

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

井村 誠 孝

Multi-Viewpoint Display by Projection onto Cylindrical Fog Screen

Masataka IMURA

We have been developing a novel fog display system that enables users to observe a virtual object from multiple viewpoints. The proposed display consists of one cylindrical fog screen and multiple surrounding projectors. Due to Mie scattering, which is strong forward scattering of light, users can see the image which comes from the frontal projector only. User's head movement around the cylindrical fog screen arises motion parallax that helps 3D recognition of a shape of the virtual object. This immaterial display has another advantage that the display enables direct touching operation to the virtual objects by users' hands. Consistency of visual and somatic sensation increases the reality of the virtual object.

Key words: immaterial display, fog, projection, Mie scattering, interaction

スクリーンの存在が認知されない、もしくは希薄に感じられる映像提示技術は、空間映像技術と総称されており¹⁾、空間に像そのものが浮遊して見えるような映像システムが、多様な原理に基づいて作成されている。

筆者らは2011年より、フォグ（霧）をスクリーンとして利用する空間映像提示技術の開発を行ってきた。開発するディスプレイ装置は、円筒型のフォグスクリーンに対して多方向から異なる視点の映像を投影することで、多視点観察を可能とする。本研究の着眼点は、フォグを構成する水滴が可視光に対して強い前方散乱を示す特性により、単一の円筒型フォグスクリーンに複数の方向から背面投影した映像が混合されることなく提示される点である。観察者は、フォグスクリーンの周囲を移動しながら、提示されたバーチャル物体を観測する。視点の移動によって物体の見え方が変化する運動視差により、複数の使用者で立体感を共有しながら作業をすることや、さまざまな方向からの対象の観察により三次元構造を確認しながら作業をすることが可能となる。また、スクリーンが固体でないことを利用し、フォグの中に手を差し込むことで、バーチャルな物体に対して、視覚および体性感覚から得られる距離感覚が一

致したインタラクションが実現される。

本稿では、多視点観察可能なフォグディスプレイの開発に関連する研究を紹介した上で、提案ディスプレイの原理と試作システムの構築、および手を用いたインタラクションについて述べる。

1. 関連研究

本章では、本研究で提案している多視点映像提示可能なフォグディスプレイに関連する研究分野について概観する。提案するディスプレイは、固体ではないスクリーンに映像を投影することによりあたかも空中に像が存在しているように知覚させる空間映像提示技術のひとつであり、その中でも特にフォグをスクリーンとして利用するディスプレイの系列に属している。また本研究では、対象物の観察方向に対応して異なる映像を提示することによって、三次元映像を実現している。特に円筒形のディスプレイを用いて観察者の見回しを可能としている従来の映像提示技術を紹介する。

1.1 空間提示型ディスプレイ

三次元映像提示技術として最も直接的な技術は、空間の

大阪大学大学院基礎工学研究科（〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3） E-mail: imura@bpe.es.osaka-u.ac.jp

任意の点に光源を配置する方法である。直接レーザーを用いて空間の任意の点の気体をイオン化して発光させることで、三次元物体を点群として空間に描くディスプレイが実現されている²⁾。一方で、三次元空間内を走査するスクリーンに対して映像を投影する、もしくは、面状あるいは線状の発光体により三次元空間内を走査することによって、空間内の任意の点に光源を置く空間走査型のディスプレイが、多数提案されている。空間を平面の並進運動により走査するディスプレイ³⁾や、平面の回転により走査するディスプレイ⁴⁾などが研究されており、平面ではなく水滴を利用する事例もある^{5,6)}。久米らによる混相流を用いた自由空間投影は、空間走査型のディスプレイをミスト流により形成している⁷⁾。

円筒形状の多視点型ディスプレイには、圓道らの See Linder⁸⁾、日立製作所の Transpost⁹⁾、ソニーの RayModeler¹⁰⁾ などがある。これらのディスプレイでは、視線方向に応じて異なる映像を提示することで、両眼視差と運動視差の両方の手掛かりによって立体感を与えることを実現している。

1.2 フォグへの映像提示

フォグをスクリーンとして使用する映像投影技術は Rakkolainen らによる研究が先駆的であり、実用化につながっている¹¹⁾。国内では早稲田大学三輪研究室から活発な研究成果が報告されている¹²⁾。またフォグスクリーンの安定した形状維持に関する研究¹³⁾や、フォグのもつ光の半透過性を利用して、複数のフォグディスプレイの配置の工夫により立体感を提示する研究¹⁴⁾も行われている。

2. 多視点観察可能なフォグディスプレイ

本章では、フォグによる光の散乱が指向性をもつことを利用し、円筒型のフォグスクリーンに対して複数の方向から映像を投影することによって、多視点観察可能なフォグディスプレイを実現する方法について述べる^{15,16)}。

2.1 フォグによる光の散乱

一般的にプロジェクター等によりスクリーンに投影された映像は、スクリーン面において等方的に散乱し、観察者の目に届く。多人数に同じ映像を提示するという目的においては、散乱が等方的であることが望ましい。一方で、立体感の提示において、両眼視差および運動視差のある映像提示を実現するためには、視点の位置に応じて提示される映像が異なることが必要である。

本研究で利用するフォグスクリーンは、微細な液滴によって構成されている。粒子による光の散乱の様式と度合いは、電磁波の波長と散乱させる粒子の大きさの大小関係によって変化する。波長に対して、散乱体の粒子径が十分

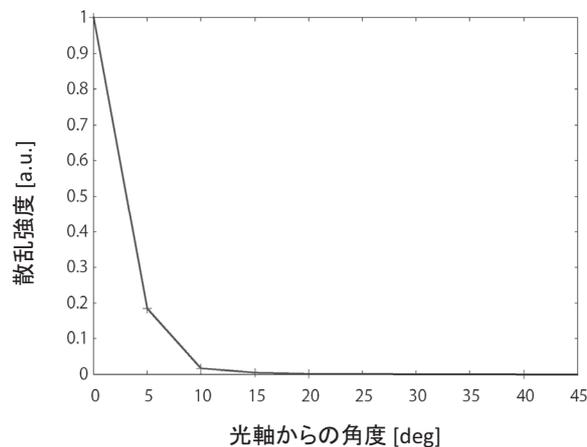


図1 フォグによる光散乱の角度依存性.

に小さいとレイリー散乱に、同程度からやや大きいとミー散乱となる。粒子径が十分に大きい場合は、粒子は散乱体とみなされず、粒子表面における光線の反射や屈折を幾何光学で取り扱うのが一般的となる。レイリー散乱は青空や夕焼けの原因、ミー散乱は雲が白い原因、幾何光学は太陽光の分光による虹の原因と、それぞれ気象現象と関連が深い。

本研究では、フォグを構成する水滴の直径は数 μm から十数 μm である。この水滴の特徴的長さは、可視光の波長(約 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$) よりも大きいため、散乱はミー散乱となる。ミー散乱は、散乱の波長依存性はレイリー散乱と比較すると弱い一方で、散乱特性は異方性を持ち、強い前方散乱を示す。ミー散乱の指向性は、マクスウェル方程式に基づいて、球体を通過する平面波の回折を計算することで理論的に求められる¹⁷⁾。

2.2 提案するフォグディスプレイの原理

フォグスクリーンが示す可視光に対するミー散乱の指向性により、プロジェクターによって映像を投影した場合、プロジェクターの真正面で最も鮮明な映像が観察でき、正面から離れると急速に映像が視認できなくなることがわかる。図1に、本研究で用いたフォグの指向性を計測した結果を示す。プロジェクターにより投影された輝点をさまざまな方向から観測した際の、光軸となす角度に依存した輝度の変化を、最大値を1に正規化して示している。

本研究では、円筒型に整形されたフォグに対し、周囲にプロジェクターを複数配置し、異なる角度から角度に応じた映像を投影することにより、見る位置に応じて異なる映像を観察可能とする(図2)。使用者はディスプレイの周囲からフォグに投影された映像を観察することで、運動視差から対象物の立体感を得ることができる。プロジェクターによってカバーされる角度範囲が広いほど、対象を観察で

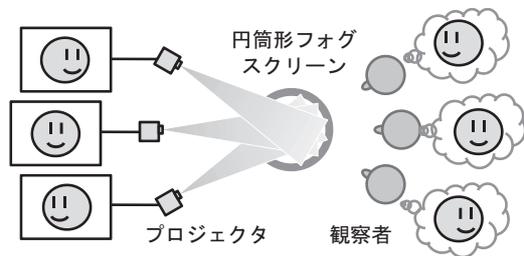


図2 提案するフォグディスプレイのコンセプト.

きる視点範囲も広がる。

観察者に単一のプロジェクターから投影される映像のみが提示され、かつ、視点を移動した際に連続的に映像が変化して見えるためには、隣り合うプロジェクターの光軸間の角度を適切に設定する必要がある。プロジェクターの配置はフォグスクリーンの光の散乱の角度依存性を調べることによって決定する。

2.3 円筒型フォグスクリーンの生成

フォグは水を霧化することで発生させる。映像投影に適した円筒型のフォグスクリーンを安定に形成するため、フォグを鉛直下向きのパイプに導き、送風ファンによって下方に向けて噴出する。

フォグの噴出口は多数の細いパイプを円環状に並べて構成し、円筒の中央部分はフォグが流出しないように塞ぐ。細いパイプによりフォグが整流されることで、噴出口直下の一定距離にわたる区間においては、安定した形状のスクリーンが形成される。

2.4 映像の投影

円筒型フォグスクリーンに対して周囲から複数のプロジェクターで投影した画像を、異なった視点から観察した際に、映像の連続性が保たれるためには、プロジェクターの位置と姿勢に基づいて映像を補正して投影する必要がある。

プロジェクターから投影される画像と、実空間で像を結ぶ画像を結びつける際には、プロジェクターパラメーターを事前にキャリブレーションによって求めておく。プロジェクターパラメーターは、外部パラメーターと内部パラメーターから構成され、外部パラメーターはオブジェクト座標系でのプロジェクターの位置、内部パラメーターはプロジェクターの画角などを表す。画像平面上における特徴点の座標が既知の画像を、三次元位置が既知の物体に投影することで、画像座標系からオブジェクト座標系への変換行列を求め、得られたプロジェクターパラメーターを成分とする行列を内部パラメーターからなる行列と外部パラメーターからなる行列に分解して、補正に必要な情報を得る。

キャリブレーションに基づいて、実プロジェクターから投影する画像を生成する手順を以下に示す。

1. バーチャル空間において、理想的な位置に置かれたバーチャルプロジェクターの位置に、バーチャルカメラを配置して、CG像をレンダリングする。
2. 1で得られた画像を、バーチャルなフォグスクリーンの円筒表面に、テクスチャーとしてマッピングする。マッピングするテクスチャー座標は、バーチャルプロジェクターに正対する位置の視点からひずみなく画像が見えるように設定する。
3. 実プロジェクターのプロジェクターパラメーターと同一のカメラパラメーターをもつバーチャルカメラから、テクスチャーがマッピングされたバーチャルなフォグスクリーンを見た画像をレンダリングする。
4. 3で得られた画像を、実プロジェクターから投影する。

2.5 バーチャル物体とのインタラクション

フォグスクリーンは固体ではないため、手を直接伸ばして対象に触れることができるという特徴がある。バーチャルな対象物に観察者が手で触った際に、映像を適切に反応させるために、カメラにより指の位置計測を行う。フォグスクリーンに投影されている映像の影響を排除するために、赤外光を用いたセンシングを行う。

フォグスクリーンを形成するためのパイプに赤外LEDリングライトおよび赤外透過フィルターを装着したカメラを設置する。ライトおよびカメラの向きは鉛直下向きである。観察者が手をさしのべると、手で赤外光が反射され、カメラには手だけが鮮明に映る。撮像された画像を適当な閾値により二値化した後、連結領域のラベリングを行い、最大面積の領域を手と認識する。

3. 試作したディスプレイ装置と映像提示結果

本章では、提案手法に基づいて作成した試作システムの概要と、映像を提示した結果について述べる。

3.1 試作システム構成

試作システムの外観を図3に示す。

フォグの発生には超音波振動子を用いる。フォグの流路はアクリルパイプおよび塩ビパイプで構成されており、生成されるフォグスクリーンの直径は約80mmである。フォグは加湿器からパイプによって導かれ、鉛直下向きの流れを作り出すファンにより加速させられた後、ノズルから下方に噴出する。噴出部には直径約5mm、長さ約50mmの細いパイプを二列の同心円状に約70本配置する。

映像の投影には、LED光源プロジェクター400-PRJ014

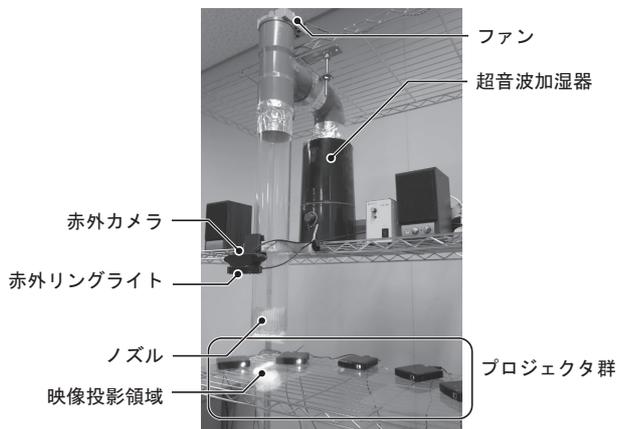


図3 試作フォグディスプレイシステム。

BK (サンワダイレクト製) を5台使用する。投影する複数映像の生成と同期は、2枚のグラフィクスボードを搭載した1台のLinux PCに5台のプロジェクターを接続することで実現する。

カメラは一般的なUSBカメラであるC910 (ロジクール製) に、赤外透過フィルターとしてカットオフ波長が820 μm であるIR-82 (富士フィルム製) を取り付けて使用する。

3.2 多視点画像の投影結果

プロジェクターの配置は、プロジェクターから投影された映像について、散乱光強度の角度依存性を計測する実験を行った結果に基づき、隣り合うプロジェクターの光軸間の角度を20度として配置する。

プロジェクターパラメーターは、一辺50mmの立方体をキャリブレーション用物体として円筒型スクリーンの中央に置き、プロジェクターから格子模様を投影し、格子点が投影された実空間の位置を調べることにより求める。

5台のプロジェクターから、図4(a)に示すおのおの異なる視点からの画像を投影した。単一のプロジェクターから図4(a)中央に示す画像を投影した場合の、プロジェクター正面に対して -40 度、 -20 度、 0 度、 20 度、 40 度の位置からフォグスクリーンを見た場合に観察される像を図4(b)に示す。フォグのもつ前方散乱特性により、プロジェクターの正面以外の視点では、観察される映像は光の強度が弱く、不明瞭であり、提案手法の意図通りに映像を指向性をもたせたまま提示できていることがわかる。5台のプロジェクターからそれぞれ図4(a)に示す画像を投影した場合の、同じ位置における結果を図4(c)に示す。各視点では、隣り合うプロジェクターから投影された映像が混合せず、視点の移動に応じて異なる角度からバーチャル物体を見ているかのような映像が提示できていることが確認された。像のぼけは、近傍画素からのフォグによる散乱光が影響を与えるためである。

プロジェクターの間では両方の映像が等しい重みで混合する。プロジェクターのちょうど中間になる -10 度の位置から観測した例を図5に示す。

物体を水平に近い視線で観察した場合と、俯瞰して観察した場合の違いを図6に示す。俯瞰の場合、プロジェクターの光軸から離れることになるため、映像の強度が弱く

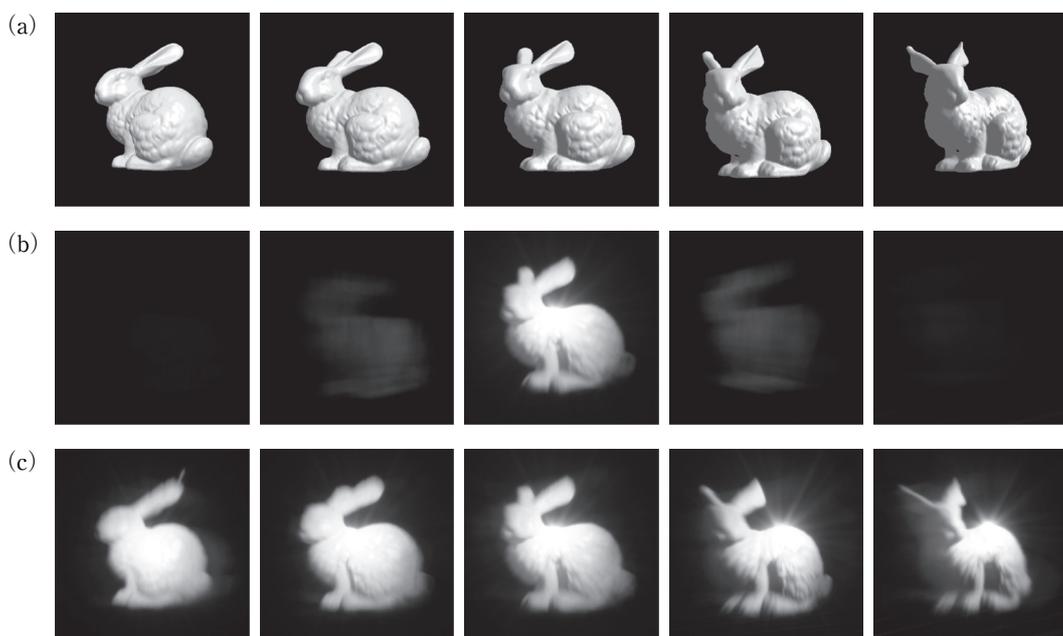


図4 多視点投影結果。(a) 投影元画像、(b) 投影結果 (中央のみ)、(c) 投影結果 (全プロジェクター)。

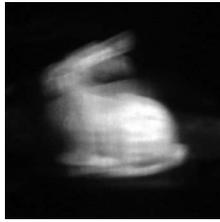


図5 プロジェクターの中間から観測した例.

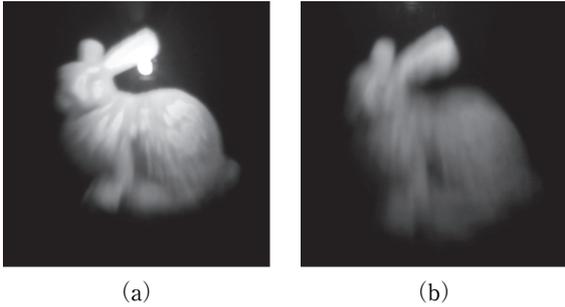


図6 視線方向による見え方の違い. (a) 水平, (b) 俯瞰.

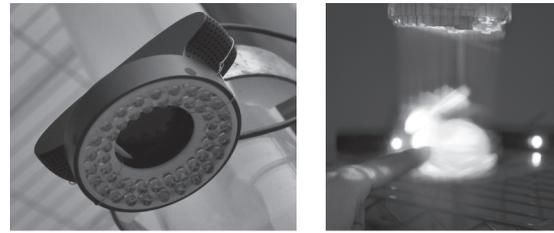
なることがみてとれる.

3.3 手によるインタラクション

赤外LEDリングライトと赤外透過フィルターを装着したカメラの外観を図7 (a) に、フォグに観察者が人差し指を差し入れた様子を図7 (b) に示す. 赤外カメラで取得される画像は図8 (a) のようになり、手領域を抽出し、画像y座標が最も小さい点を指先(○印)として検出した結果は図8 (b) となる. 本試作システムでは、特にウサギを提示している際に、触られて飛び跳ねる、手の移動に応じて回転する、といった反応を実装して、映像に変化を与える.

手をさしのべることでウサギが反応することは、体験者には驚きを与え、他の反応はないか探るなど、能動的にバーチャルな像と接する姿がみられた.

本稿では、フォグによる可視光の散乱が指向性をもつミー散乱であることに着目し、複数のプロジェクターによって単一の円筒型フォグスクリーンに異なる映像を投影することにより、観察者の位置に応じた多視点映像を提示可能なフォグディスプレイについて紹介した. 構築した試作システムは、空間中に提示されたバーチャルな物体を、多視点から観察することを実現した. 今後の課題として、水滴サイズの制御による指向性の制御、より多視点からの観察が可能なシステムの構築などが挙げられる. また、より大きなフォグスクリーンの構築により、トレイグジスタンスや可視化へと応用可能な範囲が広がることが期待される.



(a) (b)

図7 指によるバーチャル物体とのインタラクション. (a) 赤外ライトとカメラ, (b) 指による操作.



(a) (b)

図8 赤外面像処理による指先検出. (a) 元画像, (b) 指先の認識.

文 献

- 1) 石川 洵：“空間映像による映像と現実世界の融合”，立体視テクノロジー (NTS, 東京, 2008) pp. 391-398.
- 2) H. Kimura, A. Asano, I. Fujishiro, A. Nakatani and H. Watanabe: “True 3D display,” *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies* (2011) Article No. 20.
- 3) K. Kameyama, K. Ohtomi and Y. Fukui: “A virtual reality system using a volume scanning 3D display,” *Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence* (1992) pp. 49-62.
- 4) G. E. Favalora, J. Napoli, D. M. Hall, R. K. Dorval, M. G. Giovinco, M. J. Richmond and W. S. Chun: “100 million-voxel volumetric display,” *Proceedings of 16th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls* (2002) pp. 300-312.
- 5) S. Eitoku, T. Tanikawa, Y. Suzuki, K. Hirota, T. Iwai and M. Hirose: “Display composed of water drops for filling space with materialized virtual three-dimensional objects,” *Virtual Reality Conference* (2006) pp. 159-166.
- 6) P. C. Barnum, S. G. Narasimhan and T. Kanade: “A multi-layered display with water drops,” *ACM SIGGRAPH 2010 Papers* (2010) Article No. 76.
- 7) 久米祐一郎, 鈴木和哉：“混相流を用いた自由空間投影法の検討”，映像情報メディア学会誌, **56** (2002) 867-871.
- 8) T. Yendo, N. Kawakami and S. Tachi: “Seelinder: The cylindrical lightfield display,” *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies* (2005) Article No. 16.
- 9) R. Otsuka, T. Hoshino and Y. Horry: “Transpost: A novel approach to the display and transmission of 360 degrees-viewable 3D solid images,” *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, **12** (2006) 178-185.
- 10) K. Ito, H. Kikuchi, H. Sakurai, I. Kobayashi, H. Yasunaga, H. Mori, K. Tokuyama, H. Ishikawa, K. Hayasaka and H. Yanagisawa: “360-degree autostereoscopic display,” *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies* (2010) Article No. 1.

- 11) I. Rakkolainen, S. DiVerdi, A. Olwal, N. Candussi, T. Höllerer, M. Laitinen, M. Piirto and K. Palovuori: "The interactive fogscreen," *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies* (2005) Article No. 8.
- 12) 山口慶二郎, 遠藤祐二, 住友 翔, 三輪敬之: "霧を用いた表現メディア空間の設計と遊び場への活用", *ヒューマンインタフェースシンポジウム 2012 論文集* (2012) pp. 755-758.
- 13) 甲谷佑太, 宝地戸俊介, 野口幹容, 高野邦彦: "ホログラフィ立体テレビシステムの開発", *電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会* (2008) p. 197.
- 14) C. Lee, S. DiVerdi and T. Höllerer: "Depth-fused 3D imagery on an immaterial display," *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, **15** (2009) 20-33.
- 15) A. Yagi, M. Imura, Y. Kuroda and O. Oshiro: "360-degree fog projection interactive display," *SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies* (2011) Article No. 19.
- 16) 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*, **17** (2012) 409-417.
- 17) J. A. Stratton: *Electromagnetic Theory*, Chapter 9 (McGraw-Hill, New York, 1941) pp. 563-567.

(2014年5月26日受理)