

ホログラムと超音波ボリュームディスプレイ

University College London 平山竜士

私がホログラムに初めて出会ったのは、2011年、卒研配属のため見学に訪れた千葉大学の研究室で見た赤く光る小さなティラノサウルスの像でした。これが有名なSF映画などで出てくるホログラムかと言われても、当時の私には正直あまりピンと来ませんでしたが、配属されて初めて見た「帽子を被ったルーシー」をはじめとするアナログホログラムの美しさに感動し、これを動画化するというのはなんと夢のある研究だろうと感じました。それから、3次元ディスプレイの実現が私の大きな夢の一つとなりました。

当時、研究室に配属された4年生が最初に取り組む課題が、光をレンズのように1点に集めるための計算機合成ホログラム(CGH、図1a)をC言語によって生成するというものでした。初めてプログラムで画像を扱うことに少し苦戦しつつも、無事に作成できたことをなんとなく覚えています。卒業研究が始まってからは、研究室のメインテーマであるホログラフィやFPGAなどをを使った高速計算技術を学びながらも、ホログラフィックディスプレイとは別的方式であるボリュームディスプレイの研究にも取り組んできました。

(1ページにつづく)

目 次

1. 卷頭言：ホログラムと超音波ボリュームディスプレイ	平山竜士 表紙
2. 計算機合成ホログラム表示像の視覚的特性に関する研究	坂本雄児 2
3. ホログラフィックレーザー励起型ボリュメトリックディスプレイ	熊谷幸汰, 他 6
4. 空中ディスプレイの開発と社会実装の取り組み	山本裕紹 12
5. 立体ドームスクリーン向けの流体データ可視化手法の提案	中山弘敬 18
6. 超音波によるマルチモーダルボリュームディスプレイ	平山竜士 22
7. 次回研究会のお知らせ	巻末

現在は、英国 University College London にあるヒューマン・コンピュータ・インターラクション（HCI）を主に研究する研究室で、超音波を用いた研究を行っています。超音波自体は見えも聞こえもしませんが、空気の粒子を震わせるだけのエネルギーを持っています。これを空間的に制御することで、例えば人の手に触覚を提示したり、小さくて軽い粒子などは空中に浮かして動かすこともできます。粒子を空中で高速かつ3次元的に走査しながら照明により色を付けることで、（昔のブラウン管テレビのように）人の目の残像効果によって3次元像を表示するとともに、触覚や音も同時に提示可能なボリュームディスプレイを実現するのが私の研究目標です。

音の分野にはまだ、光学分野における空間光変調器（SLM）のようなものはありません。その代わりに、音源である超音波スピーカをアレイ状に並べて独立に制御することで、3次元的な音場を動的に制御します。このとき、触覚を提示する場合にも粒子を浮遊させる場合にも、CGHの計算手法が利用できます。つまり、各スピーカの位相を（もしくは振幅も同時に）制御することで、超音波を一か所に集め、重力に反して粒子を浮かせるだけの力を作りだすことができます。最近私は、この1点のCGH計算をFPGA内に実装し、使っている超音波の周波数（40 kHz）と同じ速度でCGHを更新可能なシステムを開発し、上記の手法で3次元像が表示可能なことを示しました（図1b）。私が4年生のときに初めて作ったホログラムが、超音波を使ったボリュームディスプレイという一見異なるディスプレイ方式の核となっていることに、不思議な縁のようなものを感じています。

現在、このボリュームディスプレイ方式で提示できるのは小さくてシンプルな3次元像に限定されています（図1b）。これをより発展させるための鍵は光学分野のホログラフィ技術にあると考えています。音と光における類似点（例えば互いに波を扱っているということ）と相違点（例えば使っている超音波の波長が8 mmとかなりスケールが大きいこと）に着目し、これまでの知見や技術をうまく応用することで、新たな発見が得られるのではと考えています。

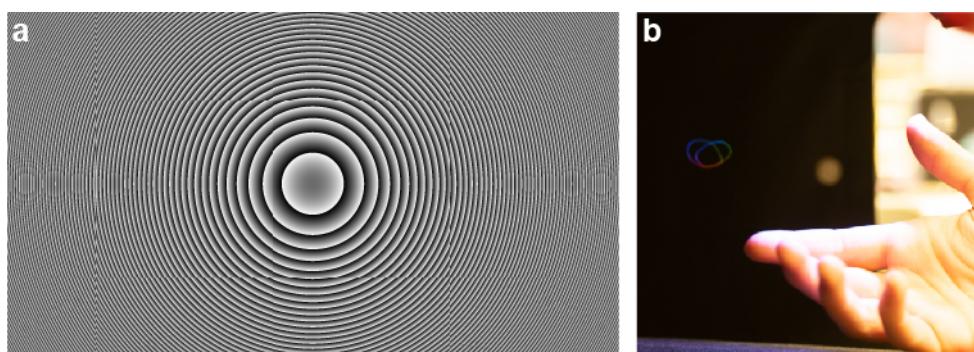


図1 (a) 1点を記録した計算機合成ホログラム。 (b) 超音波を使ったボリュームディスプレイの3次元像。



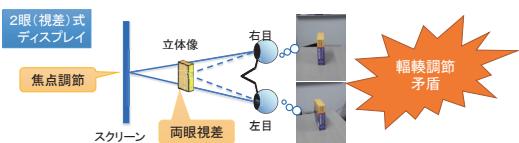
計算機合成ホログラム表示像の 視覚的特性に関する研究

CGHにおける視覚的特性と応用

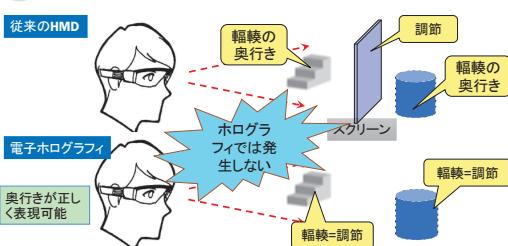


立体視の原理

生理的	単眼	焦点調節 (2m以内) 単眼運動 差 (1km以上)	回転矢印
	両眼	輻輳 (20m以内) 両眼視差 (20m以内)	
心理的	単眼	重なり、大きさ、陰影など	



矛盾のない電子ホログラフィ



本日の内容

- 人は立体として何を見ているのか?
2眼(視差)式ディスプレイの問題点

現在の立体ディスプレイは何か問題なのか?

- 電子ホログラフィ(CGH)は理想的と言うが
これは確かめられているのか?
- 視覚特性は何の役に立つか?

2眼(視差)ディスプレイの問題点

- 人によっては立体感が無い
- 疲労や酔いの発生
- 斜視などの目の病気なることも



本日の内容

- 人は立体として何を見ているのか?
2眼(視差)式ディスプレイの問題点

「輻輳調節矛盾」「3D疲労」が無いと言われているが、実験で確認した研究は少ない

- 電子ホログラフィ(CGH)は理想的と言うが
これは確かめられているのか?

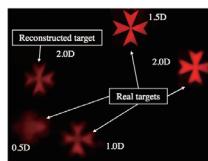
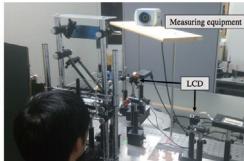
- 視覚特性は何の役に立つか?



CGHでは輻輳調節矛盾は発生しないのか？

再生像の奥行きに対する輻輳と調節の反応を測定する装置を開発

- 2012年開発
- 広視野 17° (2mで32インチ相当)
- 輻輳と調節を同時測定

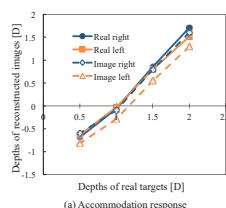


R. Ohara, T. Yoneyama, M. Kurita, Y. Sakamoto and F. Okuyama,
"Response of accommodation and vergence to electro-holographic images,"
Applied Optics, Vol. 54, Iss. 4, pp. 615-621 (2015).

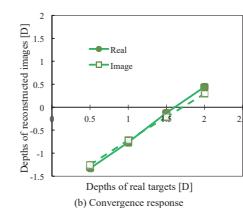
北海道大学



【静的再生像】再生像と実指標の輻輳と調節の反応は一致



(a) Accommodation response



(b) Convergence response

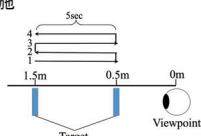
R. Ohara, T. Yoneyama, M. Kurita, Y. Sakamoto and F. Okuyama,
"Response of accommodation and vergence to electro-holographic images,"
Applied Optics, Vol. 54, Iss. 4, pp. 615-621 (2015).

北海道大学



【動的再生像】動画における輻輳と調節の反応の測定

- ◆ 1.5mから0.5mの間を前後運動
- ◆ 前後運動をホログラフィの再生像はCGH動画、実視標はリニアモータで移動
- ◆ 実験は暗室で実施

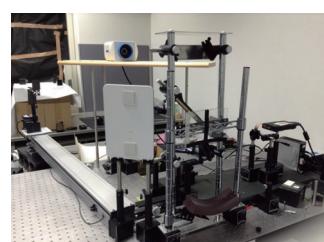


Aya Nozaki, Masaya Mitobe, Fumio Okuyama, and Yuji Sakamoto,
"Dynamic visual responses of accommodation and vergence to electro-holographic images,"
Optics Express, Vol. 25, Issue 4, pp. 4542-4551 (2017).

北海道大学



【動的再生像】反応測定装置



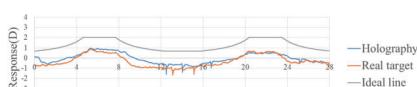
オプトメータ
(Power Ref 3)

Aya Nozaki, Masaya Mitobe, Fumio Okuyama, and Yuji Sakamoto,
"Dynamic visual responses of accommodation and vergence to electro-holographic images,"
Optics Express, Vol. 25, Issue 4, pp. 4542-4551 (2017).

北海道大学



【動的再生像】再生像と実指標の輻輳と調節の反応は一致



(a) Accommodation.



(b) Convergence.

Aya Nozaki, Masaya Mitobe, Fumio Okuyama, and Yuji Sakamoto,
"Dynamic visual responses of accommodation and vergence to electro-holographic images,"
Optics Express, Vol. 25, Issue 4, pp. 4542-4551 (2017).

北海道大学



【まとめ】電子ホログラフィ(CGH)は理想的？

- 主観評価：再生像の主観的奥行きは正確
- 輻輳と調節反応：
 - 静的：再生像と実指標への反応は一致
 - 動的：同上



研究継続中

- 疲労への影響
- 脳の視覚機能への影響（脳波による測定）



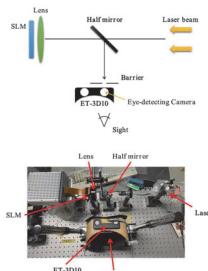
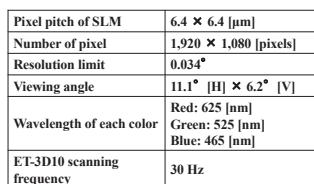
3+5

北海道大学

本日の内容

1. 人は立体として何を見ているのか?
2眼(視差)式ディスプレイの問題点
2. 電子ホログラフィ(CGH)は理想的と言うが
これは確かめられているのか?
3. 視覚特性は何の役に立つのか?
計算の高速化
への応用例

サッケード抑制の実験



計算機合成プログラム表示像の視覚的特性に関する研究 18

Lingjie Wei¹ SL HN² SV¹ ZH SII¹ HZ¹ J¹ RNA¹ @# KBSK¹ @RIORGM¹ URR¹ RBB¹ @ISD¹ @QNM¹
ENP¹ N OSRP DMD¹ DRD¹ KNH¹ @# QCNM¹ QD¹ DRNMB¹ @RBRH¹ HJM¹"
Optics Express¹ ANS² MJD² DO² ((()*)&(((*))@%%)S



計算機合成ホログラム表示像の視覚的特性に関する研究 20

【まとめ】 視覚特性の応用

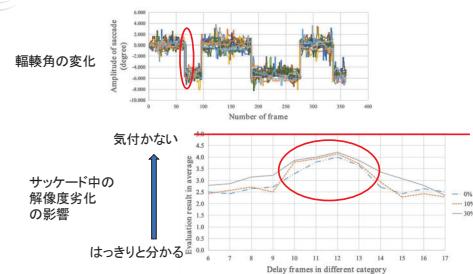
Foveated Rendering や サッケード抑制 を高速計算に利用できる

研究課題

- 立体認識の視覚的特性は十分には解明されていない
 - 波面を完全に再現する必要はあるのか？
 - 必要なパラメータは何か？
 - これらはCGHにはまだ十分に応用されてはいない



サッケード抑制の実験(被験者実験結果)

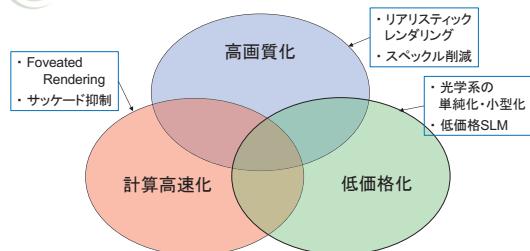


Lingjie Wei¹ ASL HN² ISV@LA³ SHB@JU⁴ IRNM@⁵ QA⁶ KBSK@RIQM⁷ URM⁸ ABB@ESD⁹ DQNM¹⁰
INPANL OSRPO DM¹¹ BRC¹² CANN¹³ L¹⁴ QC¹⁵ NMPDQ¹⁶ DRNM¹⁷ RRD¹⁸ HL H¹⁹ HNM²⁰
Optics Express²¹ ANK²² 2003²³ 10(1)²⁴ 10(1)²⁵ 10(1)²⁶ 10(1)²⁷ 10(1)²⁸ 10(1)²⁹ 10(1)³⁰



計算機合成ホログラム表示像の視覚的特性に関する研究 20

【まとめ】 視覚特性の応用



北海道大学

ホログラフィックレーザー励起型ボリュメトリックディスプレイ

熊谷幸汰 早崎芳夫

宇都宮大学オプティクス教育研究センター 〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2

E-mail: kumagai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

概要 :

本稿では、フェムト秒レーザー励起ボクセルの空間的走査と液晶空間光変調器に表示された計算機ホログラムを用いた体積映像描画法に基づく、ボリュメトリックディスプレイについて述べる。われわれは、スクリーン材料の探索から、それぞれの材料の特徴を活かした3つのタイプ（固体スクリーン型、液体スクリーン型、気体スクリーン型）を提案し、生成されるボクセルの観察や体積映像描画のような実験を通して、描画法およびシステムの有効性を実証した。

Volumetric display with holographic parallel optical access

Kota Kumagai Yoshio Hayasaki

Center for Optical Research & Education(CORE), Utsunomiya University

7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

E-mail: kumagai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

Abstract :

In this paper, we describe a volumetric display based on image drawing method using spatial scanning of femtosecond laser-excited voxels, and a computer-generated hologram displayed on a liquid spatial light modulator. From search for screen materials, we have proposed three types (solid, liquid and gas screen type) of display systems that utilize the characteristics of each materials, and demonstrated effectiveness of our drawing method and display systems through the experiments for observation of a voxel and drawing volumetric images.

1. はじめに

3次元映像は、仮想および拡張現実(VR/AR: virtual and augmented reality)の分野において、その幅広いアプリケーション展開に期待が集まっている。既存3次元映像の多くは、両眼視差やホログラフィ、ライトフィールドの原理に基づく2次元平面への情報提示であった。一方で未来技術を描く物語では、対話できるAIの映像エージェントや3次元映像によるテレプレゼンスを、実空間で実現する技術が想像されてきた。

ボリュメトリックディスプレイは、上記の実空間 3 次元映像体験を実現する存在として期待される。このディスプレイは、体積的画素（ボクセル）を描画することで、3 次元映像を実空間に直接表示するため、人の奥行き知覚を一举に満たす映像提示を可能にする[1]。ボクセルの生成は、3 次元空間分解能を有する発光点または散乱点を生成することであり、これまでにあらゆる手法が提案されている。自ら発光するアクティブボクセルを生成する手法では、希土類元素を混合したガラスの映像空間に、2 つのレーザーを用いた 2 段階励起によりボクセルを生成する方式[2]や、パルスレーザーの集光照射で空中プラズマ発光を生成する方式[3]が提案された。また、照明光を散乱することで可視化されるパッシブボクセルを生成する手法では、回転スクリーンへのプロジェクターによる映像投影を用いるシステム[4]、光泳動[5]や超音波[6]を用いた粒子トラップでボクセルを生成する手法が提案された。

以上の多様な実装例のなかで、これまでにわれわれはボリュメトリックディスプレイ実現のために、フェムト秒レーザー励起ボクセルと計算機ホログラム(CGH: Computer-generated hologram)による集光点デザイン技術の融合に基づく体積映像描画法を提案してきた。この描画手法は、ボクセル生成数や配置位置を設計可能にするため、ボクセル輝度のコントロールや単位時間当たりの生成数の向上に寄与する。そしてわれわれは、フェムト秒レーザーがあらゆる材料中に特徴的な発光または散乱点を生成することに注目し、ボクセルとしての利用を試みてきた。本稿では、これらスクリーン材料の探索を通して得られた、3 つのタイプ（固体、液体、気体スクリーン型）[7-10]について述べる。

2. ホログラフィックレーザー描画

ホログラフィックレーザー描画は、レーザー励起ボリュメトリックディスプレイにおいて、ホログラム技術を融合した新しい体積映像描画手法である。図 1 は、ホログラフィックレーザー描画法の概略図である。本手法は、フェムト秒レーザーの集光照射により生成したボクセルを 3 次元走査機構により空間的に生成することで体積映像を描画する。本描画法における重要な要素は、計算機ホログラム (CGH: Computer-generated hologram) を用いた光波面の位相制御である。CGH は、レーザー波面の位相分布を制御し、生成数や配置位置、波面補償のようなあらゆるデザイン性を集光点に与える。これらの機能は、体積映像描画において多くの利点をもたらす。集光点の配置位置の制御は、たとえばレーザー照射対象が画素構造を有している場合に、構造に合わせた光照射パターンを形成できる。また、波面補償機能は、スクリーン内部においても集光点品質を保持する。この機能は、スクリーンとしてなんらかの媒質を配置する際、空気と媒質間の屈折率差が起因するボクセル形状歪み補償を実現する。そして、集光点の並列生成はボクセルの多点同時に直結する。これは、レーザーの繰り

返し周波数や、走査系の速度限界に制約されていた、単位時間あたりの描画可能ボクセル数を飛躍的に向上させる、効果的な光アクセス手法と言える。

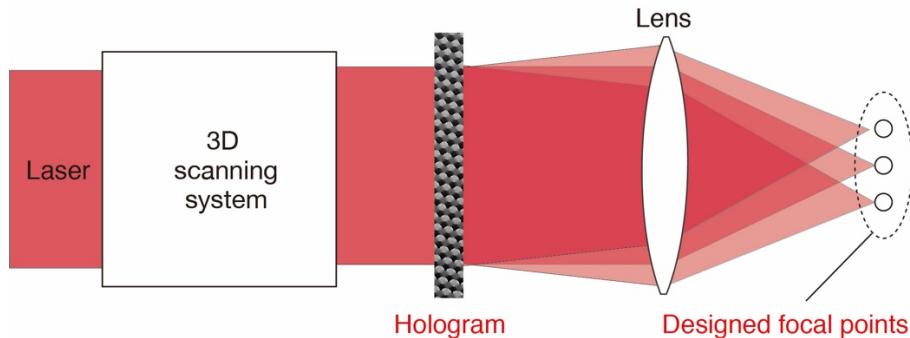


図1 ホログラフィックレーザー描画.

3. システム構成

図2は、ホログラフィックレーザー描画に基づくボリュメトリックディスプレイシステムである。このシステムは、光源、光変調器、スクリーンの3つの要素から構成され、光源にフェムト秒レーザー、光変調器に LCoS-SLM (Liquid-crystal on silicon spatial light modulator) および3次元光スキャナー、スクリーンに蛍光ポリマー(固体スクリーン型), グリセリン(液体スクリーン型), 空気(气体スクリーン型)が用いられた。3次元光スキャナーは、2次元ガルバノスキャナーと可変焦点距離レンズから構成された。

光源から出射されたフェムト秒パルスは、CGH が表示された LCoS-SLM に反射し、任意の集光点パターンを形成するように波面位相をデザインされた。その後ガルバノスキャナーによって平面方向、可変焦点距離レンズにより光軸方向の走査を可能にされた。最終的に得られた集光点は、CGH による並列化数や配置位置に対するデザイン性と3次元光スキャナーによる空間的な生成位置の選択性を有しており、スクリーン上に体積映像を描画した。

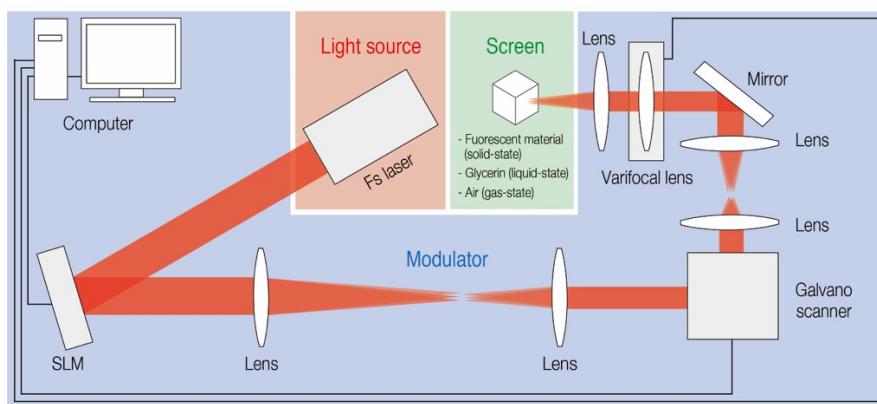


図2 ホログラフィックレーザー励起型ボリュメトリックディスプレイシステム.

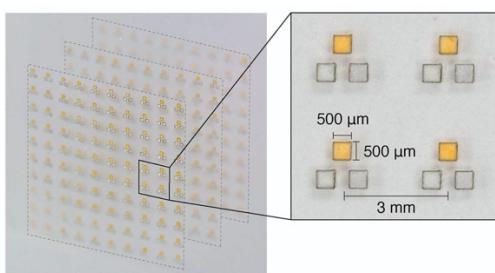
4. 固体スクリーン型

固体スクリーン型において、われわれは最初に多層蛍光スクリーンを提案した[7]。このスクリーンは、レーザー色素が混ぜられたポリマープレートを積層させた構造であり、含有させる色素を変えることで異なる発光色のボクセル生成を可能にした。われわれは、このスクリーンを用いて、単位時間当たりのボクセル数向上に対するホログラフィックレーザー描画の有効性を実証し、さらに、青緑色と赤色2色を有する体積映像描画を達成した。

多層蛍光スクリーンは、上述のように映像の2色化を可能にした一方で、下層の発光が上層に吸収され3色以上の発光色生成に対して課題を抱えていた。そこで、つぎに検討されたのは、図3(a)に示す3次元構造化ボクセルであった[10]。構造化ボクセルは、RGBの発光色を有するそれぞれのサブボクセルから構成され、ボクセルごとのカラー化を可能にした。これらのサブボクセルは、厚さ100μmのPET(polyethylene terephthalate)フィルム上に空けられた500μm×500μmの正方形の穴に、無機蛍光材料を混ぜたインクを注入することで作製された。ボクセル発光色のスイッチングは、CGHにより設計されたボクセル構造に合わせた光照射パターンを切り替えることで実行された。

図3(b)は、 $10 \times 10 \times 3$ の構造化ボクセルを有するスクリーン上に描画された体積映像を異なる角度から観察した様子である。映像は、大きさの異なる四角形を光軸方向に3つ描画することで表示され、このときの四角形の最大サイズは1.6cmであった。レーザーの照射条件は、パルスエネルギーが20μJ、繰り返し周波数1kHzであった。描画に用いられた照射パターンは、3つのサブボクセル全てにアクセスするCGHにより形成され、全スポットが均一になるように設計された。結果より、われわれはボクセルごとにRGB発光色をもつ体積映像描画を実現した。表現できる色の拡張には、各サブボクセルサイズや間隔を縮小できるパターニング技術の適用が考えられる。

(a)



(b)

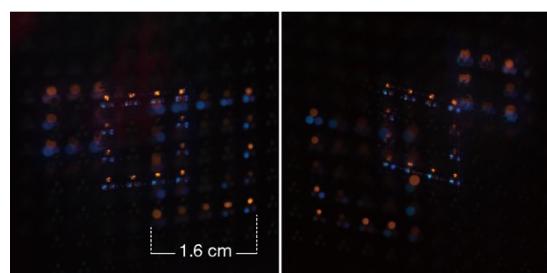


図3 (a) 3次元構造化ボクセル. (b) RGB発光を有する体積映像.

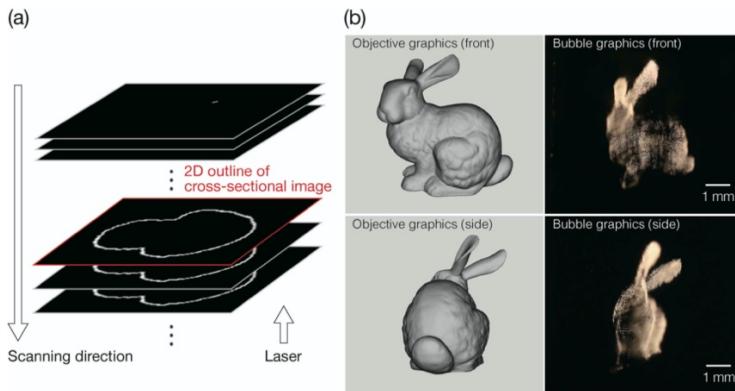


図4 (a)描画対象の2次元断面輪郭画像. (b)描画対象とフェムト秒レーザー励起バブルによるウサギの体積映像.

5. 液体スクリーン型

このタイプでは、フェムト秒レーザーの液中への集光照射により生成されるマイクロバブルがボクセルとして用いられた。マイクロバブルは、固体スクリーン型や気体スクリーン型と異なり、照明光によって可視化される散乱型ボクセルである。本研究におけるアイディアのひとつは、高粘性液体をスクリーンとして用いる点である。高粘性液体は、マイクロバブルの浮上速度を落とし、ボクセルを一定時間描画された位置に保持するため、結果として体積映像表示を可能にした [9]。

われわれは、図4(a)に示すように描画対象を2次元断面化し、その輪郭を積層することで体積映像描画を行った。図4(b)は、描画対象とフェムト秒レーザー励起バブルで描画されたウサギの体積映像である。このとき、レーザパルスは繰り返し周波数1 kHz, 照射エネルギー4.3 μJ であり、スクリーン下面から入射した。映像は、ハロゲンランプ照明下で撮影された。グリセリンと空気との間の屈折率の不一致に起因する球面収差により、映像に不均一な部分が観察できるが、われわれはフェムト秒レーザ励起マイクロバブルによる体積映像描画を実証した。

6. 気体スクリーン型

このタイプでは、フェムト秒レーザーで空気を励起することにより得られる、空中プラズマの白色発光点がボクセルとして用いられた。プラズマボクセルは、固体スクリーン型と同様、発光型ボクセルである。空中プラズマにより描画される映像が有する重要な特徴のひとつは、ユーザーとの間に隔たりが存在しない点にある。そして、フェムト秒レーザーはその高いピーク強度により、少ないエネルギーで空气中にプラズマ発光を生成できる。これらの要素は、映像へ触れることを可能にし、空中ユーザーインターフェース、実物体に直接映像を重畠する実空間ARを可能にした [8]。

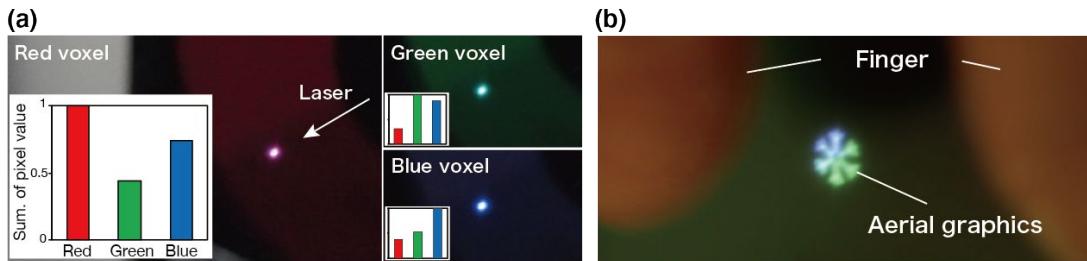


図5 (a) RGBにカラー化された再結像空中プラズマボクセル. (b) 2色にカラー化された雪の結晶の空中映像.

しかしながら、このシステムは空中プラズマの発光色が由来する白色映像であり、カラー化に課題を残していた。そこではわれわれは、放物面鏡と可変カラーフィルタから構成される再結像システムを実装し、プラズマボクセルが放つ白色発光から任意色のみ選択的に抽出する手法を検討した。図5(a)は、得られたRGBボクセルの写真と、画像中のボクセル近傍 100×100 画素のカラーチャネルごとの合計画素値を示す。また図5(b)は、青および緑色ボクセルを用いて2色にカラー化された空中映像である。結果より、われわれは再結像過程を設けることで、プラズマの白色発光点から任意色のみ抽出できることを確認し、空中映像のカラー化へ寄与することを実証した。

7. まとめ

本稿では、フェムト秒レーザー励起ボクセルの空間的走査とCGHによる集光点デザインに基づく、ホログラフィックレーザー励起型ボリュメトリックディスプレイについて述べた。固体型では、スクリーン構造を工夫することで体積映像のカラー化を実現し、提案した描画法のボクセル数増加および輝度向上への寄与を示した。液体がでは、高粘性液体を用いることで浮上速度の遅いバブルボクセルによる体積映像を実現した。気体型では、空中プラズマへの接触を利用した映像とのインタラクション、インターフェースとしての機能を実証し、フルカラー化への展開として再結像システムによる任意色の抽出について示した。

参考文献

- [1] B. G. Blundell et al., IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. **8**, 66 (2002).
- [2] E. Downing, et al., Science **273**, 1185 (1996).
- [3] H. Saito, et al., Proc. SPIE **6803**, 1 (2008).
- [4] G. E. Favolara, et al., Proc. SPIE **4712**, 300 (2002).
- [5] D. E. Smalley, et al., Nature **553**, 486 (2018).
- [6] R. Hirayama, et al., Nature **575**, 320 (2019).
- [7] K. Kumagai, et al., Opt. Lett. **40**, 3356 (2015).
- [8] Y. Ochiai, et al., ACM Trans. Graph. **35**, 17 (2016).
- [9] K. Kumagai, et al., Optica **4**, 98 (2017).
- [10] K. Kumagai, et al., Opt. Lett. **43**, 3341 (2018).

空中ディスプレイの開発と社会実装の取り組み

山本裕紹

宇都宮大学

Development of Aerial Display and its Social Implementations

Hirotsugu Yamamoto

Utsunomiya University

Abstract: Aerial display is expected to realize interactive interface in mid-air. This paper introduces aerial display in strict meaning, which was defined by IEC/TC110, and shows recent developments of aerial display formed with Aerial imaging by retro-reflection (AIRR). Because AIRR features a wide viewing direction range, a large-scale scalability, and a high degree of freedom in design, several types of aerial displays were developed for amusement, theater, and museum as well as a non-contact touchless aerial interface.

1. はじめに

何もない空中に映像が投影される様子は数々の SF 映画で描かれてきた未来の技術と思われてきた。電子ホログラフィー技術は波面の完全な再生を行えるため、光学的にも間違いない 3 次元映像を再生できるものであることは言うまでもない。空中に透明な情報スクリーンが浮かぶ「SF ディスプレイ」が電子ホログラフィーによって実現される日も遠くないと期待している。一方で、SF ディスプレイの実現を目指した別のアプローチもあり得る。完全な光学再現を求めるのではなく、ユーザーの見た目には許容される画質の映像を空中に形成する技術については、空中結像用の光学素子の開発が進み、実用化されつつある。SF ディスプレイの用途は、単に情報を見せるだけでなく、映像を通り抜けられる点からは高速道路の出入口において逆走を防止するような看板や統合リゾート施設の入場ゲートへの応用が期待されている。

最近では、新型コロナウィルス感染拡大防止のためにエレベーターの中に空中ボタンが後付けで実装される事例が報告されている。非接触・タッチレスの入力としては、静電センサーや近赤外 LED を利用した近接センサーを利用したタッチレススイッチはすでに実用化されているが、自動ドアや水洗トイレの洗浄用などの特殊用途において单一機能で実用化されるにどまっていた。

これらのセンサーと SF ディスプレイを組み合わせることで、単なる空中ボタンではなく、情報表示とともに多様な操作を可能とするタッチレス空中操作パネルを実現することができよう。たとえば、高速のステレオカメラで手指の 3 次元位置を検出してインタラクティブに SF ディスプレイの表示内容を変えることで、空中に存在するタブレット画面を操作するような自由空間インターフェイス¹⁾が可能である。

本稿では、このような非接触・タッチレス空中インターフェイスへの応用が期待されている空中ディスプレイ技術について、まず、情報ディスプレイの国際標準化の委員会で認められた

狭義の空中ディスプレイの定義を説明する。次に、著者らが提案する空中ディスプレイ技術について解説する。さらに、空中ディスプレイ技術の社会実装への取り組みについて報告する。

2. 狹義の空中ディスプレイ

何もない空中に映像表示する技術は、ハーフミラーによる虚像の観察をはじめとして多種多様な技術が考案され、劇場やヘッドアップディスプレイ（HUD）やヘッドマウントディスプレイ（HMD）などで実用化がなされている。空中に実像もしくは虚像を形成する技術の代表例を表1に示す。実像とは光線の収束により形成される像であり、虚像とはその位置から光が発散されるかのように見える像を意味する。なお、両眼視差式の3Dディスプレイにおいてもディスプレイと観察者の間に情報を提示できるが、映像の位置には実像も虚像も形成しないため、この表には記していない。

表1では、映像の近傍もしくは映像と観察者の間にビームスプリッターなどのハードウェアが有るか無いか、ならびに形成される像が実像か虚像であるかで空中表示技術を分類している。空中表示技術は、ハードウェア無しで実像を形成する手法（左上）、ハードウェア有りで実像を形成する手法（右上）、ハードウェア有りで虚像を形成する手法（右下）の3種類に分類される。

表1. 広い意味での空中映像を形成可能な表示技術の分類

	映像近傍に ハードウェアなし	映像近傍もしくは観察者と の間にハードウェアあり
実像	<ul style="list-style-type: none"> ● ホログラフィックディスプレイ ● ライトフィールドディスプレイ ● パッシブ光学素子による結像を用いたディスプレイ 	<ul style="list-style-type: none"> ● 透明ディスプレイ ● ライトフィールドディスプレイ ● 高速走査による残像ディスプレイ ● レーザープラズマによる空中描画
虚像	(無し)	<ul style="list-style-type: none"> ● ベッパーズゴースト ● ヘッドアップディスプレイ ● ヘッドマウントディスプレイ

これらの3種類のうち、近い将来の実用化において重要な技術は表1の左上の技術である。情報ディスプレイの国際標準を決めるIEC/TC110 (International Electrotechnical Commission / Technical Committee 110)において、筆者は2018年10月のPlenary MeetingにおいてAerial displayの審議が承認され(IEC/TC110/WG6/PWI110-31)，筆者はPL(Project Leader)を担当している。国際標準化は、産業の振興と消費者保護の観点から必要な仕様や性能の計測もしくは検査方法に対して審議がなされる。空中ディスプレイに関する場合、社会的に実用化の期待が大きい用途は、非接触・タッチレスの空中インターフェイスを実現するための映像の直接操作と空中サイネージである。

これらの空中キラーアプリケーションの実現と普及には

- ① 映像を素手で直接触れること
- ② どの観察位置からでも同じ位置に映像があること
- ③ 特殊な眼鏡なしに映像を観察できること
- ④ 安全であること
- ⑤ 大量生産可能であること

の5つの要件が求められる。

表1の右列に示された表示技術は、映像の近傍もしくは観察者の前に物理ハードウェアを必要とするため、空中ディスプレイのキラーアプリケーションに求められる要件①を満たさない。映像の近傍や観察者との間に物理ハードウェアなしに空中に実像を形成する、表1の左上の領域の技術は、要件①から要件③を満たす。

2020年5月にIECより発行されたTechnical Report²⁾においては「狭義の空中ディスプレイ」として、図1に示すように、「インコヒーレント光源からなるディスプレイから広い範囲に発散した光をパッシブ光学素子で収束することで空中に実像を形成するディスプレイ」と定義をすることで、参加国の全会一致で賛同をいただいた。将来的には見直しの可能性はあるが、現状の技術状況においてはインコヒーレント光源からなる従来のディスプレイを光源として、消費者は液晶ディスプレイに接するときのように通常の使用において安全と言えるため要件④を満たし、また要求の厳しい自動車産業などの用途において、パッシブ光学素子の利用は概ね要件⑤を満たすことができるからである。ここでパッシブ光学素子とは、駆動にエネルギーを必要としない光学素子であり、具体的にはフレネルレンズや再帰反射素子、2面コーナーリフレクターアレイ(DCRA)³⁻⁶⁾、スリットミラーアレイ(SMA)⁷⁾などの結像素子である。

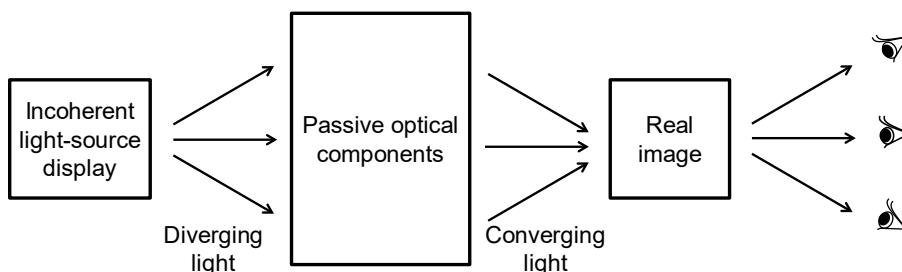


図1. 狹義の空中ディスプレイの構成要素.

3. 再帰反射による空中結像(AIRR)

再帰反射素子は道路標識や救命胴衣などにおいて、夜間に照明方向に明るく光を帰す素子として広く普及している。このように再帰反射素子は空中ディスプレイ技術の社会実装に求められる要件⑤の大量生産性を有する。再帰反射による空中結像(AIRR:aerial imaging by retro-reflection)⁸⁾の基本原理を図2(a)に示す。光源から発せられた光は、ハーフミラーで反射された後に再帰反射素子に入射する。再帰反射された光は光路を逆にたどり、ハーフミラーで反射および透過を行う。ハーフミラーを透過した光は、ハーフミラーを基準面として光源の対称位置に集束することで、空中に実像が形成される。AIRRは広い範囲から観察可能な空中映像⁹⁾を厳密な位置合わせなど必要とせずに形成可能である¹⁰⁾。図2(a)の場合、ハーフミラーにおいて光の損失が生じる。単純に透過率および反射率が1/2とすると、ハーフミラーにおいて3/4が

損失となる。

そこで、ハーフミラーの代わりに反射型偏光板を用いることで、損失を減らす方法が図 2(b)である。反射型偏光板で反射された S 偏光の光は、 $1/4$ 波長の位相差フィルムを透過して再帰反射素子に入射する。再帰反射光は $1/4$ 波長フィルムを再度通過して P 偏光となって、反射型偏光板に入射する。P 偏光である再帰反射光は反射型偏光板を透過して、空中に実像を形成する。実際には再帰反射素子の反射率および偏光維持度の影響や斜入射に対する反射型偏光板の反射率および透過率の特性があるために光利用効率は低下するが、光源の輝度に対して 20% 程度の輝度を持つ空中像を形成できる。

光源に 2 層液晶パネルを用いた覗き込み防止機能付きのセキュア空中ディスプレイ¹¹⁾や、2 層の空中映像による空中 Depth-Fused 3-D (DFD) 表示¹²⁾も可能である。

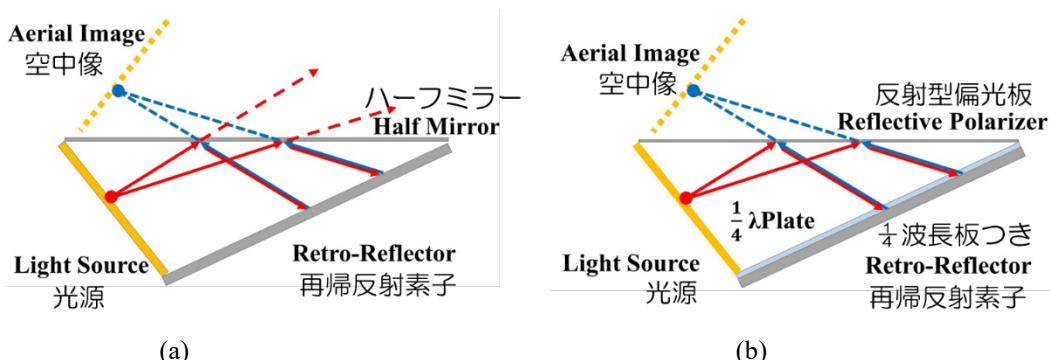


図 2. (a)再帰反射による空中結像(AIRR)の基本構成. (b) 偏光変調を用いた再帰反射による空中結像(pAIRR)の構成.

4. 社会実装に向けた取り組み

空中ディスプレイは次世代モビリティにおけるセンターコンソールの操作パネルや、空中サイネージ、アミューズメント機器の装飾、非接触・タッチレス空中インターフェース、視線一致インターフェースへの応用が期待されている。図 3 は、反射型偏光板をヘッドアップディスプレイのコンバイナーのように使うことでシースルー化を実現した例である¹³⁾。ユーザー側からは空中映像を操作できるだけでなく、装置の向こう側（図ではオペレーターと記した側）を観察できる。オペレーター側ではユーザーが操作している画面を虚像として観察できる上にユーザーのジェスチャーを観察できる。この図の例ではユーザーと表示内容の両方が見えているが、偏光変調をもちいることでユーザーのみをカメラで撮影することが可能である¹⁴⁾。シースル化によりオンライン会議で問題となる視線一致の課題を解決できる。

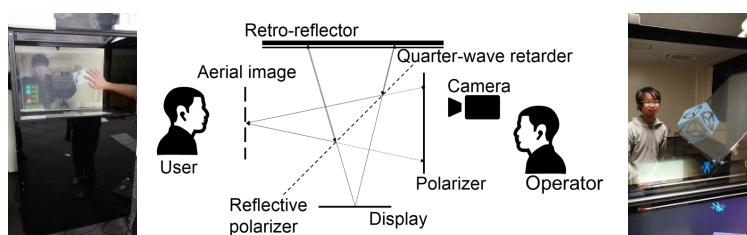


図 3. シースルー空中インターフェース。

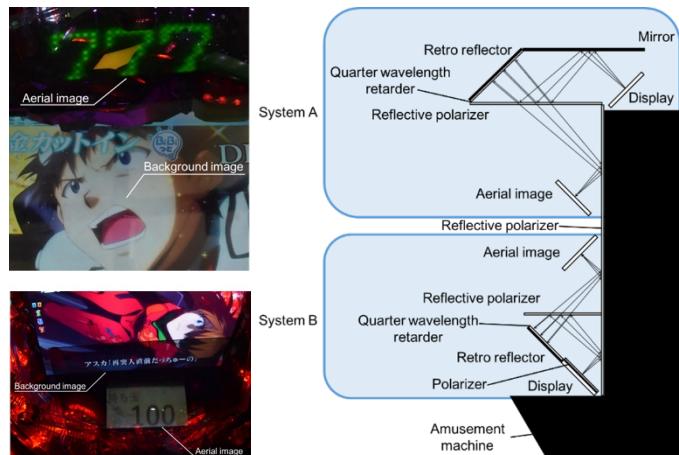


図 4. パチンコ台のガラス面の上に空中映像を重畠表示した例。



図 5. 国立アマゾン研究所内の博物館内での空中ディスプレイの実用化。

アミューズメントへの応用例を図 4 に示す。パチンコ台のガラス表面の反射を用いることで機器とユーザーの間に空中映像を表示する構成である¹⁵⁾。上部には LED を用いて広い範囲から観察できる空中 LED サインが表示される。下部では自分のスマートフォンの画面を見ながらパチンコ台の状況も把握できる仕掛けが設けられている。

AIRR は博物館の展示にも用いられている。図 5 は、ブラジルにある国立アマゾン研究所 (INPA) 内で年間 3 万人が訪れる人気施設 Bosque da Ciencia (科学の森) にある博物館において光るキノコの写真を空中映像で展示している様子である。キノコそのものは暗い中で観察しないと発光がわからないため写真展示になるものの、印刷物や通常の画面では仄かな発光の様子を直感的に伝えることが難しいという課題があった。空中映像を用いることで幻想的な印象を来場者に伝えることができたと博物館のプロデューサーから伺っている。博物館のリニューアルは、JICA と京都大学と INPA の共同プロジェクトの一環であり、日本の先端技術のサポートがあることを示す点でも効果的であるとプロジェクトリーダーから感想をいただいた。

学術面においては、行動生物学分野の実験において空中映像を刺激提示に用いる VR Biology 研究への応用を進めている¹⁶⁾。

5. おわりに

本稿では空中ディスプレイについて IEC/TC110 での狭義の定義を紹介するとともに、再帰反射による空中結像 (AIRR) の原理と社会実装に向けた取り組みについて解説した。空中結像技術は 2010 年頃からわが国での開発が進んできたが、最近では中国でも開発例が報告されている。知財確保だけでなく、空中映像の画質の定量化¹⁷⁾や空中スクリーンの位置の計測法について国際標準化の委員会で議論がなされている。

これらの研究成果の一部は、JST ACCEL (Grant Number JPMJAC1601), JSPS 科研費により得られた成果である。

参考文献

- 1) <https://youtu.be/iJd7fpH8n6M> AIRR Tablet: Floating Display with High-Speed Gesture UI.
- 2) International Electrotechnical Commission, “3D display devices Part 51-1: Generic introduction of aerial display,” IEC TR 62629-51-1 (2020).
- 3) S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba, “Transmissive optical imaging device with micromirror array,” *Proc. SPIE*, Vol. 6392, 63920E (2006).
- 4) D. Miyazaki, N. Hirano, Y. Maeda, S. Yamamoto, T. Mukai, and S. Maekawa, “Floating volumetric image formation using a dihedral corner reflector array device,” *Appl. Opt.* **52** (1), A281-A289 (2013).
- 5) R. Kujime, S. Suyama, and H. Yamamoto, “Different aerial image formation into two directions by crossed-mirror array,” *Opt. Rev.* **22** (5), 862-867 (2015).
- 6) Y. Yoshimizu and E. Iwase, “Radially arranged dihedral corner reflector array for wide viewing angle of floating image without virtual image,” *Opt. Exp.* **27** (2), 918-927 (2019).
- 7) N. Koizumi, Y. Niwa, H. Kajita, and T. Naemura, “Optical design for transfer of camera viewpoint using retrotransmissive optical system,” *Opt. Rev.* **27** (1), 126-135 (2020).
- 8) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, “Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR),” *Opt. Exp.* **22** (22), 26919-26924 (2014).
- 9) <http://youtu.be/chxJgC1lzt4> Aerial color display between hands formed by AIRR.
- 10) <http://youtu.be/9qOtrVXVieA> Quick and easy setup for AIRR.
- 11) K. Uchida, S. Ito, and H. Yamamoto, “Multifunctional aerial display through use of polarization-processing display,” *Opt. Rev.* **24** (1), 72-79 (2017).
- 12) Y. Terashima, S. Suyama, and H. Yamamoto, “Aerial depth-fused 3D image formed with aerial imaging by retro-reflection (AIRR),” *Opt. Rev.* **26** (1), 179-186 (2019).
- 13) S. Ito, K. Uchida, and H. Yamamoto, “See-through Aerial Secure Display with Head-tracking Function,” *Proc. IDW’18, FMC3-1* (2018).
- 14) K. Fujii, M. Yasugi, and H. Yamamoto, “Improvement of Visibility of Aerial Image in See-Through AIRR by Cutting off Ambient Light Using Polarization Modulation,” *Proc. LDC 2020, LDC10-03* (2020).
- 15) 小堀 智史, 岡本 智行, 小野瀬 翔, 長坂 千嘉夫, 山本 裕紹, ”AIRR による空中ディスプレイのアミューズメント機器応用”, OPJ2017 (Optics & Photonics Japan 2017) 講演予稿集, 31aP18 (2017).
- 16) E. Abe, M. Yasugi, H. Takeuchi, E. Watanabe, Y. Kamei, and H. Yamamoto, “Development of omnidirectional aerial display with aerial imaging by retro-reflection (AIRR) for behavioral biology experiments,” *Opt. Rev.* **26** (1), 221-229 (2019).
- 17) N. Kawagishi, K. Onuki, and H. Yamamoto, “Comparison of divergence angle of retro-reflections and sharpness with aerial imaging by retro-reflection (AIRR),” *IEICE Trans. Electron.* **E100-C** (11), 958-964 (2017).

立体ドームスクリーン向けの流体データ可視化手法の提案

中山 弘敬

国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

E-mail: hirotaka.nakayama@nao.ac.jp

あらまし 国立天文台の内の4次元デジタル宇宙プロジェクトでは様々な天文データの可視化映像制作を行っているが、流体系データについてはレンダリングコスト面で定常流の効果的な可視化手法がないことから、あまり制作を行ってこなかった。今回、ノイズを粒子に見立てることで、速度場に沿った粒子の流れを再現できないかを試みた。レンダリングにはGPUを用いたレイマーチング法を取り入れ、これらの手法がレンダリングの速度・品質ともに有効であることを確認した。また、制作した映像は主にドームスクリーンやHMDを用いて立体視で鑑賞するため、レイマーチング法によるレンダリングを行う際に360度を違和感なく立体視できる手法も取り入れた。

1. まえがき

国立天文台の4次元デジタル宇宙プロジェクト（以下4D2Uプロジェクト）では天文シミュレーションデータの可視化映像制作を行っている^[1,2]。制作した映像作品は4D2UプロジェクトのWEBサイトからダウンロードすることができる他、国立天文台敷地内に設置された4次元デジタル宇宙シアターと呼ばれる立体視が可能なドームシアターで、月に数回の定例公開を行っている。

天文シミュレーションデータは大きく粒子系と流体系に分かれる。粒子系のシミュレーションデータは粒子一つ一つが計算点であり、位置・速度情報などを持っているため、映像化した際にデータステップ間の「動き」を正確に再現できる。これにより大胆かつ滑らかなアニメーションの映像制作が可能である。一方の流体系シミュレーションデータは固定された計算点である格子が速度や密度といった情報を持っているため、映像化した際にデータステップ間の「動き（形状の変化）」が正確に再現できないという欠点がある。定常流と呼ばれる比較的全体の形状変化の少ないシミュレーションデータの場合は、映像化した際の形状の変化についての違和感はほとんどないが、そもそも形の変化がないため、映像としての面白みに欠けてしまう。格子で構成された速度場に沿って粒子を移動させ、流れを表現することができれば映像としての面白みが出てくると考えられるが、現在のところ実現できていない。そのため、4D2Uプロジェクトで制作・公開している映像作品も多くは粒子系シミュレーションデータを可視化映像化したものである。

今回、3Dノイズを粒子に見立てて格子内を移動させることで、疑似的な流れを表現する手法を提案する。レンダリングにはレイトレース法の一種であるボクセル

レイマーチング法を用い、立体ドームスクリーン向けとして全方位の立体視レンダリングが可能であるかの検証も併せて行う。なお、これらの表示・レンダリングシステムの試作はゲームエンジンであるUnityおよびシェーダ言語であるHLSLを用いて行った。

2. レイマーチング法

提案手法を実現するにあたって、レンダリング手法にはレイマーチング法を取り入れる。レイトレース法の一種であるレイマーチング法は、視線方向にレイを行進（マーチ）させていくことで物体との交点を導き出し、描画する手法である。

レイマーチング法にもいくつかの種類が存在するが、本提案には図1に示したボリュームレイマーチング法（ボリュームレイキャスティング法）と呼ばれる手法を用いる。この手法では視線に沿ってレイを距離dずつ伸ばしていく、ボクセル空間内の情報を多重に合成してスクリーン面に投影することでボリュームレンダリングを行う。なおレイマーチング法は各ピクセルごとに独立した計算が可能であり、GPUによる並列計算に適しているためレンダリングの高速化が見込める。また、レイの方向を任意に操作することができるため、スクリーン面上に直接任意の図法を描画することが可能である。

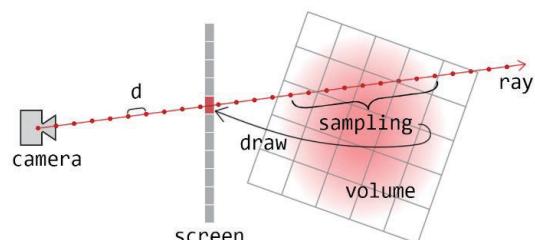


図1 ボリュームレイマーチング法

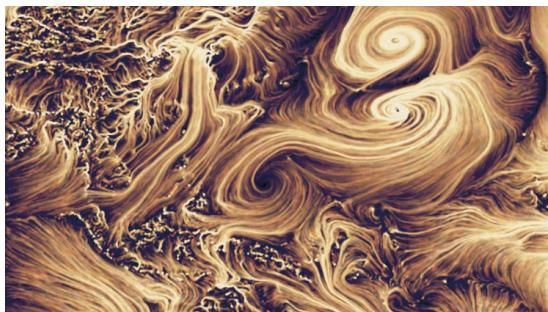


図 2 流線を用いた流れの可視化の例

3. 流れの可視化

流れの可視化は図 2 に示したように流線を用いることが一般的である。この応用として、ランダムあるいは任意の位置に発生させた粒子を速度ベクトルに沿って移動させ、動きのある流線で流れを表現する WEB サイトなども登場している。こういった手法は見ごたえの面からも有効であり、3 次元に拡張させることも可能だ。しかし、映像作品を制作する際はカメラ位置が大きくアニメーションするため、粒子の発生位置や数の制御が難しい。そこで本研究ではノイズを粒子に見立てることで、速度場に沿った粒子の流れを疑似的に再現できないかを試みた。

3.1. 2 次元における流れの表現

図 3(a)に示すように 2 次元の計算格子に速度ベクトルが与えられているとする。これを可視化する場合、一般的には先に述べたように流線を重ねて描画する。一方、本研究では図 3(b)に示すようなノイズ画像を疑似的な粒子と見なし、格子内で速度ベクトルに沿って平行移動させる(図 3(c))。全ての格子についてこれを行い、アニメーションとしての流れの表現が可能であるかを確認するためのシェーダを試作した(図 3(d))。あらかじめ速度ベクトルを焼き込んだマップを作成しておき、シェーダ内でその速度ベクトルに時間経過を掛けた分だけノイズ画像をオフセットさせていく。隣の計算格子との繋がりや速度場の補間は一切考慮せず、各格子内で完結するシンプルな手法である。

図 3 で示した程度の低い格子解像度の場合は、格子の境界におけるノイズ画像の不連続さや、平行移動しかしていないことによるアニメーションの不自然さが目立った。しかし、実際にシミュレーションに用いられる解像度は図 4 に示した例のようにはるかに高いものとなり、提案した手法で自然な表現が可能であることが確認できた。なお、速度が大きくなるにつれてノイズのコントラストを上げる工夫を施すことにより分かりやすい表現となることが確認できた。

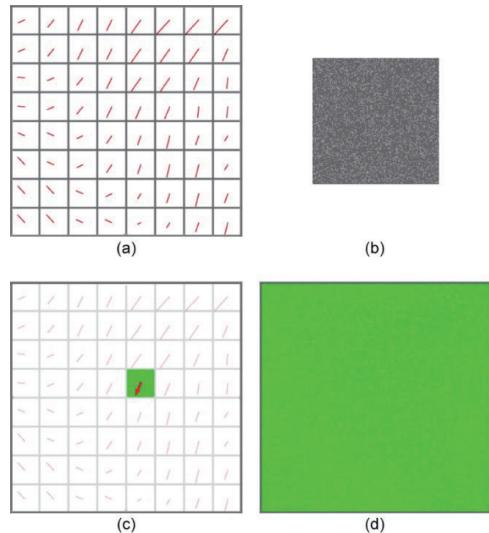


図 3 2 次元における流れの可視化手順

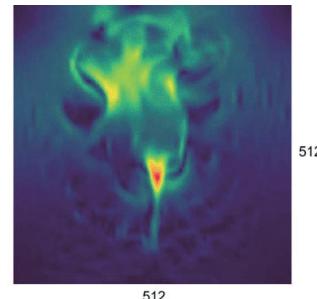


図 4 2 次元流体シミュレーションの流れの可視化の例（速度によるカラーバーを割り当て、速度ベクトルに沿った粒子の動きをオーバーレイしている）

3.2. 3 次元における流れの表現

3 次元流体シミュレーションの流れを可視化する場合も 2 次元の場合と同様に、各計算格子内の速度ベクトルに沿ってボリューム内にノイズを平行移動アニメーションさせる。ノイズも 3 次元である必要があるため、Perlin ノイズと Voronoi ノイズの組み合わせで作成した 3D テクスチャを用いた。3D ノイズのアニメーションはボリュームレイマーチング法でレンダリングを行い、同じくボリュームレイマーチング法によって描画されたボリュームにこれを掛け合わせることで、3 次元の流れを粒子の移動として表現する(図 5)。表示には HLSL で記述したシェーダを使用し、視点の移動などのインターフェースは Unity を用いて制作した。検証には各計算格子に密度と速度の情報を持った、解像度が $64 \times 64 \times 64$ の模擬データを用いた。

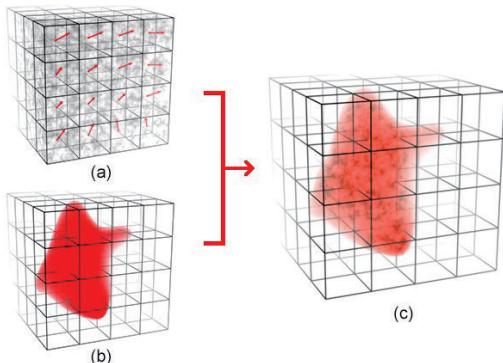


図 5 3 次元における流れの可視化手順

- (a)格子内で速度ベクトルに沿って 3D ノイズを移動
 (b)密度情報などをボリュームレンダリング
 (c)ボリューム内を 3D ノイズが流れる



図 6 3 次元における流れの可視化

図 6 に示すように結果は良好で、半透明のボリューム内を無数の粒子が流れている様子が疑似的に再現できました。計算格子の境界では 3D ノイズの不連続が観察されるため、境界部分の 3D ノイズを隣接する格子のものとなじませるなどの処理が必要であり、今後の課題である。

4.360 度立体視

4D2U プロジェクトで制作する映像作品は立体ドームスクリーンや VR 機器で視聴することを前提としているため、全方位の立体視が可能なレンダリングを高い解像度で行う必要がある。解像度についてはドームスクリーン向けの場合は最低でも 1 辺が 4K 以上のドームマスター形式、VR 向けの場合は 4K×2K 以上のエクイレクタングラー形式であり、レンダリングコストは高い。この高いレンダリングコストに対応するためには GPU を用いたレンダリングが望ましいが、そのためには GPU で 360 度の立体視に対応したレンダリングを行う必要がある。

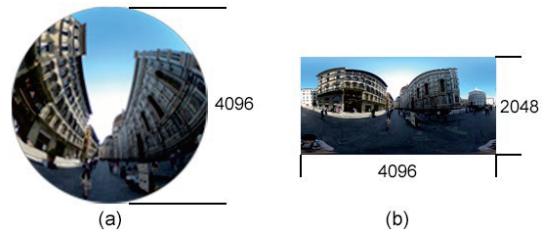


図 7 最低限必要なレンダリング解像度

- (a)ドームスクリーン向け (b)VR 向け

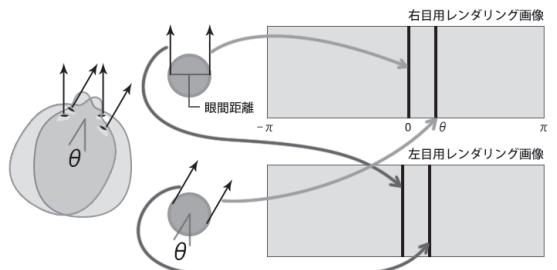


図 8 同心モザイク

- (a)ドームスクリーン向け (b)VR 向け

4.1. 同心モザイク

360 度の立体視を可能とするには同心モザイクでレンダリングする必要がある。同心モザイクとは観測者の正面方向から常に正しい立体情報が提供されるように、全方位をぐるっと見渡した際の正面方向のみの絵をつなぎ合わせたものである。図 8 に示すように CG 空間上で直径が眼間距離と等しい円盤の円周上に LR のカメラを配置し円盤を一回転させる。そこで得られるスリット状の無数の画像を並べることで得られる。

リアルタイムに同心モザイクを生成する手法としてはプログラマブルシェーダ (Geometry Shader) を使用することで 3DCG を直接投影変換してしまう手法³⁾ が提案されているが、4D2U における粒子系の映像制作においてもこれと同様の手法を用いて GPU 上でリアルタイムに粒子の位置をずらすことで同心モザイクのレンダリングを行っている。また、ドームスクリーンの天頂部分 (VR 映像の場合は真下も含む) で立体視が破綻してしまう問題については視線方向が天頂に近づくにつれ、立体感を弱めていく手法⁴⁾を取ることで対応している。

4.2. レイマーチング法による同心モザイク

ここでレイマーチング法でレンダリングを行う場合について考えてみる。本提案はボリュームレイマーチング法を用いてレンダリングを行うが、この手法はレイトレース法の一種であることは先に述べた通りで

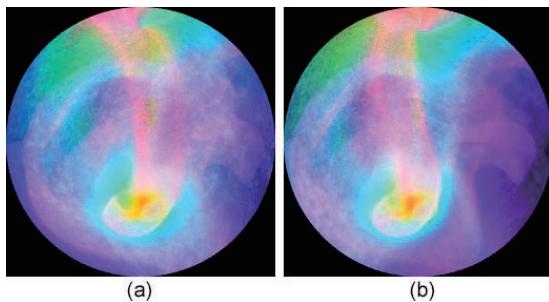
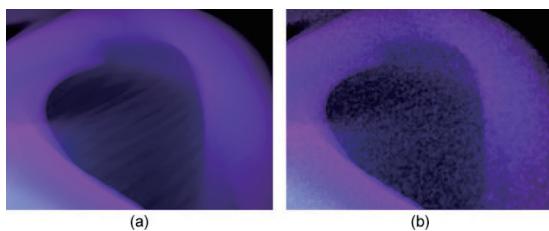


図 9 立体ドームスクリーン向けの書き出し

(a)左目用 (b)右目用

図 10 定常流の可視化
(a)粒子無し (b)粒子の流れあり

あるため、視線方向を任意に操作することが可能である。また、それと同時にカメラ位置も任意に操作することが可能である。したがって、図 8 で示したことと GPU 上でリアルタイムに行なうことが可能だ。図 9 に示すのはレイマーチング法を用いて立体ドームスクリーン向けに書き出しを行った左目用および右目用の画像である。書き出し後の座標変換などは一切行わずに直接描画することが可能だ。

5. 結果と考察

本提案手法を用いて定常流のデータを立体視用にレンダリングし、国立天文台内の立体ドームシアターにてテスト投影を行った。また、図 10 に示すように同じデータをノイズによる流れの表現を行わずにレンダリングしたものと比較した。

立体視について、問題なく達成できていることが確認できた。またノイズによる流れの表現を行っていない場合には停止しているように感じられていたが、流れの表現を追加したものははっきりとデータの運動を見ることが出来た。流れを可視化することでデータの理解促進につながることが期待できるとともに、映像作品としての迫力が大きく加わり、本提案手法が有効であることが確認出来た。

6.まとめと今後の課題

流体シミュレーションによって得られた結果の可視化手法として、ノイズを用いることで疑似的に粒子

が流れる表現を行う手法を提案し、本手法が有効であることを確認した。本手法はシンプルであるため、実装しやすく動作の負荷もそれほどかからないと考えられるが、今後は定量的に本手法の有効性を示す必要があると考えている。また、隣接する計算格子とは不連続な粒子の動きであるため、格子の形状が見えてしまうという問題点がある。隣接する格子内の速度データを参照し、格子の境界を馴染ませることが可能であるかを検証していく予定である。

文 献

- [1] Kokubo, E., Hayashi, M., Kato, T., Takeda, T., Miyama, S. M., Kaifu, N., Miura, H., Takahei, T., 4-Dimensional Digital Universe Project, Journal of the Korean Astronomical Society, 2005, 38, 153-155.
- [2] 武田隆顕, 高幣俊之, 他国立天文台 4D2U プロジェクトメンバー, 「大規模天文シミュレーションの可視化 - 国立天文台 4D2U プロジェクトでの試み -」, 可視化情報学会誌(2008) Vol28, No110, 186-192
- [3] 城堅誠, 南澤孝太, 新居英明, 川上直樹, 館暲, GPU を用いた全周囲立体 CG 映像の実時間生成, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌(2008) Vol.13, No.3, 343-352
- [4] 中山弘敬, 国立天文台, “プログラム, 記憶媒体, 画像処理装置及び画像処理方法”, 特許第 6198157 号, (2017.9.1)

超音波によるマルチモーダルボリュームディスプレイ

平山 竜士

University College London

E-mail: ryuji.hirayama@ucl.ac.uk

あらまし：本講演では、超音波フェーズドアレイを用いることで、視覚・聴覚・触覚のコンテンツを同時に表示可能な空中表示ボリュームディスプレイ，“MATD: Multimodal Acoustic Trapping Display (マルチモーダル音響浮遊ディスプレイ)”を紹介する。MATDは、超音波によって小さなポリスチレン粒子を浮遊させ、LEDで色を照射しながら高速に走査することで、肉眼で視認可能なカラー3次元像を空中に表示する。超音波の波が運ぶ音圧を利用することにより、手で感じることができる圧力を作りだすことができ、また、空気の振動により可聴音を生成することも可能である。

Multimodal volumetric display using ultrasound

Ryuji Hirayama

University College London, UK

E-mail: ryuji.hirayama@ucl.ac.uk

Abstract: In this talk, I will present a Multimodal Acoustic Trapping Display (MATD): a mid-air volumetric display that can simultaneously deliver visual, auditory and tactile content, using phased arrays of ultrasound transducers. The MATD makes use of ultrasound to trap, quickly move and colour a small particle in mid-air, to create coloured volumetric shapes visible to our naked eyes. Making use of the pressure delivered by the ultrasound waves, the MATD can also create points of high pressure that our bare hands can feel and induce air vibrations that create audible sound.

1. はじめに

3次元ディスプレイはその表示原理に基づき、ホログラフィックディスプレイ（波）、ライトフィールドディスプレイ（線）、そしてボリュームディスプレイ（点）の3種類にたびたび分別される[1]。中でもボリュームディスプレイは「実際に3次元像がある場所に散乱点もしくは発光点を有するディスプレイ」と定義され、3次元像を結像するためのいわゆるスクリーンを必要としない。そのため、3次元像を観察する場所に制限がない（もしくは少ない）という利点を有する。

ボリュームディスプレイ方式の中でも、SF 映画に登場するような、フリースペースに 3 次元像を表示できる手法として、高出力レーザによって発生させたプラズマ[2, 3]や、屈折率の違いを利用し光を曲げる[4]ことによって 3 次元像を描画する手法などが提案されている。また最近では、光や[5]音[6, 7]、電場[8]を利用してすることで小さな粒子を浮遊させ、十分高速に走査することで空中に 3 次元像を描く手法も提案されている。

本講演では、音響浮遊技術を利用して開発した粒子走査型のボリュームディスプレイである “MATD: Multimodal Acoustic Trapping Display (マルチモーダル音響浮遊ディスプレイ) [6]” を紹介する。MATD は、超音波フェーズドアレイを用いて粒子を高速に走査することで 3 次元像が描けるだけでなく、超音波が運ぶ音圧を利用して手で感じができる圧力を作りだすことができ、また、空気の振動により可聴音を生成することも可能である。つまり、一つの原理に基づき、見て・聴いて・感じることができる 3 次元コンテンツを生成可能な新たなディスプレイである。

2. MATD の動作原理

2.1. システムの概要

MATD は、互いに向き合うように上下に配置された 2 つの超音波フェーズドアレイからなる（図 1）。各アレイは 16×16 個の超音波振動子（Murata MA40S4S, 直径 1 cm, 40 kHz,）で構成されており、フェーズドアレイ上に搭載された FPGA ボード（Waveshare, CoreEP4CE6）が生成する 12 Vpp の矩形信号によって、各振動子を独立に制御可能となっている。

MATD のシステムでは、直径 2 mm のポリスチレン粒子を浮遊させるためのトラップ（図 1 右上）と触覚を提示するための焦点（図 1 右下）の位置を、時分割多重化して提示する。高速に（10 Hz 以上で）走査された粒子はフルカラー LED 照射で色を付けられることによって視覚コンテンツを生成し、低周波（本実験では 250 Hz）に変調された焦点は人の手で感じができる触覚コンテンツとなる。さらに周波数変調によって、人の耳で

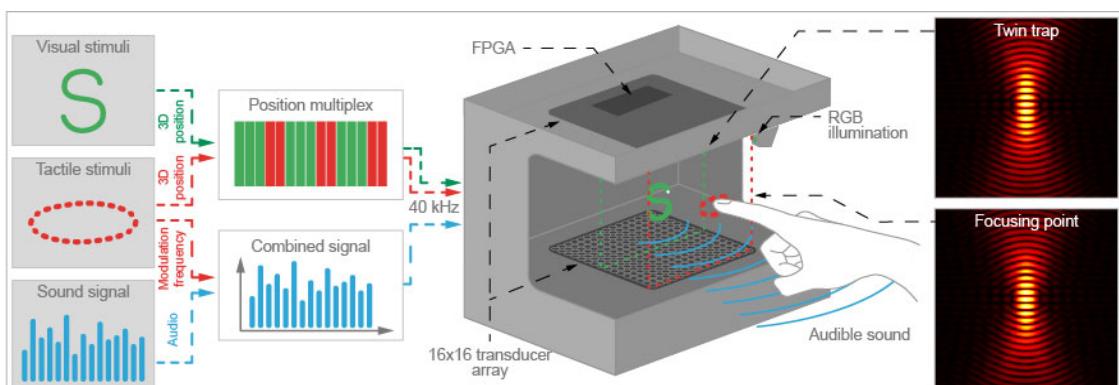


図 1 : MATD の概要図 ([6]より引用) .

は聞こえない超音波から任意の可聴音を同時に生成することもできる。必要な計算をすべて FPGA 内に実装し、40 kHz（超音波の周波数）という高速なアップデートレートを実現することで、このようなマルチモーダルなコンテンツの提示が可能となった。

2.2. 視覚コンテンツの生成

各超音波振動子は 40 kHz の矩形波によって駆動される。矩形波を遅らせることで位相を 64 段階で制御し、矩形波のデューティ比を変化させることで振幅を 33 段階で制御する。3 次元上の位置 \mathbf{p}_p で焦点（位相 ϕ_p ）を作るためには、各振動子の位相 ϕ_t は以下のように求められる。

$$\phi_t = \left(-\frac{32}{\pi} k |\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_t| + \phi_p \right) \bmod 64. \quad (1)$$

ここで \mathbf{p}_t は超音波振動子の位置を、 k は波数を表す。この計算はルック・アップ・テーブルによって FPGA 内に実装されている。トラップを生成する場合は、式(1)のように焦点を生成するための位相を計算した後に、上部の振動子のみに位相遅れ π rad を加える（文献[9]と同様）。すると、上下の振動子が互いに打ち消し合うことで位置 \mathbf{p}_p において音圧が最小となり、その上下を高い音圧に挟まれたような音場のパターンが得られ（図 1 右上），結果としてその位置に粒子が浮遊する。位置 \mathbf{p}_p について 40 kHz という高いアップデートレートで更新可能であるため、粒子を高速に移動させることができる。

また FPGA は、パルス幅変調によって LED の輝度を制御する。そのため、粒子を高速に走査する場合でも、粒子の位置および色を正確に制御可能である。粒子の走査スピードが十分に高速であった場合（10 Hz 以上）に、目の残像効果（Persistence Of Vision: POV）によって 3 次元像が得られる。

2.3. 觸覚コンテンツの生成

式(1)で生成した焦点において、音圧を低周波数（今回の実験では 250 Hz）で変調する（もしくは位置を変化させる）ことで、人の手が触覚として感じやすくなる[10]。MATD のシステムでは、計算を簡略化することで 40 kHz という高速なアップデートを実現している。しかし一方で、計算を簡略化して実装したため、浮遊させるためのトラップか触覚を提示するための焦点のうち、どちらか一方のみしか同時に生成できない。そこで、これらを 3 : 1 の割合で時分割多重化することで、あたかも同時に提示しているようにする。

2.4. 聴覚コンテンツの生成

超音波を変調して放射すると、空气中で自己復調現象が生じて可聴音を生成することができる[11]。本システムでは、単側帯波変調と呼ばれる変調方式を、浮遊トラップおよび触覚提示のための焦点の生成と組み合わせて用いることで、視覚・触覚・聴覚のコンテンツを同時に提示可能である。変調度としては 0.2 を用いた。

3. 結果

3.1. 3次元コンテンツの表示結果

MATD で空中に表示可能な 2 次元・3 次元像を図 2 に示す。このようなシンプルな形状であれば 100 ms 以内で描画可能であるため、POV コンテンツとして人の目にも映像として視認できる。結果から、粒子の位置と LED を高速に同期制御できていることが確認できる。さらに図 2 右の画像は、数字を表した視覚コンテンツと同時に、音声も同時に提示したときの様子を撮影したものである。表示する画像はリアルタイムに更新可能であるため、LeapMotion 等の入力デバイスを用いたインタラクティブなシステムとしても利用可能である。

図 3 には、MATD で表示したより複雑な形状を示す。現状の MATD のシステムではこれらの画像を POV の時間 (100 ms) 内に描画することはできため、20 秒の長時間露光により撮影したときの写真を表す。左から順番に、2 次元のラスタ画像、3 次元のベクタ画像、3 次元のラスタ画像を表している。

3.2. 定量評価

まずは MATD の移動最高速度を求めるために、線形スピードテストを行った。-5 cm の位置で静止した状態から一定の加速度で中心点まで移動し、そこから減速して+5 cm の位置で再び静止するように、トラップの位置を移動させる（図 4 左の太線プロット）。このとき、中心点における速度を変更してテストしていく、粒子を浮遊させたまま無事に移動できる速度をテストしたところ、移動最高速度は水平方向に 3.75 m/s、垂直方向に 8.75 m/s であった。また、この実験のときに、LED をストロボのように光らせることで粒子の実際のスピードおよびトラップの位置との距離を測定した（図 4 左）。グラフより、粒子

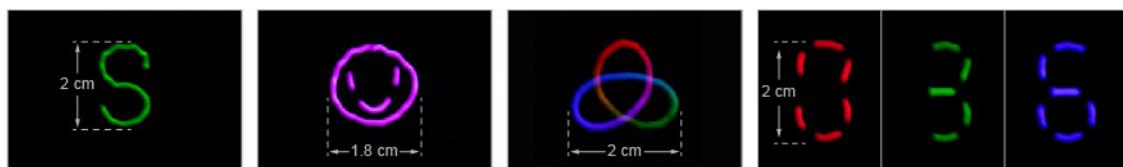


図 2 : MATD で表示可能な POV コンテンツ。左から“S”, “スマイルフェイス”, “3D トーラスノット”, “数字（音声も同時に提示）”を表す（[6]より引用）。

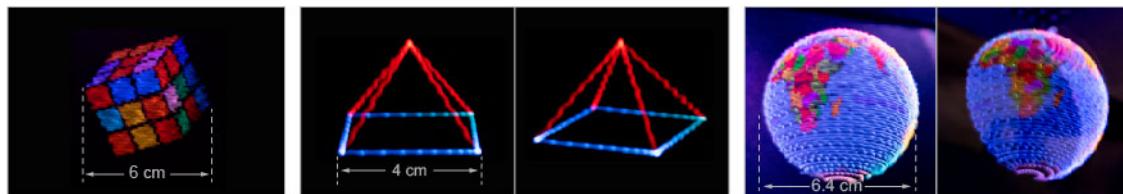


図 3 : 長時間露光撮影。左から“キューブ”, “ピラミッド”, “地球”（[6]より引用）。
はトラップの位置から一定の範囲に常に位置していることが確認できる。

図4 真ん中のグラフは、3Dプリンタのアームに固定したマイクを用いて音圧を測定した結果を示す。人の手を模したシリコンの人差し指に触覚を提示するように焦点を作り、その指の2 mm 下の面をスキャンして音圧レベルをプロットした。このとき同時に、視覚コンテンツを提示するための浮遊トラップも同平面（グラフの左下）に生成している。グラフが示すように、触覚を提示するのに十分な音圧を指に作り出せる。

図4右のグラフは、オーディオとして0 Hzから20 kHzまでのチャーブ信号を入力したときに、MATDが実際に生成したオーディオを測定したときのスペクトログラムを表す。MATDが人の可聴音を十分にカバー可能な領域の音を生成できることが確認できた。

4. まとめ

超音波フェーズドアレイを用いることで、視覚・触覚・聴覚に関するコンテンツを同時に生成できるボリュームディスプレイ（MATD）を構築できることを実験的に示した。現状の MATD システムで生成できる 3 次元像はシンプルな形状（図 2）のみに制限されるが、マルチモーダルな 3 次元ディスプレイとしての可能性を十分に示す結果である。今後の展望としては、本技術の実用化に向けて粒子の並列走査や移動速度の向上などの課題を取り組む。

参考文献

- [1] D. Smalley, T. C. Poon, H. Gao, J. Kvavle, and K. Qaderi, “Volumetric displays: turning 3-D inside-out,” Opt. Photonics News **29**(6), 26–33 (2018).
- [2] H. Kimura, T. Uchiyama, and H. Yoshikawa, “Laser produced 3D display in the air,” In Proc. ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies (2006).
- [3] Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, “Fairy lights in femtoseconds: aerial and volumetric graphics rendered by focused

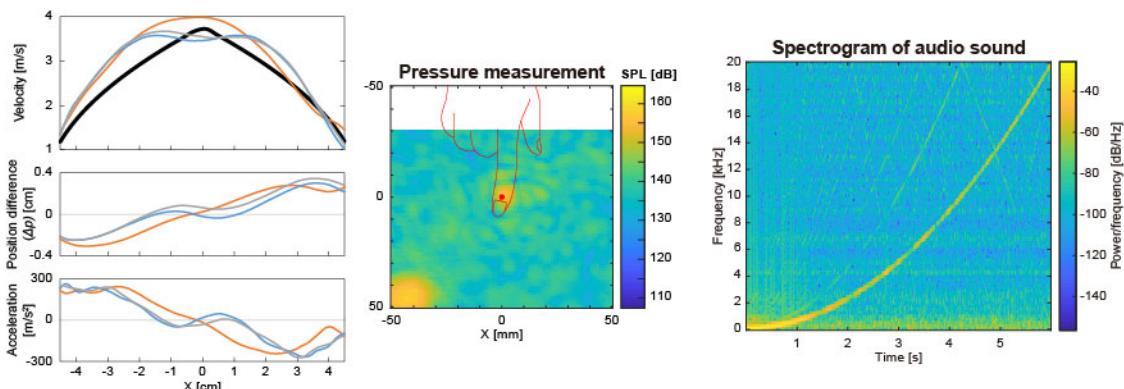


図4：定量評価。左から水平移動速度、音圧測定、オーディオ測定（[6]より引用）。

femtosecond laser combined with computational holographic fields,” ACM Trans.

Graph. **35**, 17 (2016).

- [4] J. Ruiz-Avila, “Holovect: Holographic Vector Display,” Kickstarter <https://www.kickstarter.com/projects/2029950924/holovect-holographic-vector-display> (2016).
- [5] D. Smalley, E. Nygaard, K. Squire, J. V. Wagoner, J. Rasmussen, S. Gneiting, K. Qaderi, J. Goodsell, W. Rogers, M. Lindsey, and K. Costner, “A photophoretic-trap volumetric display,” Nature **553**, 486–490 (2018).
- [6] R. Hirayama, D. M. Plasencia, N. Masuda, and S. Subramanian, “A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping,” Nature **575**, 320–323 (2019).
- [7] T. Fushimi, A. Marzo, B. W. Drinkwater, and T. L. Hill, “Acoustophoretic volumetric displays using a fast-moving levitated particle,” Appl. Phys. Lett. **115**, 064101 (20019).
- [8] J. Berthelot and N. Bonod, “Free-space micro-graphics with electrically driven levitated light scatterers,” Opt. Lett. **44**, 1476–1479 (2019).
- [9] A. Marzo and B. W. Drinkwater, “Holographic acoustic tweezers,” Proc. Natl Acad. Sci. USA **116**, 84–89 (2018).
- [10] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, Drinkwater, and S. Subramanian, “UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces,” In Proc. UIST 2013 505–514 (ACM, 2013).
- [11] W. S. Gan, J. Yang, and T. Kamakura, “A review of parametric acoustic array in air,” Appl. Acoust. **73**, 1211–1219 (2012).

第 27 回ディスプレイ国際ワークショップ
The 27th International Display Workshops (IDW '20)

主催： 映像情報メディア学会（ITE）、The Society for Information Display (SID)
 協賛（予定）： 電子情報通信学会、照明学会、電気学会、画像電子学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本化学会、電気化学会、応用物理学会、日本人間工学会、日本液晶学会、日本画像学会、高分子学会、International Electrotechnical Commission、日本光学会、自動車技術会、日本視覚学会、計測自動制御学会、情報処理学会、人工知能学会、ヒューマンインターフェース学会

会期： 2020 年 12 月 9 日（水）～ 11 日（金）

会場： オンライン開催

会議の構成：

本会議は、ディスプレイ技術分野の国際ワークショップとして3日間の会期で開催致します。初日の基調講演は、日本放送協会 放送技術研究所 所長 三谷公二様より同研究所が研究を進めているダイバースビジョンを中心に、同研究所が想定する放送技術の未来像について御講演をいただきます。続いて、ソニー株式会社 R&Dセンター チーフUIデバイスリサーチャー 野本和正様より同社のディスプレイを中心とした映像テクノロジーをご紹介いただくとともに、ディスプレイの将来的な位置付け・展望等について御講演いただきます。更に、窒化物半導体およびデバイスの分野で著名なカリフォルニア大学サンタバーバラ校の Steven DenBaars 教授より、ディスプレイ技術における窒化物発光デバイスの現状について将来展望を含めて包括的に御講演いただきます。なお、今年も新しい技術のためのトピカルセッションとして、Artificial Intelligence and Smart Society を設けます。本会議では、複数の技術分野に関する下記の4つのスペシャルトピックス(1) AR/VR and Hyper Reality、(2) Automotive Displays、(3) Micro/Mini LEDs、(4) Quantum Dot Technologies に関する発表を特に歓迎し、集中的な発表の場を設けます。

本年度も発表者による Innovative Demonstration Session (I-DEMO) を引き続き設け、発表内容の大規模な展示の場を提供いたします。尚、オンライン開催の場合には、上記プログラムが一部変更になる可能性があります。

詳しくは <https://www.idw.or.jp/> をご覧ください。

会議用語： 英語

参加申込み： <https://www.idw.or.jp/>

各種期日：

Technical Summary 投稿締切日	8月20日
論文採否通知	9月16日
Camera-Ready 予稿締切日	10月1日
Late-News 予稿締切日	10月1日
早期割引参加登録締切日	10月30日
事前参加登録締切日	11月27日

※期日は、変更になる可能性があります。予めご了承ください。

問い合わせ：
 IDW '20 事務局（バイリンガル・グループ内）
 〒102-0074 東京都千代田区九段南 3-3-6
 TEL： 03-3263-1345 FAX： 03-3263-1264
 E-mail : idw@idw.or.jp

令和2年第2回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■開催日： 2020年8月7日（金）13:30～

■場所： Zoomによるオンライン開催

■テーマ 立体ディスプレイおよび空中ディスプレイの最新動向と将来展望

■プログラム

13:30-13:40 開会挨拶

13:40-14:10 坂本 雄児（北海道大学）

「計算機合成ホログラム表示像の視覚的特性に関する研究」

14:10-14:40 熊谷 幸汰（宇都宮大学）

「ホログラフィックレーザー励起型ボリュメトリックディスプレイ」

14:40-14:55 休憩

14:55-15:25 山本 裕紹（宇都宮大学）

「空中ディスプレイの開発と社会実装の取り組み」

15:25-15:55 中山 弘敬（国立天文台）

「立体ドームスクリーン向けの流体データ可視化手法の提案」

15:55-16:10 休憩

16:10-16:40 平山 竜士（UCL）

「超音波によるマルチモーダルボリュームディスプレイ」

16:40-16:50 情報コーナー、閉会

■研究会参加申込 事前申込

■参加費 会員、非会員、ともに 無料

■問合せ先

- HODIC 事務局 日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付
E-mail: office@hodic.org

令和2年第3回ホログラフィック・ディスプレイ 研究会のお知らせ／講演募集

ホログラフィック・ディスプレイ研究会では、2020年9月25日（金）に公募形式の研究会を開催します。今回は「立体映像およびホログラフィー」というテーマで、技術・アート・デザイン等の観点での発表を公募します。下記の申込み方法をご参照の上、ぜひご応募下さい。

■開催日： 2020年9月25日(金) 午後を予定

■場 所： Zoomによるオンライン開催

■テーマ： 立体映像およびホログラフィー

■共 催： 映像情報メディア学会

　　映像表現&コンピュータグラフィックス研究会

　　立体映像技術研究会

■発表申込方法：

申し込みについては、共催の映像情報メディア学会の研究会発表申込システムを使用します。申し込み方法等が不明な場合は、下記までご連絡ください。

・映像情報メディア学会のWEBページより（研究会発表申し込みシステム）

<http://www.ite.or.jp/> → 「投稿する/参加する」→ 「研究会」→ 「研究発表のお申し込み方法」　映像表現&コンピュータグラフィックス研究会 または 立体映像技術研究会 を選択

または以下のURLへアクセス。

<http://www.ite.or.jp/ken/program/index.php?tgid=OSJ-HODIC>

・講演申込み締め切り：2020年8月12日（水）

■ 問合せ先

・研究会について： e-mail meeting@hodic.org

・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail office@hodic.org

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻内 順平	会 長	伊藤 智義（千葉大学）
副 会 長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前 会 長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（東京都立大学）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編 集 長	吉川 浩（日本大学）		

幹 事（50音順）

石井勢津子（美術家）	石川 淳（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	太田 和哉（トリマティス）	鎌田 康昌（凸版印刷）
坂本 雄児（北海道大学）	佐藤 甲癸	佐藤 俊一（シャープ）
下馬場朋禄（千葉大学）	白木 厚司（千葉大学）	白倉 明（アーティエス・ラボ）
高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）	谷口 幸夫（大日本印刷）
福田 隆史（産総研）	松島 恭治（関西大学）	三科 智之（日本放送協会）
山口 健（日本大学）	山口 雅浩（東京工業大学）	渡邊恵理子（電気通信大学）

相 談 役（50音順）

上田 裕昭（コニカミルタブ ラネリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田和歌工房）	酒井 朋子（千葉大学）
永田 忠昭（arts-unis）	三田村畯右	堀内 道夫（光と風の研究所）
本田 捷夫（本田ひかり技研）		

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の1ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 40, No. 2 (Aug. 2020) 2020年 8月 7日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)
〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたはFAXにてお願ひいたします。

For foreign members, any corresponding to
Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University
7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN
E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

HODIC