらさらは圧覚と200 Hzの振動、ざらざらは圧覚と30 Hzの振動が同時に提示される。  
謝辞 本研究はNEDO SIP 23201554-0の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] C. Basdogan, F. Giraud, V. Levesque, and S. Choi, "A review of surface haptics: Enabling tactile effects on touch surfaces," *IEEE transactions on haptics*, vol. 13, no. 3, pp. 450–470, 2020.
- [2] 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.
- [3] T. Morisaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, "Noncontact haptic rendering of static contact with convex surface using circular movement of ultrasound focus on a finger pad," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. Early Access, 2023.
- [4] S. J. Bolanowski Jr, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky, "Four channels mediate the mechanical aspects of touch," *The Journal of the Acoustical society of America*, vol. 84, no. 5, pp. 1680–1694, 1988.
- [5] T. Morisaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, "Midair haptic-optic display with multi-tactile texture based on presenting vibration and pressure sensation by ultrasound," in *Proceedings of SIG-GRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, 2021, pp. 1–2.
- [6] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, "Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 4, pp. 740–749, 2021.