



空中超音波によるミスト気化を用いた接触冷感の非接触提示

本山花帆¹⁾, 森崎汰雄¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾
 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: 空中映像の触感をリアルに再現すれば MR 空間への没入感が向上する。超音波触覚においても触感再現が試みられているが、振動覚や圧覚の再現が主であり温度再現は行われていない。本研究では超音波のミスト気化により冷覚を提示し、さらに提示部位における皮膚温度の下降速度を制御することで室温の木、金属、氷との接触冷感の再現を試みる。下降速度は超音波焦点の音圧を変化することで制御する。
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れば、コンピュータゲームや VR 空間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 (AUPA) を用いて非接触で触覚を提示すれば、ユーザの動きを制限せずに触感を付与することができる [3][2]。AUPA は超音波振動子を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によって空中の任意の点に超音波焦点を形成する。焦点位置では音響放射圧が発生し、人間の皮膚に非接触で触覚刺激を与えることができる。

近年この超音波触覚提示においては、振動覚など機械的な触覚刺激に加え、冷覚も非接触に提示できることが示された [7]。Nakajima らは、皮膚表面に吹き付けたミストに超音波焦点を照射することでそのミストを気化させ、焦点近傍を急速に冷却できることを示した [7]。このミスト気化を用いた冷覚提示では、その冷却する範囲はおおよそ焦点サイズ (1 cm²) と細かく絞れる。また、その冷却速度も他の空気流を利用した非接触冷覚提示に比べて高速である [5][10]。

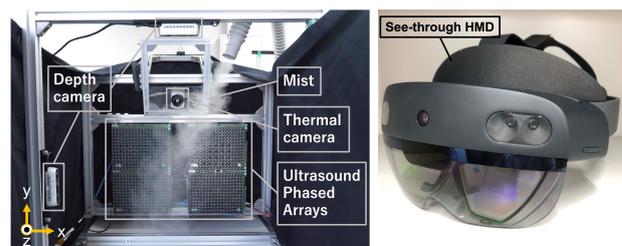
本研究では、このミスト揮発による冷覚提示を用いて指先上の温度変化を制御し、物体との接触冷感の非接触再現を試みる。ここで、接触冷感とは物体に触れたときに感じられる冷感のことであり、その物体の温度や熱伝導率によって異なって感じられる。冷感の実験では室温に冷やされた金属と木、及び氷の三種類の材料の再現を試み、このうち金属と氷の接触冷感をリアリティ高く再現できることを示す。これまでも超音波で粗さなど物体の表面テクスチャを再現した研究はあるが [1][8][6]、その温度感までを超音波で再現した研究はない。

本実験では、被験者に対して空中映像と 3 種類の冷覚刺激を組み合わせて提示し、得られた冷感のリアリティを評価する。映像には木と金属、及び氷を用いた。木と金属については、被験者は室温に冷やされた実物に触れることでその温度イメージを統一した。冷覚パターンは超音波振幅を制御することで変化させ、継続的に最大出力 (最大振幅) で冷却を行う刺激、瞬間的に最大出力で冷却を行う刺激、瞬間的に比較的弱い冷却 (超音波振幅が最大の 2 分の 1) を行う刺激、の三つを用いた。

2. 接触冷感の提示システム

2.1 システム構成

提案する空中触覚ディスプレイ (図 1) は 4 台の AUPA、ミスト発生器、2 台の深度センサー (Intel Real Sense D435)、シースルーヘッドマウントディスプレイ (Microsoft HoloLens2) で構成されている。AUPA は超音波焦点を提示するために用いられ、1 台に 40 kHz の超音波振動子が 249 個搭載されている [9][4]。



(a) 冷感提示装置

(b) HMD

図 1: システム構成

2.2 超音波による冷感提示

本システムでは、ユーザの指先位置を追従し、指先と空中映像が接触した際に冷覚刺激を提示する。指先位置の計測は深度センサーに搭載された RGB カメラを用いて行う。ミスト環境下においてもロバストに指先位置を測定するために、ユーザは指先に二つのカラーマーカを取り付ける (図 2)。冷感提示装置 (図 1a) の左側に位置する RGB カメラを用いて、指の側面のマーカの二次元位置を取得することによって、y-z 座標を得る。さらに、冷感提示装置の上部に位置する RGB カメラによって、指の上部に位置するマーカの二次元位置を取得し、x 座標を得る。これによって指先の三次元位置を取得する。この三次元位置を用いて空中映像と指先の接触を判定し、接触時にのみ指先位置に超音波焦点を形成する。ユーザの手にミストを常に噴射することによって、この焦点がミストを揮発させ、リアルタイムで指先に冷覚を提示できる (図 3)。

本システムの冷却性能の調査を目的として、冷覚刺激を提示した指先の温度変化を測定した。このとき、超音波は最大振幅を用いた。温度の計測結果を図 4、冷却前後の熱画像を図 5 に示す。図 4 より、0.5 秒以内に最大 1.8 度温度が低下することが示された。先行研究 [7] では 0.5 秒間に 3.3 度温度が低下しており、1.5 度の差が生じた。図 5 より、冷却されているのは指先のうち焦点が提示されている部分のみであり、冷却される範囲が局在することが示された。また、様々な振幅の超音波を用いて温度変化を計測することによって、振幅が大きいかほど温度が低下することを予備的に確認した。

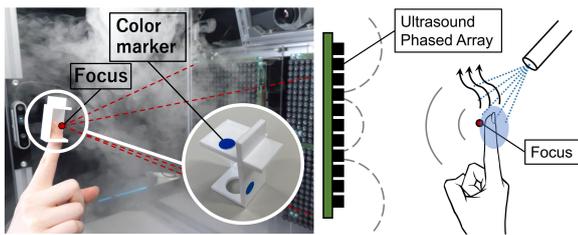


図 2: 指先追従手法

図 3: 冷感提示手法

3. 評価実験

本システムによって空中映像と組み合わせて提示される冷覚刺激のリアリティ評価を目的として実験を行った。

3.1 実験手法

被験者は 22 歳から 24 歳までの男性 3 名であった。被験者は図 6 に示すように、空中映像に 5 秒間触れ続けることを 2 回繰り返して冷覚刺激を得た後、その刺激が実物体からの冷覚刺激をどの程度再現していたかを評価した。評価はリッ

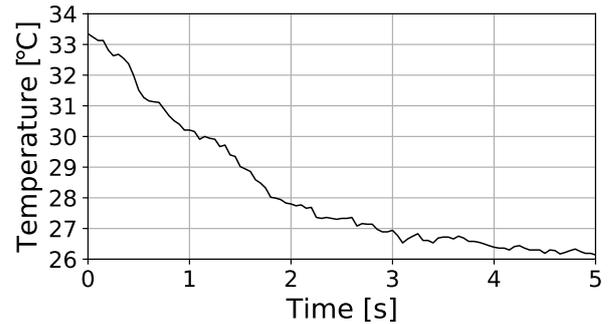


図 4: 提案システムによる指先の冷却結果

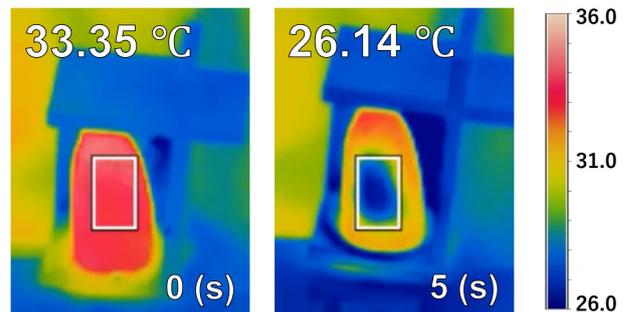


図 5: 指先を 5 秒間冷却した結果

カート尺度を用いて、1 (全くリアルではない) から 7 (非常にリアルである) の 7 段階で行った。これを図 7 に示す 3 種類の材質の空中映像 (氷、アルミニウム、木片) と、3 種類の冷覚刺激パターン (図 8) の組み合わせによって生成された 9 種類に対して 1 回ずつ行った。アルミニウムと木片は室温とした。材質の認識を統一するために、室温のアルミニウムと木片の実物体を用意し、実験前に被験者に十分に触れてもらった。冷覚刺激パターンは焦点の音圧振幅を時間的に制御して生成した。最大振幅を 1.0 とした時、図 8a、図 8b、図 8c に示した刺激パターンをそれぞれパターン a、b、c とする。これらのパターンは、各素材の実際の冷覚刺激を再現するよう、著者の主観に基づいて設定された。

3.2 実験結果

実験結果を図 9 に示す。氷の空中映像を用いた場合に最もリアリティが高かったのはパターン a であり、そのスコアは 7 であった (図 9a)。アルミニウムの空中映像を用いた場合もパターン a が最もリアリティ評価が高く、スコアは 6 であった (図 9b)。木片の空中映像を用いた場合、パターン c を提示した場合のリアリティが最も高く、スコアは 4 であった (図 9c)。

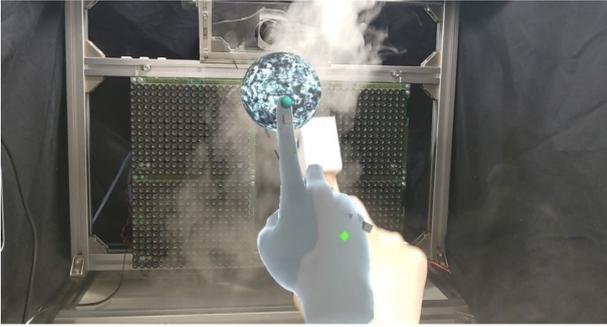
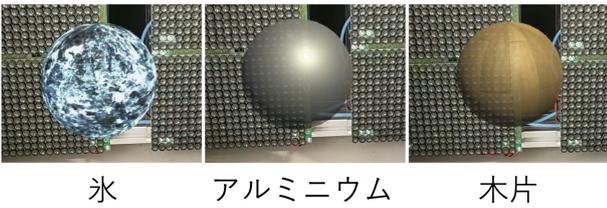
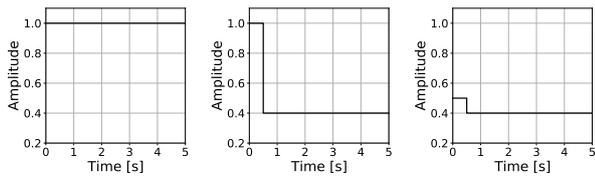


図 6: ユーザ視点映像



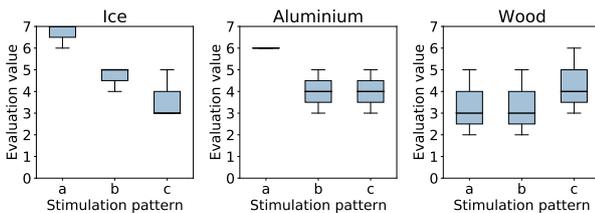
氷 アルミニウム 木片

図 7: 空中映像の材質



(a) 刺激パターン a (b) 刺激パターン b (c) 刺激パターン c

図 8: 冷覚刺激パターン



(a) 氷 (b) アルミニウム (c) 木片

図 9: 実験結果

4. 議論

刺激パターン a と氷の空中映像の組み合わせはスコアが 7 である (図 9a) ことから、刺激パターン a は氷の接触冷感をリアルに再現できたと言える。また、刺激パターン a はアルミニウムの空中映像においてもスコアが 6 であり (図 9a), アルミニウムの接触冷感についても再現できている。

ここで、物体との接触による皮膚温度変化モデル [7] を導

出し、提案システムによる温度変化の実測値と比較した。室温 (25.0 度) のアルミニウム, 木, 及び氷と、指 (32.4 度) との接触による温度降下をシュミレーションし、刺激パターン a, b, c による温度降下と合わせた結果を図 10 に示す。

この結果より、刺激パターン a とアルミニウムは、温度降下パターンが類似している。これにより、高いリアリティ評価が得られたと考えられる。しかし、刺激パターン a と氷の温度降下パターンを比較すると、氷による 5 秒間の温度降下は約 17 度であり刺激パターン a よりも約 10 度低い。この差によらず高いリアリティ評価が得られた理由として、パターン a による継続的な温度降下が、低温物体による急速かつ継続的な温度降下と類似して知覚された可能性がある。また、超音波による冷却では、気流によって皮膚表面に運ばれたミストが液化して付着し、皮膚表面が濡れる現象が見られており、リアリティが高まる一因となった可能性がある。

木片については、どの刺激パターンを用いても高い評価を得られなかった (図 9c)。この原因は、温度降下が最も緩やかなパターン c においても、木片との接触直後の緩やかな温度降下を再現できていないからだと考えられる。空中映像との接触開始直後の振幅の値を小さくすることによって、リアリティを向上できる可能性がある。

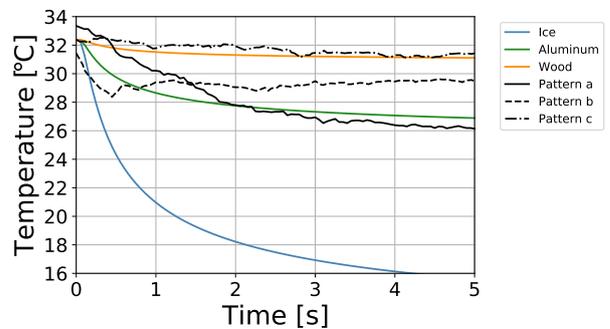


図 10: 提案システムによる皮膚温度変化の計測結果と物体に触れた際の温度変化の理論計算結果の比較

5. 結論

本研究は超音波を用いて空中映像の接触冷感を再現し、非接触で提示するシステムを構築し、そのリアリティを評価した。接触冷感とは空中映像と指先の接触時に、ミストを噴射した指先に対して超音波焦点を形成し、局所的に急速に冷却することで提示した。本システムによる接触冷感のリアリティを評価した結果、氷・アルミニウムの空中映像と、超音波焦点の振幅を最大にして提示した冷覚刺激を組み合わせる際に

高評価を得られた。

今後は、物体と皮膚が接触した際の皮膚温度変化を、超音波の振幅を時間的に制御することで再現し、さらにリアルな接触冷感の提示を目指す。これにより、MR空間で様々な温度と熱伝導率をもった物体の触感再現が可能になると考えられる。

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] David Beattie, William Frier, Orestis Georgiou, Benjamin Long, and Damien Ablart. Incorporating the perception of visual roughness into the design of mid-air haptic textures. In *ACM Symposium on Applied Perception 2020*, pp. 1–10, 2020.
- [2] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram 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*, pp. 505–514, 2013.
- [3] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [4] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display. In *International AsiaHaptics conference*, pp. 99–103. Springer, 2016.
- [5] Takaaki Kamigaki, Shun Suzuki, and Hiroyuki Shinoda. Mid-air thermal display via high-intensity ultrasound. In *SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2020.
- [6] Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Midair haptic-optic display with multi-tactile texture based on presenting vibration and pressure sensation by ultrasound. In *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2021.
- [7] Mitsuru Nakajima, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Spatiotemporal pinpoint cooling sensation produced by ultrasound-driven mist vaporization on skin. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 874–884, 2021.
- [8] Emiri Sakiyama, Atsushi Matsubayashi, Daichi Matsumoto, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Midair tactile reproduction of real objects. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 425–433. Springer, 2020.
- [9] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 740–749, 2021.
- [10] Jiayi Xu, Shunsuke Yoshimoto, Naoto Ienaga, and Yoshihiro Kuroda. Intensity-adjustable non-contact cold sensation presentation based on the vortex effect. *IEEE Transactions on Haptics*, pp. 1–11, 2022.