



# 集束超音波による冷覚フィードバックを有する フォグディスプレイの基礎検討

Basic Study on Fog Display with Feedback of Cooling Sensation by Focused Ultrasound

中島允<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1)</sup>, 篠田裕之<sup>1)</sup>

Mitsuru NAKAJIMA, Yasutoshi 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, nakajima@hapis.k.u-tokyo.ac.jp, Yasutoshi\_Makino@k.u-tokyo.ac.jp, Hiroyuki\_Shinoda@k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 本研究は, ミストによる光の半透過性を利用した特殊スクリーン系空間映像技術の一つであるフォグディスプレイにおいて, 冷覚のフィードバックが得られるシステムを提案する. フォグディスプレイ上の局所領域に対し超音波フェーズドアレイから生成された集束超音波を照射し, 瞬間的なミストの気化による気化熱を用いて冷却することで実現する.

**キーワード:** フォグディスプレイ, 遠隔冷覚提示, 超音波フェーズドアレイ

## 1. はじめに

近年の VR 技術では, 視聴覚刺激だけでなく, 触覚刺激を付与することが多く提案されるようになってきている. さらに, 3D ディスプレイ, ヘッドマウントディスプレイなどの技術の発展に伴い, 視聴覚刺激や触覚刺激を組み合わせた手法が提案されるようになり, その一つとして空中立体映像と触覚とのインタラクションを行うシステムが関心を集めるようになってきている.

まず, スクリーンの存在が認識されない, もしくは希薄に感じられ, 空間中に映像自体が存在しているように見える空間映像技術の例として, ミラーやレンズを用いて像を表示する手法がある[1][2]. また, ストロボ効果を利用した水滴立体映像[3]や霧による光の散乱を利用したフォグディスプレイ[4][5]なども提案されている. 音響ビームを用いて, ミストをエアロゾル状に形成し, かつ制御することで透過性のある空中ディスプレイも報告されている[6].

次に, 空中立体映像と触覚フィードバックを伴うインタラクションを行うシステムについては, 超音波フェーズドアレイから生成された超音波を利用した空中映像と触覚が伴うインタラクションを行うシステムがいくつか提案されている. 例えば, Monnai らによって, マイクロミラーアレイを用いて空中に結像させたディスプレイに触れて操作するシステムである Haptomime[7]や Makino らの提案した HaptoClone[8]などが挙げられる. これらのシステムは, 手や指の位置をセンシングして, 映像との接触位置に集束超音波を発生させることで触覚刺激を提示すること

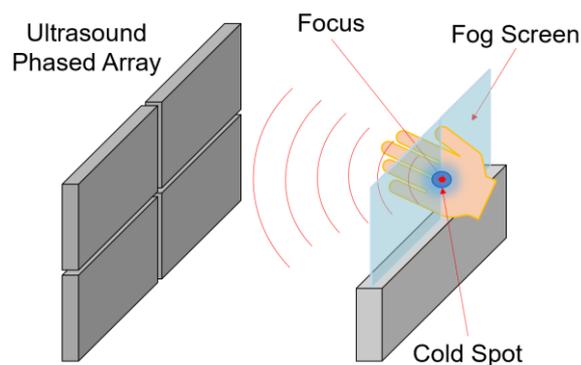


図 1: 提案システムの概略図

に成功している. ただし, 提示される触覚刺激は主に振動覚や圧覚といった機械的な触覚刺激である.

そこで, 我々はこれまでに, 超音波フェーズドアレイから生成された超音波ビームを用いてドライアイスによって冷やされた低温の空気を皮膚表面に空中輸送することで遠隔に冷覚提示する手法を提案した[9]. また, 同様に超音波ビームでミストを空中輸送し, 皮膚に接した際の気化熱を利用して冷却することで冷覚提示する手法も提案した[10]. これらにより, ドライアイスの冷気やミストなどの気体をユーザーの皮膚表面に空中輸送できることが示された. さらに, ミストの気化熱によって冷却効果の高さが示され, 局所的に冷却できることが示された.

本研究ではミストを用いることで, 遠隔冷覚提示とフォグディスプレイとを同時に利用できることに着目する. 超

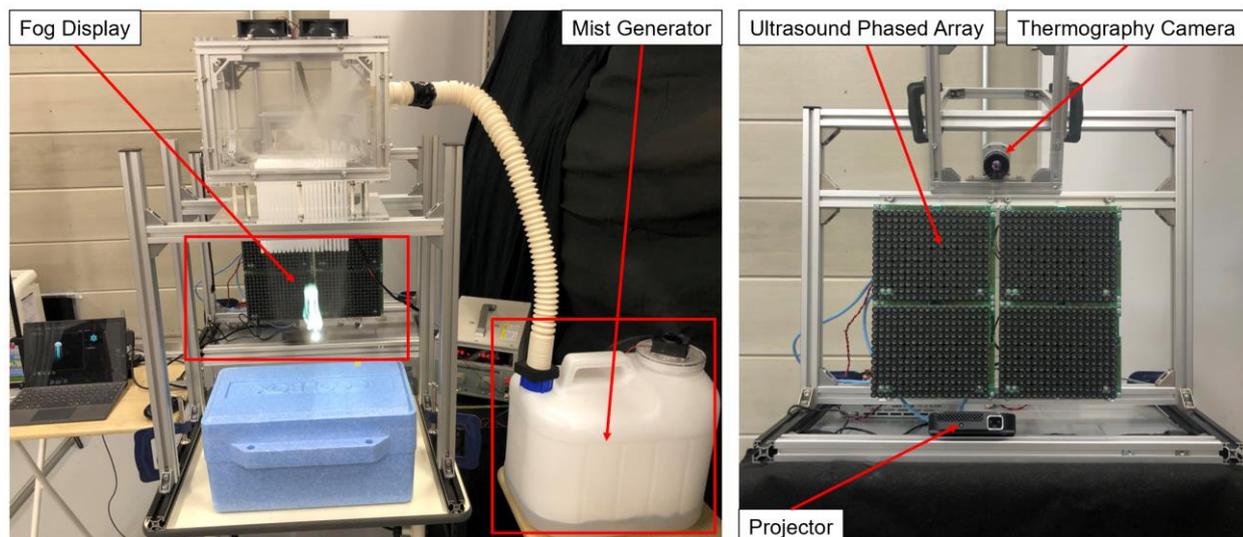


図 2: システムの全体外観

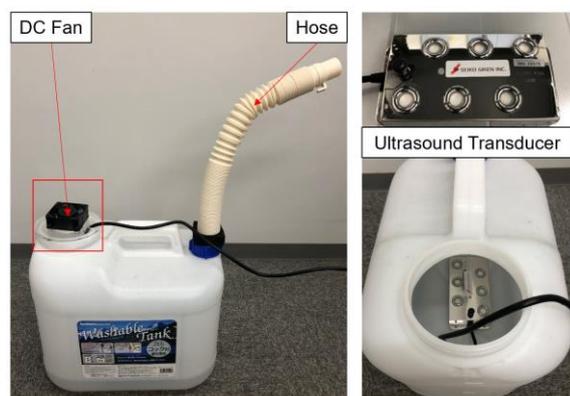


図 3: ミスト発生装置

音波フェーズドアレイを利用して、フォグディスプレイに映る空中立体映像に集束超音波を照射する。この空中映像に人が触れると、ミストの気化熱により冷覚を伴ったインタラクションが実現される (図 1)。

本稿では、提案システムのプロトタイプについて述べ、フォグディスプレイ上に冷覚提示した際の温度変化を測定する。さらに、提案システムにおける映像の見え方について観察した結果について述べる。

## 2. 提案システム

### 2.1 システムの全体外観

図 2 に、提案システムのプロトタイプを示す。40kHz で駆動する超音波フェーズドアレイ、フォグディスプレイ、プロジェクター、ミスト発生装置から構成されている。

### 2.2 ミスト発生装置とフォグディスプレイ

まず、ミスト発生装置について、1.6~1.7MHz で駆動する超音波振動子 (IM6-36D/S SEIKO GIKEN INC)、ミスト貯蔵用のポリタンク (20L) から構成されている。図 3 のように、ポリタンクの中に超音波振動子と 2L の水があり、作動すると 4000ml/h のミストが生成され、タンク内に貯蔵される。発生するミストの中心粒子径は 4~5 $\mu\text{m}$  である。

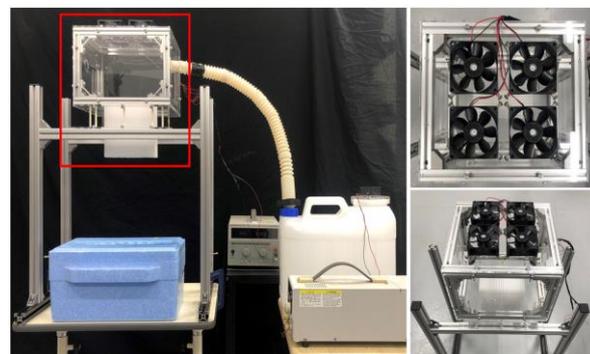


図 4: フォグディスプレイの試作システム

ポリタンクには DC ファン (山洋電気製 San Ace 60W) とホースが接続されており、ファンが作動することでポリタンクの内部に空気が送風され、ホースを介してミストが排出される。ファンは安定化電源と接続されており、出力電圧を調整することでミストの排出量を調整できる。

フォグディスプレイとして利用するために、ミストを安定的に供給する必要がある。そこで、図 4 のように筐体の側面にミスト発生装置と連結するホースを接続し、上部のファンにより送出するシステムを試作した。筐体の上部には 4 つの DC ファンがあり、下部には細いパイプ (直径約 6mm、長さ約 170mm) が 189 本配列されている。ホースから放出されたミストは筐体内部に貯蔵され、ファンによる鉛直下向きの流れによりパイプを通して鉛直下向きに平面の層となって放出される。プロジェクターで層状に流れるミストに映像を投影することでフォグディスプレイとして利用する。

### 2.3 超音波フェーズドアレイによる遠隔冷覚提示

プロトタイプに用いる超音波フェーズドアレイは、岩本らの開発した空中超音波触覚ディスプレイを使用している [11][12][13]。このデバイスでは個々の振動子の位相と振幅を制御することで、様々な空間分布を持つ音場を

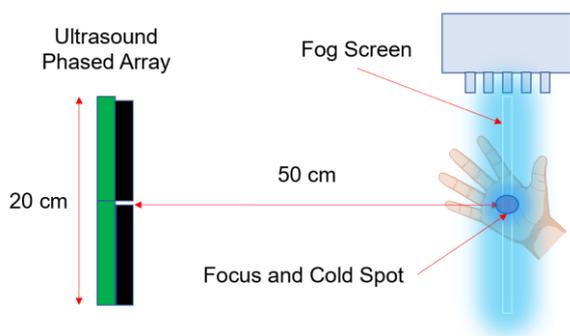


図 5: 実験のセットアップ

生成することができる。よって、空中の任意の位置に超音波を集束させ、冷覚を提示できる。本研究では、フォグスクリーン上のミストを集束させ、瞬間的に気化を促進する。従って、水の気化熱により、ユーザーの皮膚表面を局部的に冷却する。

### 3. 実験

#### 3.1 実験概要

前章のシステムを用いて、フォグディスプレイのミストに晒されている手掌部に対し、集束超音波を照射したときの温度変化を測定した。また、フォグディスプレイ上にプロジェクターで画像を投影したときの観察も行った。

#### 3.2 フォグディスプレイ上の冷覚提示における冷却効果

図 5 のように、超音波フェーズドアレイとフォグディスプレイとの距離、すなわち提示距離は 50cm である。そこで、手掌を台の上に置き、フォグディスプレイの真下に位置するように調整する。そして、集束超音波を照射したときに、サーモグラフィーカメラ (OPTOI4500 29T900) で手掌部に写し出される温度変化をビデオ形式で測定する。測定する際に、図 6 のように測定領域 ( $61.4\text{mm} \leq X \leq 76.8\text{mm}$ ,  $84.6\text{mm} \leq Y \leq 100.0\text{mm}$ ) を指定した。その指定された領域の中心部は集束超音波が照射される位置に該当する。集束超音波が照射されると同時にサーモグラフィーカメラでの測定が開始される。測定時間は 10 秒である。

図 7 は照射開始時 (0s) と照射終了時 (10s) の様子の画像を示す。この結果から、照射される位置において温度が下がっていることがわかる。図 8 は照射されている間の温度変化を示しており、指定した測定領域での温度の最小値の変化を表している。これは、照射後に  $0.1^\circ\text{C}/\text{s}$  の割合で温度が減少し、10 秒間で  $2^\circ\text{C}$  の皮膚表面温度低下が見られた。

#### 3.3 フォグディスプレイへの映像の投影

フォグディスプレイの試作システムによる映像提示の性能について調べるために、2 種類の映像を用意し、プロジェクターで投影した。図 9 のように、ミストを利用したフォグスクリーンに映像を投影した際に、それが視認できることを確認した。ただし、まだ薄い一枚のスクリーン上に安定してフォグをトラップできていないために、周囲に映像がにじむような形で映像が投影されており、今後の改良すべき点である。従って、試作システムがフォグディス

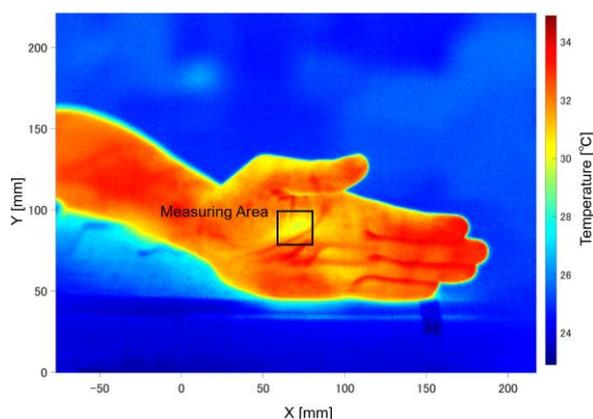


図 6: サーモグラフィーカメラで撮影した手掌部の様子及び測定対象の領域

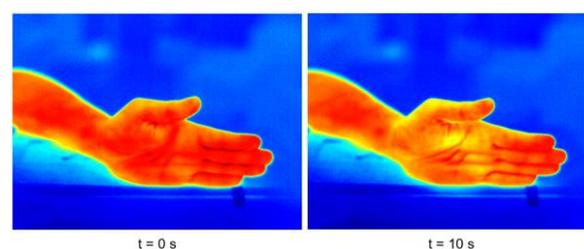


図 7: サーモグラフィーカメラで撮影した手掌部の温度変化の様子

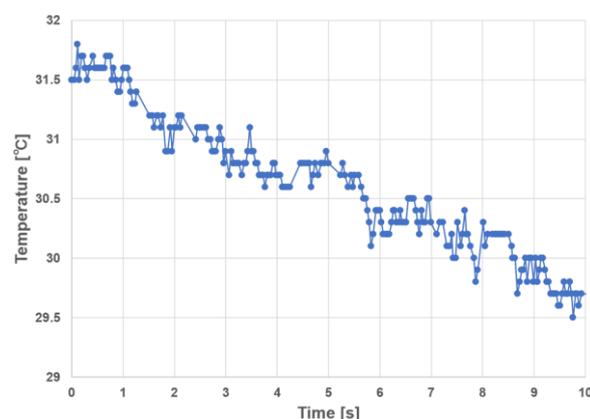
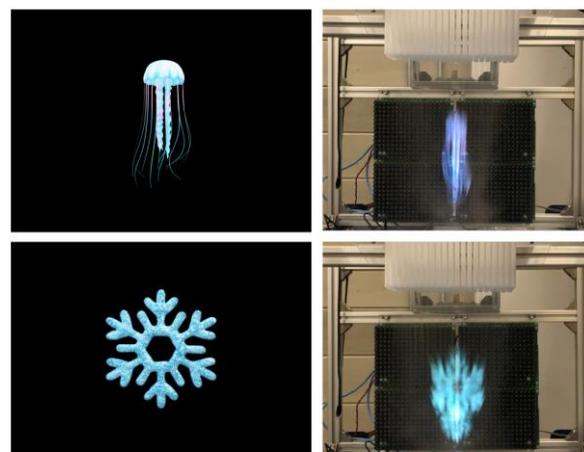


図 8: 手掌部での温度変化



(a) Original Image (b) Image on Fog Display

図 9: 2 種類の映像がフォグディスプレイに投影された様子

プレイとしての働きを有することが確認された。

#### 4. おわりに

本稿では、超音波フェーズドアレイとフォグディスプレイを用いて、空中立体映像と冷覚とのインタラクションを行うシステムについて提案した。システムに用いたミスト発生装置はフォグディスプレイだけでなく、冷覚提示として利用した。システムのプロトタイプを作成し、システムによる冷却効果の評価のために、フォグディスプレイの中にある手掌部に集束超音波を照射したときの温度変化を測定した。実際に照射された位置の温度が低下したことを確認した。また、フォグディスプレイに投影された映像が視認されたことも確認した。

今後はフォグディスプレイの試作システムにおける映像の解像度の調査を行う。さらに、ディスプレイに触れた際の位置をトラッキングして冷覚提示を行うシステムの構築について検討する。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 16H06303 と JST CREST JPMJCR18A2 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] 尾上守夫, 池内克史, 羽倉弘之 (編). 3次元映像ハンドブック. 朝倉書店, 2006.
- [2] H. Kakeya, MOEvision: Simple Multiview display with clear floating image. In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 6490, pp. 64900J-64900J-8, 2007.
- [3] 木村優太, 牧野泰才, 篠田裕之: 射出頻度を個別制御するストロボ水滴立体像, 第20回日本バーチャルリアリティ学会論文集, pp.92-95, 芝浦工業大学, 東京都江東区豊洲, 2015/9/9-11.
- [4] I. Rakkolainen and K. Palovuori: Laser scanning for the interactive walk-through fog screen, In Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp. 224-226, 2005.
- [5] 八木明日華, 井村誠孝, 黒田嘉宏, 大城理: 多視点観察可能なインタラクティブフォグディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.17, no.4, pp.409-417 (2012/12/31).
- [6] M. A. Norasikin, D. M. Plasencia, G. Memoli and S. Subramanian, "Sonic Spray: A Technique to Reconfigure Permeable Mid-Air Displays," Proc. 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS'19), pp. 113-122, Daejeon, South Korea, November 10-13, 2019.
- [7] Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda "HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen," in Proc. UIST, 2014, pp. 663-667.
- [8] 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 Proc. CHI, 2016. pp. 1980-1990.
- [9] M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, "Remotely Displaying Cooling Sensation via Ultrasound-Driven Air Flow," IEEE Haptics Symposium 2018, pp.340-343, Oral Session 7B (Technical Papers), 25-28 March, San Francisco, California, USA, 2018.
- [10] M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino and H. Shinoda, "Remotely Displaying Cooling Sensation Using Ultrasound Mist Beam," Asia Haptics 2018, Live Demo Presentation, Incheon, Korea, Nov. 14- 16, 2018.
- [11] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, "Noncontact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound," Proc. Eurohaptics 2008, pp.504-513, 2008.
- [12] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound," IEEE Trans. on Haptics, Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010.
- [13] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, S. Subramanian, "UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces," Proc. of the 26th ACM symposium on user interface software and technology (UIST '13), pp.505-514, 2013.