

渦輪ディスプレイの提案

徳田 雄 嵩^{†1} 西村 邦 裕^{†2} 鈴木 康 広^{†1}
谷川 智 洋^{†2} 廣瀬 通 孝^{†2}

近年高い臨場感と存在感のある映像を実空間中に提示することを目的とした空間表示型ディスプレイが数多く研究・開発されてきている。しかしながら、そのほとんどの映像表現は2次元ディスプレイ平面上またはそれを覗き込んだ先に広がる空間上に限られており、観察しているユーザ側に文字どおり映像が迫ってくるといった飛び出し効果に特化したディスプレイの研究・開発はなされていなかった。さらに、近年では視覚や聴覚だけでなく、嗅覚や触覚といった五感に訴えることのできるディスプレイの研究・開発がますます注目を浴びてきている。そこで私たちは、渦輪（うずわ）と呼ばれる高い粒子輸送能力を持つ流体の渦に注目し、霧などの光散乱性粒子、香り粒子、熱粒子、刺激粒子といった様々な微粒子を1つの流体として輸送することで、粒子型プロジェクションスクリーンを生成し、従来の空間表示型ディスプレイには不足していた、ユーザ側に飛び出してくる臨場感ある映像効果と五感に訴えるマルチモーダルな演出効果を補える空間表示型ディスプレイとして渦輪ディスプレイを提案している。本稿では、その初期実験として霧粒子のみを含ませた渦輪にプロジェクタから映像を投影したときの見やすさ、視野角、連続性、表示範囲、その他明らかとなった諸問題について検証する。

A Proposal for a Vortex Ring Display

YUTAKA TOKUDA,^{†1} KUNIHIRO NISHIMURA,^{†2}
YASUHIRO SUZUKI,^{†1} TOMOHIRO TANIKAWA^{†2}
and MICHITAKA HIROSE^{†2}

These days, there have been many studies and developments on so-called mid-air displays that can display quite realistic virtual images in the real world without imposing any special apparatus on the users. However, most of the conventional mid-air displays limit their image effects to either the two dimensional display surfaces or the spaces inside of the displays. Therefore, there have been few research and development focused on pop-out image effects toward the user-side space. Furthermore, more people have paid greater attentions to research and development on five senses display, which can ap-

peal to not only visual and audio senses but also olfactory and haptic senses in recent days. Thus, we propose a new type of mid-air display named vortex ring display, which can not only compensate for the shortcoming of pop-out image effects but also support five senses appealing multimodal image effects by taking advantage of the vortex's superior particle transport ability in order to make particle-based projection screens made of light scattering particles, olfactory particles, heat particles, stimulus particles, etc. In this paper, we verify the visibility, continuity, viewing angles, and other basic problems through our early experiments based on two prototypes that can project only fog-based projection screen.

1. はじめに

近年、現実世界を仮想世界の電子的なデータで増強する Augmented Reality (AR) に関する研究・開発が大きな注目を浴びている^{1)–4)}。その大きな理由としてヘッドマウントディスプレイ (HMD) やカメラなどの高価な専用デバイスやツールを用いてのみ可能であった AR の体験が液晶ディスプレイ, ARToolkit, USB カメラなど一般の人でも安価に手に入る資材によって容易に味わうことができるようになった背景があげられる。最近では、iPhone や Android 携帯などのスマートフォンと呼ばれる携帯アプリから Playstation 3 や Wii などの家庭用ゲーム機にまで AR 関連のアプリが普及しはじめ、その人気は衰えることを知らない。また時期を同じくして、電車の車内、駅構内、デパート、その他様々な公共空間で見かけるようになった電子看板・掲示板などのデジタルサイネージが新たな映像や広告媒体としてコンテンツやメディア業界を中心に大きな注目を浴びている。その市場規模は 2008 年度において 560 億円規模、2015 年には 1 兆円を突破すると予想されている⁵⁾。AR アプリとデジタルサイネージ、両者とともに求められる要素技術として、より高い臨場感と存在感があり、しかもユーザがなるべく自然体で楽しめるような立体映像ディスプレイまたは実空間中に映像を提示できるような空間表示型ディスプレイへの需要がますます高まってきている。そこで多くの大学や研究機関そして企業によって様々なタイプの次世代ディスプレイが競い合うように研究・開発されてきている。また視覚や聴覚に限らず、嗅覚や触覚といった他の感覚にも同時に訴えることのできる新規性の高いディスプレイの研究・開発も注目を

^{†1} 東京大学 RCAST
RCAST, The University of Tokyo

^{†2} 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

浴びている⁶⁾。しかしながら、従来の立体映像ディスプレイや空間表示型ディスプレイの多くは2次元ディスプレイ平面上やディスプレイの奥に広がる仮想空間内でのみ映像表現を可能としており、文字どおりディスプレイ空間から観察者のいる実空間に向けて映像を飛ばすことで、観察者がより高い臨場感を感じながら、自然にその映像を触ったり、匂いを感じたり、風圧を感じたり、温度を感じたり、痛みを感じたりするなどの、より存在感のあるインタラクティブな映像効果を演出できるレベルにまでは至っていない。両眼視差を使ったディスプレイであれば確かに映像の飛び出し効果はある程度演出できるが、その奥行き感覚は不自然であり、飛び出す距離も限られるうえ、実際に触れたときに匂い、風圧、熱さ、刺激などといったその映像に関連した物理効果を演出することまでは考慮されていないのが現状である。

そこで我々は高い飛び出し効果とマルチモーダルな物理的効果の演出といった新しい映像表現に特化した空間表示型ディスプレイとして、渦輪ディスプレイを提案する。渦輪(うずわ)はその独特な渦の回転の動きにより安定したドーナツ形状または球状の形態と速度を保ちつつ、内部に含んだ微粒子をその進行方向に輸送することができる。我々が提案する渦輪ディスプレイとは、この渦輪に光散乱性粒子、匂い粒子、熱粒子、刺激粒子などの様々な微粒子を輸送させることによって、粒子型プロジェクションスクリーンを生成し、プロジェクタからそのスクリーンに向かって映像を投影することによって物理特性をともなった映像を文字どおり観察者に向けて飛ばすことが可能な空間表示型ディスプレイを意味する。図1にその概念図を示す。このディスプレイの目指すところは、従来のディスプレイと同期させることによって、これらの新たな表現手段を補完または拡張するところにある。たとえば、ファンタジーやアクション映画などにおけるセンセーショナルなシーンと同期させることによって、画面から炎や水しぶきまたは爆風などといった物理的効果が要求される特殊効果から観察者に向かって飛んでくる妖精、蝶、銃弾などといった高い飛び出し効果が求められるコンテンツに至るまで、よりリアルな映像表現をユーザに体験してもらうことなどが考えられる。また舞台演出やライブといったイベントにおける従来の特殊空間演出はレーザーによって空中に光の線を描く程度であったが、我々が提案する渦輪ディスプレイによって、歌詞、セリフ、観客からの応援メッセージなどを漫画における吹き出しのような形で可視化することなどより多彩な空間演出が可能になると考えている。そこで、本研究では、その初期実験として、霧粒子などの光散乱性粒子のみを渦輪に含ませたフォグプロジェクションスクリーンを生成することで、プロジェクタから投影されたときのその映像の見やすさ、視野角、連続性、表示範囲、その他明らかとなった諸問題についての検証を行った。

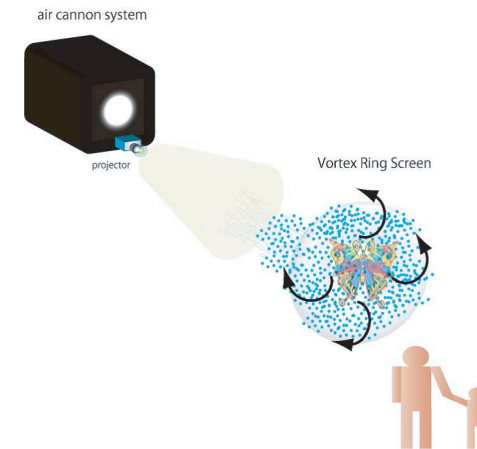


図1 提案システムの概要

Fig.1 Conceptual image of the proposed system.

2. 従来研究

2.1 空間表示型ディスプレイ

あたかも何もない実空間中に映像を投影する空間表示型ディスプレイの研究・開発の試みは大学から企業まで様々な研究機関で数百年前からなされてきた。たとえば1863年にはすでに、当時のRoyal Polytechnic(現在のUniversity of Westminster)に在籍していたJohn Henry Pepper教授がDircks氏の舞台に幽霊を出現させるというコンセプトで、半透明ミラーとレンズを使って舞台の下に隠れている人をプロジェクタで照らし、舞台上に隠された半透明ミラーに映し出すことで、あたかも舞台に本当に幽霊が存在するような映像表現に成功していた⁷⁾。この技術はPepper's ghostと呼ばれており、現在においてもこのような半透明ミラーや特殊ガラスを応用・発展させた空間表示型ディスプレイが舞台演出やデジタルサイネージなどの用途で使われている^{8),9)}。また一方で、高速で回転している鏡の方向や位置に同期させた映像をDMDプロジェクタによって高速に切り替えて投影することにより任意の方向に指向性のある高解像度な立体映像を映し出すことのできる空間表示型ディスプレイなども開発されている¹⁰⁾。

これら固体媒体を用いたものとは対照的に霧を用いることでスペースをとることなく、人

がスクリーンの映像を通過したり、触れたりできるなどの新奇なインタラクティブ性のある映像表現を可能にした空間表示型ディスプレイが開発されている。たとえば、IO2 社が開発した Heliodisplay は、垂直方向に安定した霧の平面を生成するために、霧をエアカーテンによってサンドイッチにした 3 層からなるスクリーンを構築することによって高解像度な霧スクリーンを作り出し、一般の LCD ディスプレイと同等の水平 150 度の視野角を実現している¹¹⁾。FogScreen 社も同様に整流化された大型の霧スクリーンからなる FogScreen を開発しており、新たなデジタルサイネージディスプレイとして売り出されている¹²⁾。これら霧を用いた空間表示型ディスプレイは固体型のものに比べるとより実空間に溶け込んでインタラクティブな映像表現を可能にした。しかしながら、これらも従来のディスプレイと同様、固定 2 次元平面における連続的な映像演出には向いているが、観察者の体に霧の映像や匂いを衝突させるほどの飛び出し効果までは表現できていない。

また、最近ではフェムトセカンドレーザと高速 3 次元スキャニングシステムを組み合わせることで、正確にレーザ光を空間中の任意の位置に集めて瞬間的に大気中に存在する任意の分子を励起、プラズマ発光させることで空気以外の何も存在しない空間に、ドットからなる 3 次元映像を描画することができる空間表示型ディスプレイも開発されている¹³⁾。これにより、ディスプレイにおける 2 次元固定スクリーンの限界を打ち破り、任意の領域に映像を描画することが可能であることが示唆されたわけである。しかしながら、3 次元スキャニングの速度制限上、現在のところ描画できるのは一筆書きできる文字や図形に限られてしまい、またフルカラー化への改良の方式も見出されていない。またプラズマ発光という高エネルギー状態を作っているために、周囲に高濃度のオゾンが発生する、発光している点に触れると火傷するなどといったインタラクティブ性においてもいくつかの問題点が残っている。

このように従来の空間表示型ディスプレイでは、飛び出し効果と匂いや熱そして風圧といった物理効果を同時に表現することまでは考慮されていない。我々は、渦輪ディスプレイを提案することで、今まで注目されていなかったこれらの新たな映像表現を開拓していこうと考えている。次節では、渦輪と渦輪を応用した関連研究を紹介する。

2.2 渦輪

渦輪（うずわ）とは、よく理科学実験で見られるような、ダンボール箱に穴を開けて作られる空気砲に煙などを蓄えた状態で、その側面を両手で叩くと打ち出される、ドーナツ状の流体の塊のことである。これは開口からの流体の排出や、物体の突然の運動、または流体中での密度や温度の差などが生じたときには図 2 に示すように境界層の渦度（ ω ）が不連続面が発生し、これが巻き上がって中心から外部に対称的に巻いてできるようなドーナツ状の

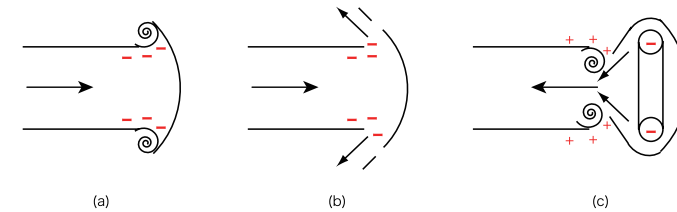


図 2 渦輪の発生の様子¹⁴⁾

Fig. 2 Conceptual image of vortex ring formation.

渦群に成長する。このとき、内部に流体を含有しながら単体として空中に離脱することによって渦輪が発生する^{14),15)}。

渦輪は、この中心を通過して外へ巻き出るといった一定の渦の流れ（循環）によって、優れた安定性と輸送能力を兼ね備えており、内部に粒子を含んだ状態で長距離を一定の速度で直進するという特長を持っている。この特長に着目した名城大の柳田らは、香りの素となる微粒子を含ませた渦輪を、カメラによって追跡した個々のユーザの鼻元に打ち出すことで、香りを局所的に提示できる香りプロジェクタの研究・開発を行っている¹⁶⁾。そこで我々は香り粒子以外にも光散乱性微粒子や熱粒子など様々な微粒子を含ませた状態で渦輪を放出すれば、高い飛び出し効果と関連する物理特性をともなった映像表現が可能な粒子型プロジェクションスクリーンが生成できるのではないかと考えた。

次章では、提案する渦輪ディスプレイのプロジェクションスクリーンとしての実用性と問題点について、簡単な試作機を使った予備実験を通して明らかにする。

3. 予備実験

3.1 実験目的と内容

提案する渦輪ディスプレイの実現性と問題点を検証するために図 3 に示すような、簡易式プロトタイプを試作した。構成は、1,000 ルーメン PLUS 社の DLP プロジェクタ、描画用 PC、開口径 30 cm、60 cm 角ダンボールからなる空気砲、そして霧発生用の超音波加湿器となっている。本予備実験の狙いは主に

- (1) 明るい環境における仮想物体の視認性
- (2) 渦輪スクリーンの視野角
- (3) 渦輪スクリーンのその他の問題点

の 3 点を検証することである。渦輪スクリーンに映った映像の様子を見るために、Full HD



図 3 予備実験用プロトタイプシステム
Fig. 3 Prototype system for preliminary experiment.

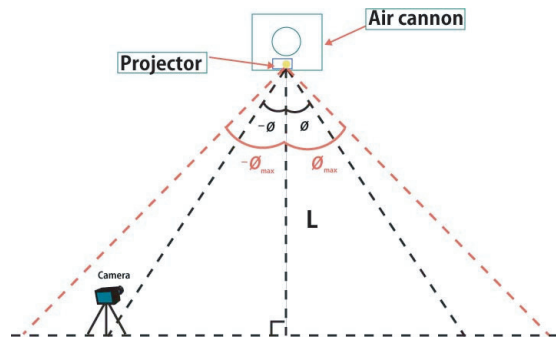


図 4 カメラ配置
Fig. 4 Camera position.

対応の SONY HDR-HCT カメラを、図 4 に示すように渦輪ディスプレイから距離 $L = 4\text{ m}$ 離れた正面の位置に設置して撮影した。視野角の検証実験では、カメラを基準点から左右それぞれに 5 度ずつ離していきながら撮影を行った。なお、実験ではシンプルにアルファベットの文字 “S” だけを投影することで、その視認性を検証することにした。



図 5 175 [lux] 照明下における視認性
Fig. 5 Visibility under 175 [lux] lighting condition.

3.2 実験結果

3.2.1 明るい環境における視認性

照明下 175 [lux] における結果を図 5 に示す。この結果から分かるように 175 [lux] 程度の明るさであれば渦輪ディスプレイがはっきりと映像を映し出せる。また、このとき渦輪スクリーンに映し出された文字 “S” が平均速度 90 (cm/s) の速さで平均 4 m の距離を直進する様子が見え、その高い飛び出し効果とスクリーンとしての安定性を確認することができた。

3.2.2 渦輪スクリーンの視野角

異なる視野角における結果を図 6 に示す。この結果から、中心線上では文字 “S” がはっきりと見えていたが、左右に離れていくと、不明瞭さと、明るさの急激な減少が目立つ。この理由として今回用いた霧粒子の平均粒子径が $5\ \mu\text{m}$ であるために、図 7 のようなミー散乱を起こしていることが考えられる¹⁷⁾。つまりミー散乱粒子においてはその散乱角は狭く、ほとんどの光がその進行方向のまま直進していくために、プロジェクタからの光軸方向の範囲内でのみ明るくははっきりとした映像が結像される。よって、渦輪ディスプレイの第 1 の欠点としてこの視野角の狭さが明らかとなった。

3.2.3 渦輪スクリーンのその他の問題点

渦輪スクリーンにおけるその他の問題点として、図 9 に示されるような渦輪の尾に (図 8) プロジェクタからの映像が投影されることによって生じる多重像の問題があげられる。このような渦輪スクリーンの後に生じる尾は、特に渦輪を打ち出すときの速さが大きすぎたり、

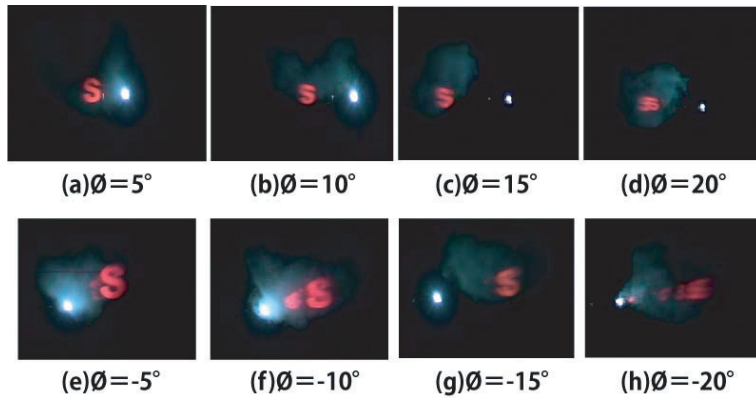


図 6 視野角
Fig. 6 Viewing angle.

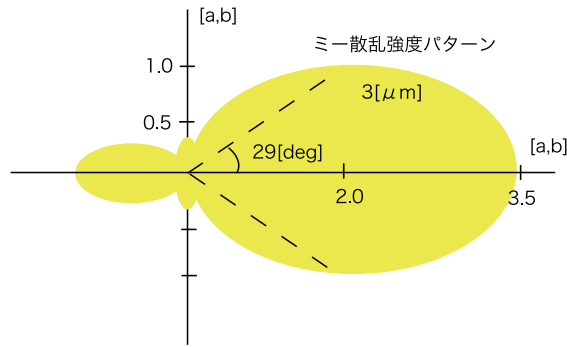


図 7 ミー散乱光分布¹⁷⁾
Fig. 7 Light intensity distribution of Mie Scattering.



図 8 渦輪に生じる尾
Fig. 8 Tails of vortex ring.



図 9 尾に映し出される多重像
Fig. 9 Multiple images on the vortex tails.

渦輪に含める霧粒子の量が多すぎたりしたときに生じてしまう．なるべく尾の生じない綺麗な層流渦輪を形成させるために渦輪生成時における押し出す速さやストロークの量または渦輪の大きさに関わる空気砲の口径などいくつかのパラメータの最適化を図る必要がある．そこで次に、これらのパラメータを調節できる自動空気砲を開発することで、最も綺麗な渦輪スクリーンを安定して生成できるパラメータ条件の検証実験を行った．

4. 最適な渦輪スクリーン形成におけるパラメータ検証

4.1 渦輪ディスプレイ試作機 2 号の構成

本試作機の構成と外観を図 10、図 11 に示す．空気砲のアクチュエータに IAI 社のロボットシリンダを導入し、制御用 PC によってシリアル通信で渦輪を打ち出す速度やストロークが調節できるように構成されている．システムの流れは次のようになっている．

- (1) 超音波加湿器が設置された霧発生室からファンによって上部の空気砲チャンバーに

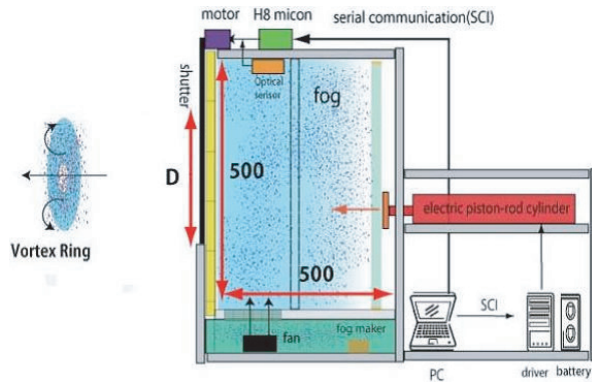


図 10 渦輪ディスプレイ試作機 2 号の構成図

Fig. 10 Schematic of 2nd prototype of vortex ring display.

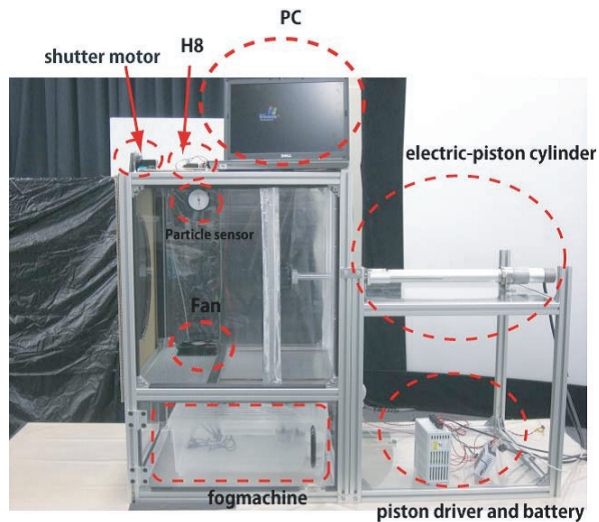


図 11 渦輪ディスプレイ試作機 2 号

Fig. 11 Image of 2nd prototype of vortex ring display.

10 秒間霧を充填

- (2) 霧が充填された後、制御用 PC によって設定された条件でロボットシリンダを駆動
- (3) 渦輪スクリーンが放出された後、グラフィック描画用 PC によって生成された映像をプロジェクタで投影
- (4) 上記 3 つの工程をループ

4.2 渦輪の性質と安定性に関わるパラメータ

4.2.1 Formation Number

渦輪は、生成されてからいくつかの局面を経て発達していき最後に崩壊する．具体的には、生成段階、層流段階、転移段階、そして乱流段階の 4 つの段階がある．これらの 4 つの段階をすべて経るかどうかは渦輪の生成過程において、特にある自己誘起速度でもってノズルなどの開口から渦輪が最大径を得て飛び出す瞬間の条件によって決定される¹⁴⁾．この最大径は、渦輪生成機構がピストンとシリンダから構成される場合、渦輪が放出されるまでにピストンが移動した距離または押し出された流体の長さ L とそのピストンまたはシリンダの径 D の比によって表された、 L/D によって決まり、これを formation time (Ft) と呼ぶ¹⁵⁾．つまりピストンがどの段階で停止するかによって、渦輪の最大径が決まり、最後に渦輪に含まれる流体の量が定まる．渦輪の開口形によってその大きさや飛距離が異なるとの研究報告もある¹⁸⁾．また、渦輪が最大の循環値を持ち、渦輪が内部に最大限の流体を含んだ状態、つまり“最適渦輪”を定める formation time のことを特に formation number (以降より F_n) と呼ぶ．

4.2.2 Reynolds Number

もう 1 つの重要なパラメータとしてレイノルズ数 (Re) があげられる．流体現象が粘性と慣性のみで支配される場合は、その流れが乱流であるか層流であるかといった性質がこのパラメータに依存し、特にその境界値を臨界レイノルズ数と呼ぶ．一般的に円管内の流れの場合 (ポアズユ流れ) の場合は、2,300 を超えると乱流になるといわれているが、渦輪の場合は、その臨界レイノルズ数がその他のパラメータなどによって任意に変化するため、定まった値が存在しない．

4.3 パラメータ設定実験

無次元のレイノルズ数が渦輪の速度と空気砲の開口径に依存し、無次元の formation number がピストン押し出し時に排出された流体の長さ、つまりは流体の速さとピストンが所定の位置に停止するまでの吐出時間との積と開口径によって決まることから、今回の実験では、開口径とピストンの速度を変えていくことで、レイノルズ数と formation number の調

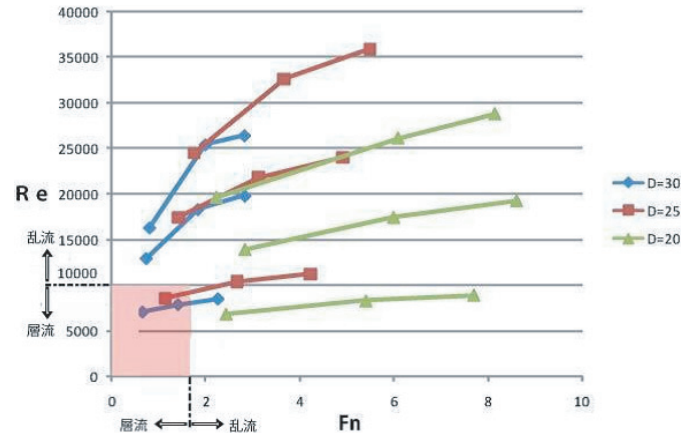


図 12 最適なパラメータ領域
Fig. 12 Optimal parameter region.

整を行い、渦輪の振舞いについて考察していくことにした。また、渦輪に映像を投影することで、それらのパラメータと渦輪スクリーンの質との関連性について調べることにした。開口径は、空気砲のサイズの半分の大きさである 25 cm を基準に 20 cm と 30 cm の 3 通りの大きさで試すことにした。これらの範囲を選んだ理由としては、以前に空気砲の大きさの 70% のサイズの開口径で実験してみたが、渦輪がまったく生成されず、その 60% のサイズである 30 cm 以降から安定して渦輪を生成できたからである。さらに、コンパクトなディスプレイからできる限り大きな渦輪を生成できる条件を明らかにすることが今回の実験におけるもう 1 つの目的であるため、空気砲のサイズの 40% つまり 20 cm 以下の開口径を試す理由が特になかったからである。

一方、formation time の値は 1 前後から最大で 4 前後までが渦輪実験において最適と報告されており¹⁹⁾、また Glezer らの結果²⁰⁾ から、7,500 ~ 24,000 の間に臨界レイノルズ数が存在すると報告されている。よってこれらの範囲で検証するためにピストン速度を 60, 40, 20 (cm/s)、ストロークを 5, 10, 15 (cm)、開口径を 20, 25, 30 (cm) と変えながらトータルで 27 パターンの実験を試行した。その結果を次に示す。

4.4 実験結果

結果は図 12 に示すように非常に限られた範囲でのみ綺麗な層流の渦輪が発生できることが明らかとなった。今回の実験では $D = 20$ (cm) の場合には検証できなかったが、

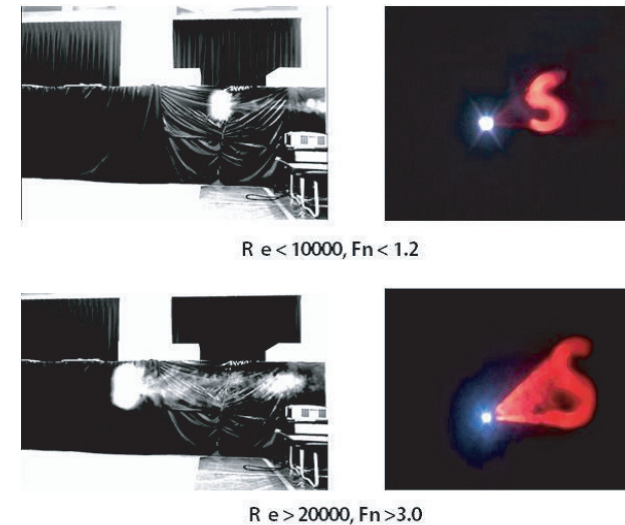


図 13 乱流渦輪（下図）と層流渦輪（上図）
Fig. 13 turbulent vortex ring (bottom) and laminar one (top).

Re が 10,000 以下かつ Fn が 1.2 以下を満たすすべての試行において図 13 の上図のような、尾が生じない層流タイプの渦輪スクリーンが安定して形成されることが確認された。特にストロークが 12 (cm) で、ピストンの速度が 20 (cm/s) のときにその傾向が顕著に見られ、特に最も綺麗であったのは $D = 30$ (cm) のときであった。このときの渦輪の速度は 30.6 (cm/s)、厚さが 33.2 (cm)、高さが 41.4 (cm) であった。渦輪の速度が 100 (cm/s) を超える、またはピストンで押し出される霧の量が渦輪の輸送できる最大値を超えてしまうと、ただちに乱流渦輪となり激しい多重像による映像のブレが見られることが確認された。次にこの最適な条件を使って実演展示を行ったときの様子と改めて確認された問題点について紹介する。

5. 実演展示

先に示した渦輪ディスプレイ試作機の実演展示を、2008 年度の 7 月末にお台場の未来館で 5 日間開催された予感研²¹⁾、そして 10 月に同場所で開催された Asiagraph 2008²²⁾ において行った。なお、デモに際しては、7 時間の連続運転が求められたため、霧を大量に安



図 14 デモの光景

Fig. 14 View of demonstration.

定して供給できるように、900 (ml/hr) の出力を持つ自作霧発生機を用いた。デモの様子を図 14、図 15 に示す。展示コンテンツとして、観客に向かって羽をパタパタさせながら飛んできた妖精を渦輪の速度に同期させながら投影した。また、簡単に匂いの効果についても検証するために、パイプの開口周辺に妖精のイメージに合ったラベンダの香りをつけておいた。渦輪がこの開口を通過するとき、予想どおりこの香り粒子も渦輪に輸送され、多くの体験者がその匂いに関しても反応していた。このようなディスプレイ画面から飛び出して、見ている人に文字どおり向かってくるような映像表現は、従来のディスプレイよりも一時的にはあるが高い臨場感と存在感そして新たな物理効果を演出し、観客が驚きや好奇心のあまり、自然に手を伸ばして触ろうとするようなアフォーダンスや感情を呼ぶほどの効果があることを体験者の反応から見てとれた。また問題点として、視野角の狭さから生じるプロジェクタの眩しさの問題、空調による渦輪の安定した移動への障害、霧の充填にかかる時間から生じる渦輪ディスプレイのリフレッシュレートの長さの問題などを改めて確認した。

6. まとめ

従来の空間表示型ディスプレイ研究では注目されていなかった、コンテンツの飛び出し効果と物理効果の表現に特化した渦輪ディスプレイを提案し、その初期実験として、プロジェ



図 15 妖精のデモの様子

Fig. 15 Demonstration of flying fairy.

クションスクリーンとしての実用性について検証を行った。その結果、明るさが 175 [lux] 以下の環境であれば、渦輪ディスプレイが十分有効に使えることが明らかとなった。また映像の飛び出す範囲に関しては、渦輪の速度や渦輪の大きさなどに依存するが、渦輪の大きさが 30 cm、平均速度が 90 cm/s である場合は約 4 m に及ぶことが確認された。また、つねにブレのない綺麗な映像を映し出せるように、渦輪の層流化条件を検証したところ、 Re を 10,000 以下、 Fn を 1.2 以下に抑える必要があることが確認され、これらの条件を満たさない場合はつねに乱流渦輪となって映像に多重像が生じてしまうことが明らかとなった。実演展示を通して、渦輪ディスプレイによって表現された実像の飛び出し効果が、映像のアフォーダンス性と臨場感・存在感を一時的に高める効果が十分にあることが確認された。

最後に、本初期実験と実演展示を行った結果から、明らかとなった今後の課題としては次のようなことがあげられる。

- (1) 視野角の狭さの改善
- (2) プロジェクタによる眩しさの改善
- (3) リフレッシュレートの向上
- (4) 外乱への耐久性の向上

視野角の狭さは、プロジェクタを複数台用いることで改善していきたいと考えている。ま

た、霧粒子以外の光散乱性粒子についても実験をすることにより、散乱角が理想的な粒子を調査していきたいと考えている。視野角の狭さからプロジェクタの中心光線ベクトルを渦輪の進行ベクトルと一致させるようなセッティングをしていたため、プロジェクタの光が眩しすぎる問題があったが、プロジェクタの明るさの調整や投影時間の短縮化、複数台のプロジェクタを用いることでの直射の回避を今後検討していきたいと考えている。リフレッシュレートの向上に関しては、霧発生機から発生した霧が無駄なく渦輪に供給されるような最適化と供給時間間隔の短縮化をはかり、アクチュエータの戻りの早さに取り組みことで改善していきたいと考えている。外乱への耐久性の向上の取り組みとしては、層流渦輪の運動量を上げることでより外乱に抵抗を持たせることなどが考えられる。

今後は、従来の2次元平面ディスプレイと同期連動させて、センセーショナルなシーンで飛び散る火の粉、水しぶき、または爆煙や画面から飛び出してくる妖精や蝶といったものを自然に表現できるシステムの設計と匂い、熱、刺激といった物理効果を与える粒子を用いた実験に取り組みたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 横谷直和：現実世界と仮想世界を融合する複合現実感-i：複合現実感とは、システム/制御/情報：システム制御技術学会誌，Vol.49, No.12, pp.489-494 (2005).
- 2) Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. and MacIntyre, B.: Recent advances in augmented reality, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.21, No.6, pp.34-47 (2001).
- 3) Bimber, O.: Interactive rendering for Projection-Based Augmented Reality Displays, Ph.D. thesis, University of Technology Darmstadt (2002). <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000270/>
- 4) Raskar, R., Welch, G., Cutts, M., Lake, A., Stesin, L. and Fuchs, H.: The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays, *ACM SIGGRAPH 1998*, pp.179-188 (1998).
- 5) 株式会社シード・プランニング：デジタルサイネージ市場の現状と今後についての調査結果要旨 (2009). <http://www.seedplanningco.jp/press/2009/0106.html>
- 6) 廣瀬通孝：五感情報通信技術，バイオメカニズム学会誌，Vol.31, No.2, pp.71-74 (2007).
- 7) Secord, J.A.: Portraits of science, quick and magical shaper of science, *Science*, Vol.297, No.5587, pp.1648-1649 (2002).
- 8) Vizoo (2009). <http://www.vizoom.com/>
- 9) Lm3Labs (2009). <http://www.lm3labs.com/>
- 10) Jones, A., McDowall, I., Yamada, H., Bolas, M. and Debevec, P.: Rendering for

- an interactive 360 light field display, *ACM SIGGRAPH 2007 papers* (2007).
- 11) IO2Technology USA (2009). <http://www.io2technology.com>
 - 12) Fogscreen (2009). <http://www.fogscreen.com>
 - 13) Burton 社 (2009). <http://www.burton-jp.com>
 - 14) Lugt, H.J., 山口信行, 大橋秀雄：渦—自然の渦と工学における渦, 朝倉書店 (1988).
 - 15) 福本康秀：[連載] 渦運動の基礎知識：渦輪，ながれ，Vol.25, pp.265-280 (2006).
 - 16) Yanagida, Y., Kawato, S., Noma, H., Tomono, A. and Tetsutani, N.: Air cannon design for projection-based olfactory display, *Proc. ICAT 2003 (The 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, pp.136-142 (2003).
 - 17) 高野邦彦, 尾花一樹, 田中 武, 和田加寿代, 佐藤甲斐, 大木眞琴：微粒子の散乱を用いたホログラフィ用立体スクリーンの検討, *IEICE Technical Report Electronic Information Displays*, Vol.102, No.433, pp.29-32 (2002).
 - 18) Allen, J.J. and Auvity, B.: Interaction of a vortex ring with a piston vortex, *J. Fluid Mech.*, Vol.465, pp.353-378 (2002).
 - 19) Gharib, M., Rambod, E. and Shariff, K.: A universal time scale for vortex ring formation, *J. Fluid Mech.*, No.360, pp.121-140 (1998).
 - 20) Glezer, A. and Coles, D.: The formation of vortex rings, *Phys. Fluids*, Vol.31, p.3532 (1988).
 - 21) 予感研 2 (2008). <http://www.media.jst.go.jp/yokan2/>
 - 22) Asiagraph 2008 (2008). <http://www.asiagraph.jp/>

(平成 21 年 3 月 19 日受付)

(平成 21 年 9 月 11 日採録)



徳田 雄嵩 (正会員)

東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程 2 年。2006 年米国 Purdue 大学より B.S. (Honors Applied Physics), 2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了, 同年東京大学大学院工学系研究科博士課程に進学, 現在に至る。デジタルパブリックアートのための空間充填型ディスプレイ, Projection-Based AR ディスプレイの研究に従事。

ACM, VR 学会, 画像電子学会各会員。



西村 邦裕 (正会員)

東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻助教。2001年東京大学工学部卒業，2003年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了，2006年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，博士（工学）。東京大学先端科学技術研究センター研究員を経て，現在に至る。バーチャルリアリティ環境，大画面ディスプレイを用いた多量情報の可視化の研究に従事。ヒトゲノム情報の解析や可視化，携帯型デバイスを用いた体験情報の記録およびライフログ情報の可視化研究に従事。また，デジタルパブリックアートのための空間充填型ディスプレイやプロジェクション技術，インタラクション技術の研究に従事。



鈴木 康広 (正会員)

東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻特任助教。1971年生まれ。2001年東京造形大学デザイン学科卒業。公園の回転遊具「グローブジャングル」を利用したインスタレーション「遊具の透視法」(2001)の発表をきっかけに，国内外の多数の展覧会やアートフェスティバルに参加。ArsElectronicaFestival'02 (オーストリア)，DEAF03 (オランダ)，Liile2004 (フランス)に招待出品。2004年1月に青山スパイラルガーデンで発表した「まばたきの葉」は，現在も美術館やパブリックスペースでの展開を続けている。TAKEO PAPER SHOW 2004「HAPTIC」，TOKYO FIBER '07「SENSEWARE」，三宅一生ディレクション「XXIc.21世紀人」等，デザインの展覧会やイベントにも積極的に参加している。



谷川 智洋 (正会員)

1997年東京大学工学部産業機械工学科卒業。1999年同大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻修士課程修了。2002年同大学院博士課程修了。同年通信・放送機構研究員。2004年組織変更により情報通信研究機構研究員。2005年東京大学先端科学技術研究センター講師。2006年同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻講師，現在に至る。イメージ・ベースト・レンダリング，MRに関する研究に従事。博士（工学）。



廣瀬 通孝 (正会員)

1977年東京大学工学部卒業，1982年同大学大学院工学系研究科博士課程修了，工学博士。同年東京大学工学部講師，1983年同助教授，1999年先端科学技術研究センター教授，2006年より大学院情報理工学系研究科教授。専門はシステム工学，ヒューマン・インタフェース，バーチャル・リアリティ。著書に『技術はどこまで人間に近づくか』(PHP)，『バーチャル・リアリティ』(産業図書)，『空間型コンピュータ』(岩波書店)，『シミュレーションの思想』(東大出版会)，『ヒトと機械のあいだ』(岩波書店)等多数。現在，JST CREST「デジタルパブリックアートを創出する技術」リーダー，独立行政法人情報通信研究機構プログラムコーディネータ等を兼務。読売新聞社東京テクノフォーラムゴールドメダル賞(1995年)，情報化月間推進会議議長表彰(2003年)，大川出版賞(2004年)等を受賞。日本バーチャルリアリティ学会副会長，ACM，IEEE等の会員。