

霧の形状変化に適応した映像投影を実現する インタラクティブフォグディスプレイの基礎的検討

大峠 和基¹ 古賀 崇了^{1,a)}

概要：フォグディスプレイは空中に映像を提示できるディスプレイの一形態であり、霧の透過性や霧に触れられるという特長を生かして、様々なインタラクティブ技術へ応用されている。しかしながら、鑑賞者が触れることによる霧の形状変化と映像の変化が自然に結びつくようなインタラクティブに関しては報告が少なく、未だ研究の余地がある。本研究では、鑑賞者が霧の流れを「手で遮る」動作を行う際の手の形状とそれに伴う霧の形状変化に応じて映像が自然に変化するようなインタラクティブを実現することを目的とする。本研究では、ダウフロー型の半円筒形フォグディスプレイに対し、霧の流れに沿って落下するパーティクルを映像として投影する。また、鑑賞者の手の位置及び姿勢を Leap Motion によって 3 次元的に検出する。提案手法では、鑑賞者の手の位置・形状と霧の形状変化の関係を物理エンジンによってあらかじめ対応付けておき、投影するパーティクルの動きに反映することで前述の自然なインタラクティブを実現する。本稿では、構築したシステムおよび提案手法の具体的内容と、アンケートによる客観評価の結果について報告する。

Fundamental Study on Interactive Fog Display Realizing Adaptive Image Projection to Deforming Fog Screen

KAZUKI OTAO¹ TAKANORI KOGA^{1,a)}

Abstract: A fog display is one of the aerial display techniques; and it has been applied to various interactive devices, arts, etc. by taking advantages of its transparency and accessibility. However, few studies have been reported aiming at interaction based on the natural association between the deformation of the fog caused by the viewer's action and the change of the projected image; and there is room for further research into such interaction. In this study, we aim at realizing a natural interaction between a viewer and the projected image induced by the positions and postures of the viewer's hands in "Shielding by hands" action. Concretely, particles falling along with the flow of the fog are projected onto a down-flow fog display having semi-cylindrical figure. The three-dimensional position and posture of the viewer's hands are detected by using the Leap Motion. In the proposed method, by using a physical engine, the above-mentioned natural interaction is realized by reflecting the pre-simulated relationship between the position and posture and the deformation of the fog to the motion of the particles. In this report, we describe the specifications of the proposed system and details of the proposed method, and the results of the subjective assessment using a questionnaire.

1. はじめに

近年、鑑賞者が作品に参加することのできるインタラクティブアートへの関心が高まっており、多数の作品が提案

されている。特に、身近で安全な水や風などの流体を用いる方法が注目を集めている。水などの流体に直接触れるインタラクティブを実現しているものとして、米澤らの Tangible Sound [1] や佐川らのバブルディスプレイ [2] などがある。Tangible Sound は流水をインターフェースに用いた楽器システムであり、鑑賞者が水を出す・流れに触れる・妨げる・開放するといった行動をとることにより、音響

¹ 国立高専機構. 徳山工業高等専門学校
National Institute of Technology, Tokuyama College

^{a)} koga@tokuyama.ac.jp

や音楽を変化させ楽しむことが可能となっている。バブルディスプレイは水中に発生させた気泡へプロジェクタで映像を投影することで水中に映像を提示し、鑑賞者が気泡の動きや形状を変化させる・切断する・かき混ぜるといった行動をとったとき、それによって変化する気泡の動きを捉えて映像に反映させるインタラクションを実現している。

一方、空中映像技術の分野ではfogディスプレイが注目されている。fogディスプレイとは、人工的に生成した霧によって形成したfogスクリーンに対して、プロジェクタで映像を投影することで空中に映像を提示するディスプレイの一形態である。fogディスプレイは霧でスクリーンを形成するため、スクリーンの存在が希薄に感じられる、投影される映像が浮遊しているように感じられる、投影される映像に触れることができるといった特徴があり、それらの特徴を利用したインタラクティブな手法や技術が多数提案されている [3-11]。八木らのfogディスプレイ [4-6] では、複数台のプロジェクタを用いて鑑賞者の視点位置に応じた映像を投影することで、多視点観察を可能としている。また、fogスクリーンに手を差し伸べることで、投影されている動物が飛び跳ねるなどの反応をするインタラクションが実現されている。Lam らのfogディスプレイ [7] では、格子状に並べたノズルの開閉を制御することでfogスクリーンを3次元に展開し、鑑賞者が霧に触れる動作によって空中に線を描くインタラクションを実現している。森らのfogディスプレイ [8] では、鮮明な映像が2次元的に見える層状霧と、映像に立体感があり3次元的に見えるドーム状霧を組み合わせることで、鑑賞者の視点に応じて映像の見え方が多様に変化する。さらに、山口らの手法では、鑑賞者の動きや立ち位置の変化を基に、霧に加わる擬似的な外力を求め、映像に反映することが可能となっている [9]。

このように流体の特性を利用したインタラクティブアートや、fogディスプレイの形態が多数提案されている。しかし、鑑賞者がfogディスプレイの霧の動きや形状を変化させたとき、霧の形状変化と映像の変化が自然に結びつくようなインタラクションの研究はあまり見受けられない。fogスクリーンに触れると霧の形状そのものが変化してしまうため、新奇なインタラクティブ表現を実現するためには、霧の形状変化を検出、もしくは推定する必要がある。しかし、霧は透過性が高いため、画像処理によるリアルタイムの形状推定及び検出は難しい。

本研究では、整流や噴出をする際に生じる風によって、fogスクリーンを形成する霧が一定方向へ流れていることに着目した。物理エンジンを使用して擬似的に霧の流れに沿って落下するパーティクルの映像を生成し、fogスクリーンに投影する。その際、鑑賞者の手の位置及び姿勢をセンサで検出し、落下するパーティクルとの衝突判定を行うことで、鑑賞者がfogスクリーンに触れたときの霧

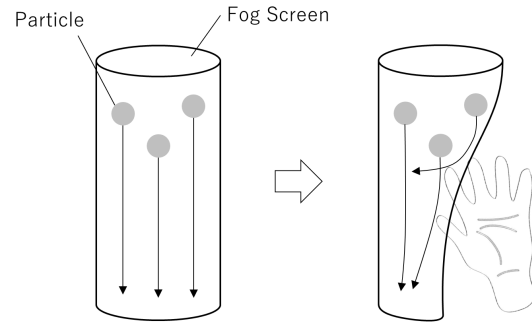


図 1: 「手で遮る」動作に対する映像の変化の例

Fig. 1 Example of change of the projected image by shielding by hand.

の流れの変化を映像に反映させる。提案手法により、鑑賞者が霧に触れた際に、鑑賞者の手の形状とそれに伴う霧の形状変化に応じて映像が自然に変化するようなインタラクションを実現する。

2. 提案手法

本節では、霧の形状変化に適応した映像投影を実現するfogディスプレイを構築するための手法を述べる。

2.1 インタラクション

fogディスプレイにおいて、映像を提示するために空气中に放出した霧は、最初は一定の流速を保ちながら形状を維持するが、噴出部からの距離に応じて徐々に流速が小さくなり、形状も幅広く伸びていく。この霧に対し鑑賞者が様々な動作を起こすことで、霧の形状変化に適応してリアルタイムに投影する映像を変化させる。

本研究では、その基礎的検討として、鑑賞者が「手で遮る」動作に対してのインタラクションを実現する。「手で遮る」とは、鑑賞者がfogスクリーンに手を差し入れ、霧の流れを遮ることをいう。「手で遮る」動作に対する映像の変化の例を図1に示す。落下するパーティクルの映像に対して、流れを遮る・流れを変える・受け止めるように手で遮ると、鑑賞者の手の位置や姿勢に応じてパーティクルの向きや速度も変化する。

2.2 手の位置及び姿勢の検出

手の位置及び姿勢の検出には、Leap Motion [12] を用いる。Leap Motion とは、手や指に特化したモーションキャプチャデバイスであり、両手及び10本の指を3次元的に捉えることができる。本体の位置から30 [mm] ~ 600 [mm] までの距離と中心角110度の空間の範囲内を0.01 [mm] の精度で認識する。

Leap Motion で手を検出する様子を図2に示す。図2のように、RGBカメラや磁気センサによる検出手法と違い、手の位置及び姿勢を3次元で捉えることができるため、より直感的なインタラクションの実現を期待できる。

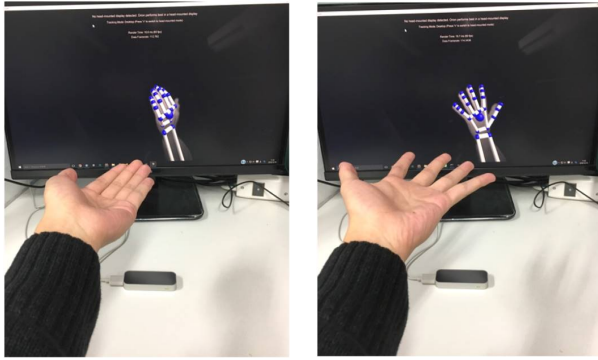


図 2: 手の検出の様子

Fig. 2 Hand detection.

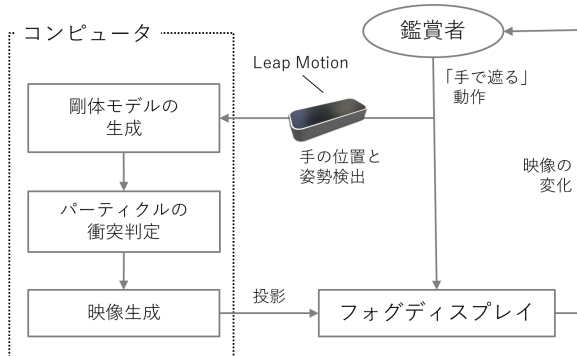


図 3: 処理の流れ

Fig. 3 Block diagram of the proposed process.

2.3 パーティクルシステム

本研究で構築するフォグディスプレイは下向きに送風するため、霧は鉛直下向きに流れ出ている。擬似的に霧に沿って流れ落ちる映像を生成するために、物理エンジンを利用したパーティクルシステムを実装する。

パーティクルシステムは、Emitter と Particle から成り立つ。Emitter は、ランダムな時間間隔で指定半径内のランダムな座標に Particle を生成する。Particle はプリミティブな球体であり、質量や摩擦係数、反発係数などの物理的なパラメータを持つ。生成された Particle は重力により落下するが、センサで検出した鑑賞者の手を基にした剛体モデルと仮想 CG 空間で衝突判定が行われる。鑑賞者の「手で遮る」動作から映像の投影までの流れを図 3 に示す。ここで、実際の霧の動きとパーティクルの動きは正確には一致しないが、実際にフォグスクリーンを手で遮ったときの霧の形状変化を観察し、パーティクルの物理的なパラメータを霧の動きに近づけることで、霧の形状変化と映像の変化が同期しているような感覚を鑑賞者に与えることができる。

3. システム構成と実装

本節では、提案手法に基づいて作成したシステムの構成と実装について述べる。

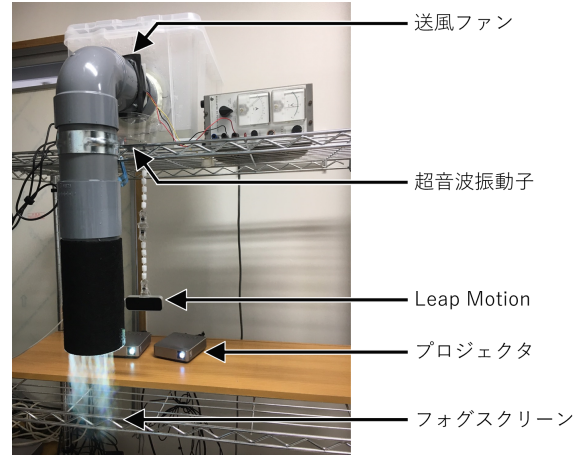


図 4: 構築したフォグディスプレイ

Fig. 4 Prototype of the fog display.

3.1 フォグディスプレイと周辺機器

通常のフォグディスプレイは、霧の強い前方散乱特性により、プロジェクタの正面付近の限られた視野でしか映像を観測することができない。そこで本研究では、八木らの手法 [4-6] である、多視点観察可能なフォグディスプレイを参考にした。構築したフォグディスプレイの外観を図 4 に、フォグディスプレイを構成する装置の仕様を表 1 に示す。

フォグの生成には超音波振動子 (500 ml/h) を 2 つ使用した。フォグの流路は塩ビ管で構成されており、噴出部には $\phi 5 \times 50$ [mm] の管を半同心円状に並べたノズルを設置した。気流の生成には直流式のファンを使用し、電圧を変えることで風量の調整をした。映像の投影には LED 光源プロジェクタ ASUS S1 を 3 台使用し、映像の生成には 4 つの出力先を持つグラフィックボードを搭載した 1 台の Windows PC を使用した。鑑賞者の手の位置及び姿勢を検出するために、Leap Motion を設置した。

3.2 半円筒状のスクリーンの形成

八木らの手法では、単一の観測対象を中心として、その周囲を多視点から観察することを想定している。そのため、図 5(a) のようにフォグスクリーンを円筒形に形成し、プロジェクタの対角線上に映像が提示されるように映像を補正している。これは、鑑賞者が視点を変えた際に運動視差を引き起こし、立体感を提示するという付随効果を生み出したが、フォグスクリーン上の映像の表示位置が変化してしまう。

本研究では、多数の観測対象が提示され、鑑賞者が装置の前方に位置することを想定している。そのため、ある程度の立体感を保ちながら、鑑賞者に違和感を感じさせない手法を取る必要がある。そこで、図 5(b) のように半円筒形のフォグスクリーンを形成した。形成したフォグスクリーンに対して、複数台のプロジェクタからの映像が半円筒形

表 1: 使用した装置の仕様
Table 1 Specifications of the prototype system.

フォグ生成	1-H 霧発生体モジュール DK24
	気化能力 500 ml/h
気流生成	San Ace 80W (三洋電機製)
	サイズ 80mm 角
	回転速度 2900 rpm
	最大風量 1.03 m ³ /s
映像投影	ASUS S1 (ASUS 製)
	表示方式 DLP
	画素数 854 × 480
	光源 LED
	明るさ 200 lm
映像制御	Windows PC
	CPU Intel Core i5-6400 (2.70GHz)
	GPU NVIDIA GeForce GT 730
	Memory 8 GB
	OS Microsoft Windows 10
	開発環境 Unity 5.4.0f3
センサ	Leap Motion

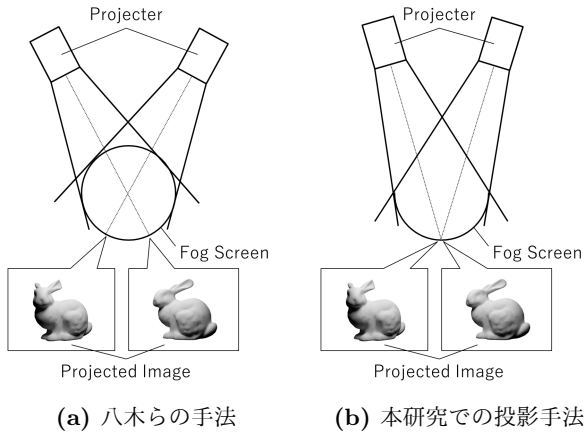


図 5: 半円筒形のスクリーンに対するマッピング

Fig. 5 Mapping to the semi-cylindrical fog screen.

の同じ曲面上に投影されるようにマッピングを行う。霧の強い前方散乱特性により、鑑賞者とフォグスクリーンの成す角度によって観測されるプロジェクタの映像が変わるため、プロジェクタ同士の映像は干渉せず、単一の映像のみを観測することができる。同じ曲面上にマッピングすることで、鑑賞者が視点を変えた際に、フォグスクリーン上の映像の表示位置が変化しない利点がある。

3.3 インタラクション

映像生成には Unity 5.4.0.3f, 物理エンジンには Unity に標準搭載されている NVIDIA PhysX を使用した。鑑賞者がフォグスクリーンに手を差し入れたときの、Unity の画面を図 6 に、実際に「手で遮る」動作をしたときの様子を図 7 に示す。図 7(a) のように、フォグスクリーンが手で遮

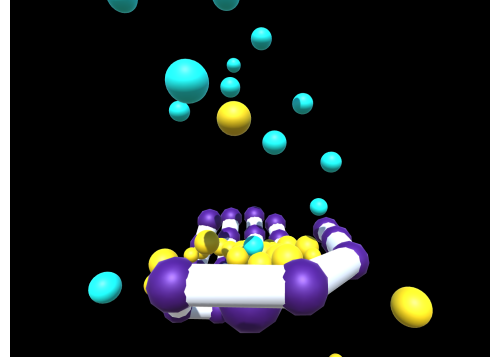


図 6: 物理シミュレーションの様子

Fig. 6 Physical simulation.

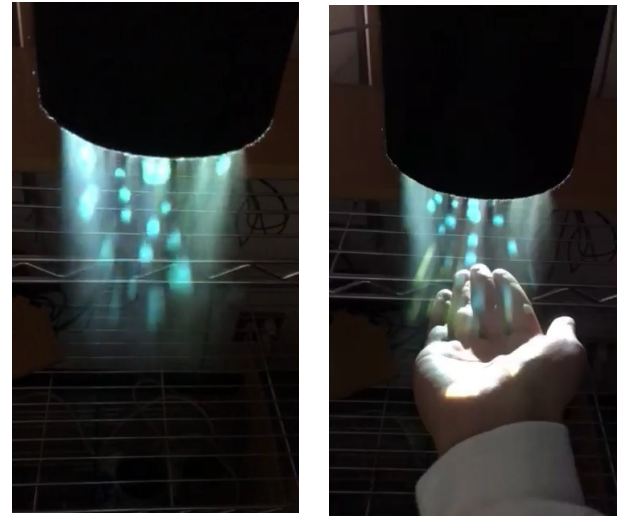


図 7: 「手で遮る」動作に対する映像の変化の様子

Fig. 7 Change of the projected image by shielding by hand.

られていない場合は、パーティクルが鉛直下向きに落下する映像が表示された。図 7(b) のように、鑑賞者がフォグの流れを「手で遮る」と落下するパーティクルが手の形状に合わせて跳ね返る・手の平に留まるといった動きを見せた。このとき、手を斜めに傾けると、落下するパーティクルは手の角度に応じた方向に跳ね返ることが確認された。

また、パーティクルが手に接触したことを視覚的に表すために、衝突判定が行われた際にパーティクルの色を変える演出を加えた。

4. 評価と考察

本節では、本研究の評価実験の結果と考察について述べる。

4.1 評価実験

本研究の評価のため、10 代から 20 代までの 10 人の被験者にアンケート調査を行った。アンケートは 1 点から 5 点までの 5 段階で採点する質問を 4 つ用意した他に、自由記述欄を設けた。質問項目を表 2 に、各項目の採点一覧を図

表 2: アンケートの質問項目
Table 2 Questionnaire Items.

問 1	霧に触ることで、映像に変化が起きていることを実感できたか.
問 2	投影される映像の変化は自分の手の形状の変化とよく合致していたか.
問 3	投影される映像の変化は霧の形状の変化とよく合致していたか.
問 4	本システムを、エンターテイメントとして楽しめたか.

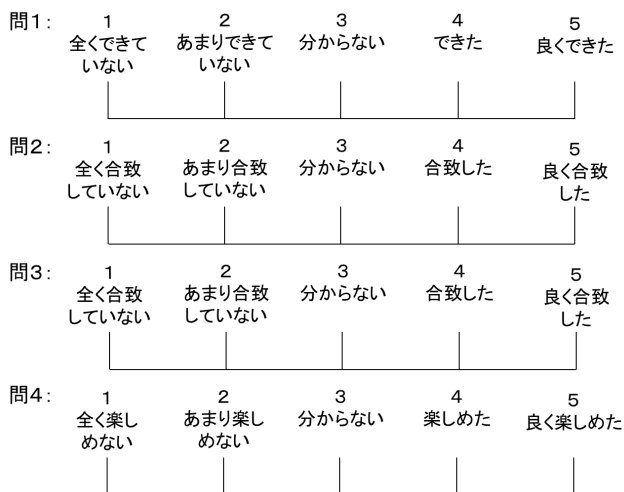


図 8: 採点項目一覧

Fig. 8 Marking items.

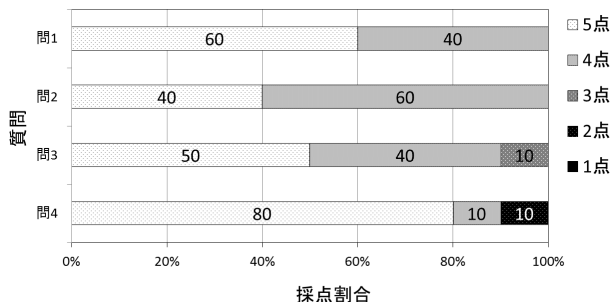


図 9: アンケート結果の採点割合

Fig. 9 Result of the questionnaire survey.

8に示す。この際、ポジティブな評価ほど5に近く、ネガティブな評価ほど1に近い。質問項目に対して適切な評価ができない場合は、3に回答する。

被験者には、事前にフォグディスプレイの簡単な説明を行い、装置の正面に立つよう指示をした。数分間の間、自由に手を差し入れて体験してもらった後、回答を依頼した。

4.2 結果

アンケート調査の結果を採点割合で表したものを図9に示す。

4.3 自由記述

質問項目と関連するものとして、「実際に触れて遊べるため、楽しかった」「手の動きや傾きに応じて映像も変化する様子が良く分かった」「直感的で分かりやすかった」というコメントが複数人から寄せられた。「手の認識がうまくいかないことがあった」「本来の霧の動きを再現しきれていないのではないか」という指摘もあった。

他には「霧に手を入れた際、プロジェクタの光を遮ってしまい、映像が見えなくなった」という、フォグディスプレイ特有の問題が体験者から指摘された。

4.4 考察

問1では、すべての体験者が「霧に触ったときの映像の変化を実感した」と回答した。問2でも同様に、すべての体験者が「映像の変化と自分の手の形状の変化が合致している」と回答した。また、「手の動きや傾きに応じて映像も変化する様子が良く分かった」というコメントが複数寄せられたことから、フォグディスプレイを「手で遮る」動作をしたときのインタラクションが実現できていると言える。

問3では、90%の体験者が「映像の変化と霧の形状の変化が合致している」と回答した。このことから、鑑賞者が霧に触れたときの流れの変化が映像に反映されるインタラクションが実現できていると言える。一方、「本来の霧の動きを再現しきれていないのではないか」という指摘もあり、霧の形状変化とそれに伴う映像の変化は、正確性に欠けているということも分かった。

問4では、90%の体験者が「本システムを楽しめた」と回答した。霧に実際に触れられることや直感的に映像が変化することが、ユーザ体験の向上に繋がっているものと考えられる。問4より、フォグディスプレイにおいて、霧の形状変化と提示される映像がより直感的に結びつくことはエンターテイメントとして重要な要素の一つであるということが言える。

評価実験を通して、本システムの問題だけではなく、従来のフォグディスプレイにも問題が残っていることが分かった。本研究のように「手で遮る」動作を行うとき、鑑賞者の手がプロジェクタの光を遮ってしまい、映像が見えなくなる。これに関しては、プロジェクタを斜め上に設置するなど、光源の位置を工夫することで解決が図れるのではないかと考える。

5. まとめ

本研究では、フォグディスプレイの霧の形状変化に応じて映像が自然に変化するインタラクションを実現するための基礎的検討として、鑑賞者が霧の流れを「手で遮る」動作について実装と検討を行った。具体的には、霧の形状変化を直接検出・推定するのではなく、鑑賞者の手の形状を検出し、落下するパーティクルとの衝突判定を行うこと

で、擬似的に霧の形状変化に適応した映像投影を実現した。アンケートによる評価実験より、多くの体験者が投影される映像の変化と霧の形状変化が自然に結びついていることを実感し、インタラクショナルを楽しむことができた分かった。

しかし、以下の点について問題が残っている。

- 手の認識精度が低下する場合がある。
- 霧の形状変化を正確に再現しきれていない。
- 鑑賞者の手以外による、霧の形状変化を認識できない。

1つ目の項目に関しては、手の検出に使用した Leap Motion に苦手な手の形状があるという点である。Leap Motion に対して手の平や手の甲が見えないように手を差し入れたとき、認識の精度が著しく落ちる。これは、Leap Motion の位置を変える、Leap Motion とコンピュータを複数台使用して死角をなくすといった方法が考えられる。

2つ目の項目に関しては、物理エンジンによって擬似的に霧の形状変化を再現しているため、実際の霧とパーティクルの動きが正確に一致しない点である。解決法としては、流体シミュレーションを導入して、より正確に霧の形状変化を再現する方法が考えられる。

3つ目の項目に関しては、鑑賞者の手以外の要因で霧の形状が変わった際に、その形状変化を映像に反映できていない点である。例えば、身近な道具を霧に差し入れる、うちわで扇ぐなどして霧の形状を変化させたとき、霧の形状変化を基にしたインタラクショナルを実現できていない。これは、画像処理などを用いて霧の形状変化を直接検出・推定する必要があると考える。しかし、霧の透過性の高さも相まって、霧の形状変化をリアルタイムかつ3次元的に検出・推定することは困難である。この点に関しては、風量のセンシングなどの画像処理以外の方法や、本研究とセンシングや画像処理との組み合わせによる方法を検討していきたい。

今後は画像処理や風量のセンシングなどによる霧の形状変化の検出手法を検討しつつ、本システムを拡張し、「手で遮る」以外のインタラクショナルも実現していきたい。

謝辞 本研究はJSPS科研費16K21580の助成を受けた。

参考文献

- [1] 米澤朋子, 安村通晃, 間瀬健二: *Tangible Sound: 流体を用いたインタラクショナルによる音表現とその拡張*, NICOGRAPH/MULTIMEDIA Paper Contest (2000).
- [2] 佐川俊介, 小川剛史: バブルディスプレイ: 水中の気泡を用いたインタラクティブ映像システム, 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ, Vol. 2, No. 1, pp. 16–23 (2014).
- [3] Rakkolainen, I., DiVerdi, S., Olwal, A., Candussi, N., Hiller, T., Laitinen, M., Piirto, M., and Palovuori, K.: *The Interactive FogScreen*, ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies (2005).
- [4] Yagi, A., Imura, M., Kuroda, Y., and Oshiro, O.: *360-*

degree fog projection interactive display, SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies (2011).

- [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).
- [6] 井村誠孝: 円筒型フォグスクリーンへのプロジェクションによる多視点表示, 光学, Vol. 43, No. 10, pp. 469–474 (2014).
- [7] Lam, M.-L., Huang, Y., and Chen, B.: *Interactive volumetric fog display*, SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies (2015).
- [8] 森裕司, 寺田泰晃, 山口恭平, 板井志郎, 三輪敬之: *Embodied fog display –霧の空間性を活用した共創表現の支援–*, 日本機械学会 2015 年度年次大会 設計工学・システム部門 ヒューマンインタフェース (2015).
- [9] 山口恭平, 森裕司, 板井志郎, 三輪敬之, 西洋子: 共創表現メディアに関する研究 –霧の空間性を活用した表現の場の創出支援–, 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2015 (2015).
- [10] 文奈美, 曾根順治, 夏井伸隆, 長谷部智宏, 吉田康一: *Pocket Cosmos*～手のひらに宇宙を～, 芸術科学会論文誌, Vol. 3, No. 4, pp. 244–249 (2004).
- [11] 石川優, 星野准一: 花水: 移動可能なフォグディスプレイによるバーチャル手持ち花火, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-GN-91, No. 72 (2011).
- [12] *Leap Motion*, <https://www.leapmotion.com/> (2016年12月21日参照).