



# 集束超音波を用いた機械刺激と 冷覚刺激の同時提示による低温物体の触感再現

本山花帆<sup>1)</sup>, 森崎汰雄<sup>1)</sup>, 藤原正浩<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1)</sup>, 篠田裕之<sup>1)</sup>  
Hanaho MOTOYAMA, Tao MORISAKI, Masahiro FUJIWARA,  
Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-0033 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5, motoyama@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 集束超音波で空中像にリアルな触感を付与すれば、デバイス装着無しに MR 空間への没入感を向上できる。従来の超音波触覚では機械的触覚の再現が主であり、特定物体の温度感再現は試みられていない。本研究では、超音波を用いて水や水など低温物体の空中像に冷覚と機械的触覚を同時提示し、対象物体の触感再現を試みる。冷覚は集束超音波の焦点にミストを噴射することで提示し、機械的触覚はその焦点音圧を変調することで提示する。

**キーワード:** 空中超音波, 冷覚提示, 空中映像

## 1. はじめに

触覚フィードバックを用いて実物を触っているかのような体験を実現できれば、VR 空間やゲームへの没入感を向上できる。特に空中超音波フェーズドアレイ (Airborne Ultrasound Phased Array:AUPA) を用いて超音波を集束させれば、非接触に触覚刺激を提示することができる。AUPA の特徴として、ユーザはデバイスを身につける必要がないこと、空中立体像に干渉することなく触覚フィードバックを付与できることがあげられる。これまでに、空中視触覚タッチパネルや、相手の立体映像と触覚を通じて触れ合える視触覚クローンが提案されている [3][4]。

集束超音波は振動や圧力といった機械的な触覚刺激だけでなく、温度感覚の遠隔提示にも利用できる [1][2]。人間は温度感覚を通じて触れた物体の材料を識別するため、この温度刺激も実物体の触感再現には必要となる。特に、冷覚においては機械刺激と同様に完全な非接触提示が実現できており、ミストを集束超音波で気化させることで素手に対し局所的に冷覚刺激を与えることができる [1]。しかし、これまでの超音波触覚研究では振動触覚や温覚、冷覚などそれぞれの感覚の提示方法のみが調査されており、これらを組み合わせることのできるような触覚が表現可能になるのか、触感再現のリアリティーが向上するかなどは定量的に評価されてこなかった。

そこで、本研究は超音波を用いて機械的触覚刺激と冷覚刺激を同時に非接触提示することで、これらの組み合わせが低温物体の触感のリアリティーへどのように寄与するか定量的

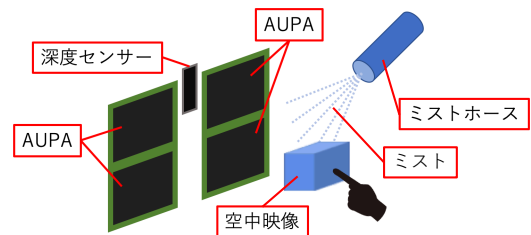


図 1: 提案システムの模式図

な評価を目指す。本稿ではその第一段階として、超音波で振動刺激と冷覚刺激を同時提示するシステムを構築し、その基本的な冷却性能について物理測定を行った。

これまでも超音波を用いて機械刺激と冷覚刺激を同時提示し、水滴等の触感再現を試みた例はあった。しかし、これらの先行研究では皮膚表面の温度は測定も制御されておらず、提示した超音波焦点の近傍に一定量のミストを噴霧したのみであった [6][5]。本研究では、皮膚の温度測定や制御も行うことを計画しており、より定量的に触感再現のリアリティーが高まる刺激条件の探索を目的としている。

## 2. 提案手法

本稿では、機械刺激と冷覚刺激を独立に制御し、空中映像と組み合わせ提示するシステムを提案する。提案システムの模式図を図 1 に示す。

本提案手法では、4 台の AUPA[7][8] を用いて機械的触覚刺激と冷覚刺激を提示する。AUPA は超音波振動子をアレイ状に配列した機器であり、各振動子の位相と振幅を制御する

ことで、任意の点に超音波を集束させることができる。

### 2.1 超音波による機械的触覚刺激と冷覚刺激

超音波を集束させた焦点に皮膚を配置すれば、皮膚に一定の圧力刺激が提示される。しかし、4台のAUPAによる圧力刺激は人間が連続的に知覚し続けるには十分な大きさではない。超音波の振幅を周期変動させる Amplitude Modulation(AM) 変調を使用すれば、連続的に知覚可能な振動刺激を提示することができる。AM 変調により振動触覚の有無を制御すれば、超音波を常に照射した状態で機械触覚の有無を制御することが可能である。

冷覚刺激は超音波の焦点にミスト噴射を行うことで提示する。超音波を集束させることでミストを気化させ、皮膚表面に気化熱による冷覚刺激を与えることができる。この手法を用いる利点は、非接触での急速冷却を局所的に行うことができる点である。中島らによると、空間分解能は2 cm であり、1秒間で4.6K、最初の0.5秒間で3.3Kの温度低下を実現することができる [1]。

冷覚刺激の原理より、AM 変調による振動覚刺激の有無によらず冷覚刺激を提示することが可能である。これらの刺激を独立に制御することで3種類の刺激を提示することができる。つまり、AM 変調無しで冷覚刺激を提示することで「冷覚刺激のみ」を、AM 変調ありで冷覚刺激を提示しないことで「振動覚刺激のみ」を、AM 変調ありで冷覚提示を行うことで「冷覚刺激と振動覚刺激」を提示することが可能となる。

## 3. 冷覚を伴うインタラクティブな視触覚ディスプレイ

提案手法を実装し、空中映像とのインタラクションシステムを構築した。提案装置を図3に示す。空中映像はシースルーヘッドマウントディスプレイ(以下HMD, Microsoft HoloLens 2)を用いて提示する。また、深度センサー(Intel RealSense D435)を用いて指の空間位置を取得し、空中映像からの触覚フィードバックを実装する。空中に適当に設定した領域へ侵入した物体の座標を計測し、重心座標に焦点を形成することで、超音波を指に追従して集束させる。深度画像を取得し、指に追従して焦点位置を決定する様子を図2に示す。図2では、青い枠線で囲まれた長方形の領域において深度を判定している。また、領域に侵入した物体の重心座標を白いマーカーで表示している。

図4はインタラクションを行う様子をHMDでキャプチャした画像である。著者の主観では、「冷覚刺激のみ」「冷覚刺激と振動覚刺激」の2種類の刺激を用いた場合に、冷たい触

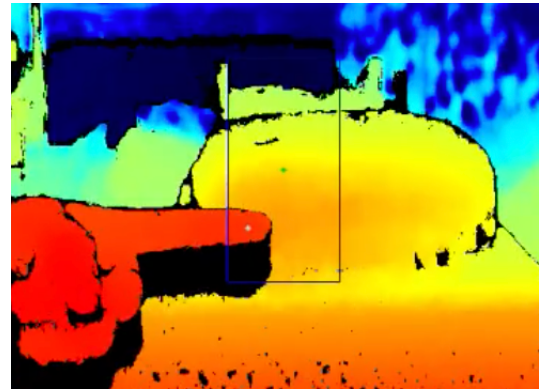


図2: 指に追従して焦点位置を決定する様子。画像内の白いマーカーの位置に超音波の焦点を形成する。

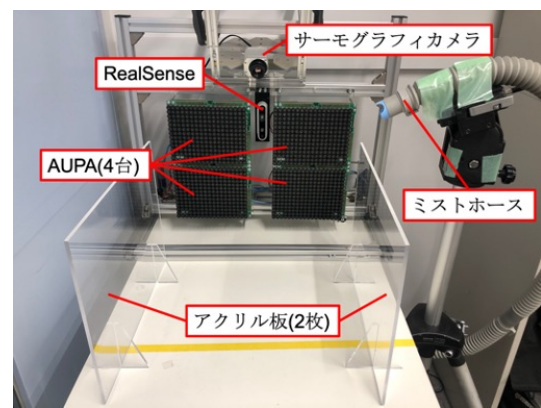


図3: 実験装置

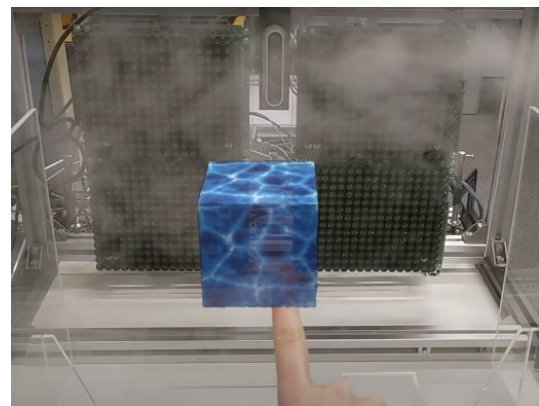


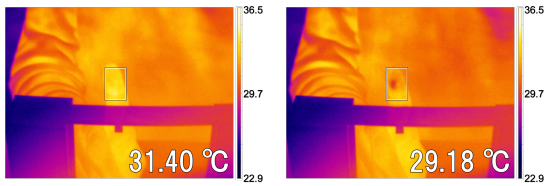
図4: 空中映像とのインタラクションの様子

感を感じることができた。

## 4. 実験

### 4.1 温度計測

提案システムを用いて、機械刺激有無の条件を変化させ、人差し指の皮膚表面温度を計測する。AUPAの平面から距離40 cmの平面上において、指に追従させて超音波の焦点を提示する。機械刺激提示時には150 HzのAM変調を用いる。また、ミストは常に充満させた状態で計測を行う。この方法



(a) 測定開始時 (b) 測定開始から 5 秒後

図 5: AM 変調無しの場合の熱画像

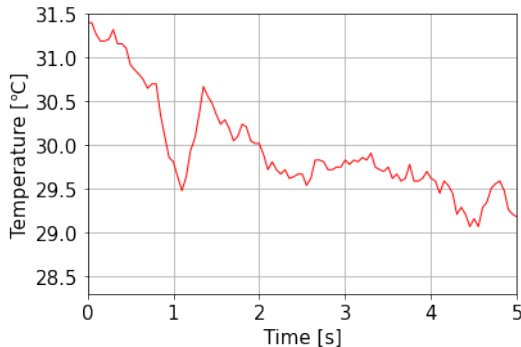
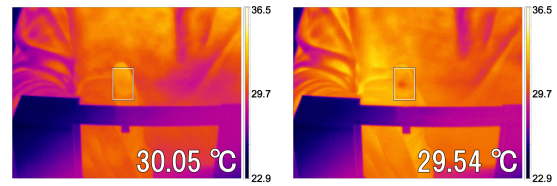


図 6: AM 変調無しの場合の温度変化



(a) 測定開始時 (b) 測定開始から 5 秒後

図 7: AM 変調ありの場合の熱画像

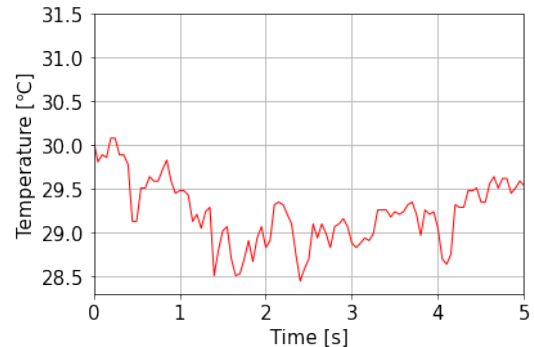


図 8: AM 変調ありの場合の温度変化

を用いた理由は中島ら [1] の手の正面や真上から噴射する手法を用いると、深度センサーがミストを検出してしまい、指の深度測定を正常に行えなかったからである。充満させるミストの量を調節することで、ミストの影響を受けずに指の空間座標を測定することが可能になった。

計測時間は 5 秒間であり、サンプリング間隔は 0.05 秒である。なお、超音波触覚提示と温度計測の同期は行わず、被験者が触覚刺激を感じた時点から温度計測を開始した。

使用した実験装置を図 3 に示す。温度計測にはサーモグラフィカメラ (optris PI450i) を使用した。ミストホースは図 3 のように、AUPA の平面と並行で、水平方向よりも若干床方向へ角度がつくように配置した。アクリル板は、深度測定に影響が無い適度にミストを充満させるために用いた。

#### 4.2 結果

まず、AM 変調を用いない場合の計測結果について述べる。AM 変調無しの場合の温度変化を図 5 に示す。図 5(b) に示されている長方形領域において、局所的な温度低下が確認できる。

図 5 の長方形領域内における最低温度を計測した結果を図 6 に示す。初期温度は 31.40 °C、5 秒後の温度は 29.18 °C であり、2.22 °C 温度が低下した。また、5 秒間の最低温度は 29.07 °C であり、初期温度との差は 2.33 °C であった。

次に、AM 変調ありの場合の計測結果について述べる。AM 変調ありの場合の温度変化を図 7 に示す。AM 変調無し

の場合と同様に、図 7(b) の長方形領域において局所的な温度低下が確認できる。

図 7 の長方形領域内における最低温度を計測した結果を図 8 に示す。初期温度 30.05 °C、5 秒後の温度は 29.54 °C であり、5 秒間で 0.51 °C 温度が低下した。5 秒間の最低温度は 28.45 °C であり、初期温度との差は 1.60 °C である。測定中に最も温度が低くなったのは、測定開始から 2.4 秒後であり、それ以降は上昇傾向に転じている。

#### 5. 議論

実験結果より、提案装置を用いて冷覚刺激と機械触覚刺激を自由に組み合わせ提示できることが示された。

図 6, 8 に示されている温度測定結果においては、温度の上下動が激しく、滑らかに温度が低下していないことが確認できる。この原因は、超音波の焦点が断続的に形成されていたことだと考えられる。実際の測定中に深度センサーがミストを誤検出し指腹上に焦点が形成されない場合があった。ミストの検出を防ぐためには、深度センサーの数を増やし複数方向から指の位置を測定することや、再帰性反射材を指に取り付けマーカーとして作用させることが有効であると考えられる。

また、図 6, 8 を比較すると、初期温度が一致していないことが確認できる。この原因は、皮膚へ噴射されたミストの温度が異なっていたことだと考えられる。今回の実験では、AM 変調無しの場合には室内に十分に放置した室温の水を用

いたのに対し、AM 変調ありの場合には汲んだばかりの水道水を用いた。そのため、AM 変調ありの場合の方が AM 変調無しの場合よりも水が低温であった。今後は使用する水の温度を一定にして実験を行い、ミストの温度差による影響を排除する。

更に、図 8 については、2.4 秒以降に上昇傾向に転じている。これは、空調の影響によりミストの濃淡が変化していたことが原因であると考えられる。人差し指付近にミストが溜まっていない場合に、十分な冷却効果が得られなかった可能性がある。今後は空調の影響を受けないようなミストを充填させる箱を作成する、実験室の空調を切る、などの対策を行う。

## 6. おわりに

本稿では、非接触で低温物体の触感再現を行うことを目指し、超音波を用いて冷覚及び機械触覚を独立に制御して提示するシステムを構築し評価した。

実際にシステムを構築した結果、冷覚と振動覚刺激の有無を自由に組み合わせた刺激を立体映像からのフィードバックとして得ることができた。

冷却効果の評価は、AM 変調を用いずに「冷覚刺激のみ」を提示する場合と、AM 変調を用いて「冷覚刺激と振動覚刺激」を提示する場合について行なった。AM 変調無しの場合には、5 秒間で 2.22 °C、AM 変調ありの場合には 5 秒間で 0.51 °C の冷却効果が確認できた。

今後は、本提案システムを用いて冷覚刺激と振動覚刺激を制御して提示することで低温物体の温度再現を行い、触感再現を実現することを目指す。

## 謝辞

本研究は JST CREST JPMJCR18A2 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino and H. Shinoda, "Spatiotemporal Pinpoint Cooling Sensation Produced by Ultrasound-Driven Mist Vaporization on Skin," in IEEE Transactions on Haptics, doi: 10.1109/TOH.2021.3086516.
- [2] Kamigaki T., Suzuki S., Shinoda H. (2020) Non-contact Thermal and Vibrotactile Display Using Focused Airborne Ultrasound. In: Nisky I., Hartcher-O' Brien J., Wiertelowski M., Smeets J. (eds) Hap-

- tics: Science, Technology, Applications. EuroHaptics 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12272. Springer, Cham.
- [3] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, Hiroyuki Shinoda, "HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen", Proc. ACM UIST, (2014), 663-667.
- [4] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, Hiroyuki Shinoda, "HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback", Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1980-1990, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA, May 7 - 12, 2016.
- [5] 鈴木智也, 神垣貴晶, 中島允, 二宮悠基, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之: 空中超音波を用いた水滴の触感の提示第 21 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2020), pp. 638-640, 2020.
- [6] 日浦宏哉, 鈴木颯, 中島允, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之: 「液面境界刺激による水中感覚の再現」 第 25 回バーチャルリアリティ学会大会, 2C3-4, オンライン開催, Sep.16-18, 2020
- [7] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto and H. Shinoda, "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound," in IEEE Transactions on Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, July-Sept. 2010, doi: 10.1109/TOH.2010.4.
- [8] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino and H. Shinoda, "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display," in IEEE Transactions on Haptics, doi: 10.1109/TOH.2021.3069976.