

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：12201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K23338

研究課題名（和文）フェムト秒レーザー励起プラズマの再結像を用いた空中ポリュメトリックディスプレイ

研究課題名（英文）Aerial volumetric display using re-imaging of femtosecond-laser-excited plasma

研究代表者

熊谷 幸汰（Kumagai, Kota）

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・助教

研究者番号：90879628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：空中再結像による描画空間と視認空間の分離を用いて、フェムト秒レーザー励起ポリュメトリックディスプレイのカラー化に関する研究を行った。本研究では、レーザー励起プラズマの発光色が可視領域を網羅している点に注目し、任意色を抽出できるデバイスの作製と、それを適用したディスプレイシステムを構築した。システムは、画素単位でカラー化できる体積映像表示を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポリュメトリックディスプレイは、人や物と映像が実空間において共存するような社会を実現する可能性を有しているが、物体が当たり前にもつ数多くの性質を映像として表現するために、いまだ研究段階にある分野である。空中体積映像の色表示に取り組んだ本研究により得られた技術は、映像に体積的な3D情報と実空間とのシームレスな関係に加えて、色情報を付加できるものであり、分野の発展に寄与する成果である。

研究成果の概要（英文）：This project have studied colorization of femtosecond-laser-excited volumetric display using aerial re-imaging to separate the drawing space from the viewing space. In this study, we focused on the fact that the emission color of the laser-excited plasma covers the visible region, fabricated a re-imaging device that can extract arbitrary colors, and constructed a display system in which the device is applied. The system realized a aerial volumetric image that can be colored voxel by voxel.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ポリュメトリックディスプレイ フェムト秒レーザー 計算機プログラム

## 1. 研究開始当初の背景

体積的画素(ボクセル)を実空間に生成することで映像を表示する技術は、ポリュメトリックディスプレイと呼ばれ、実空間 3D 映像を実現する新たな映像インタフェースとして研究が進んでいる。レーザー励起プラズマをボクセルとして採用したディスプレイは、空中体積映像のみならず、タッチインタラクション、物体に直接映像を重畳する実空間 AR を実現した。しかし、ボクセルとなる空中プラズマが青白色発光であるため、体積映像の色表示は単色に限定されている。また、空気中におけるレーザー励起ボクセルの生成は、高いパルスエネルギーを必要とするため、映像サイズとボクセル数が制約される。ここで、色表示を達成するために注目したのは、ボクセルの発光色が可視領域を網羅している点である。レーザー励起ボクセルの発光色から任意の色を抽出する機構の開発が、空中体積映像のカラー化に繋がると考えた。さらに、空気よりも少ないパルスエネルギーでボクセル生成を可能にする材料を選定し、ユーザと映像とのシームレスな関係を妨げずに配置できる構成とすれば、映像サイズとボクセル数向上が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究は、フェムト秒レーザー励起ボクセルの再結像を用いた描画空間分離(DSS: drawing space separation)に基づく、色表示可能な空中ポリュメトリックディスプレイの実現を目的とする。DSS のコンセプトは、空気中に描画された映像に対して、空中再結像機構を設けることで、映像が描かれる空間(描画空間)とユーザがそれを視認する空間(視認空間)を分離し、色抽出と材料充填を達成することである。DSS を実現するデバイス作製、ポリュメトリックディスプレイシステムの構築、原理検証実験を通して、本コンセプトの体積映像のカラー化と映像サイズおよび画素数向上に対する有効性を実証する。

## 3. 研究の方法

DSS を実現するための空中再結像デバイスを作製し、これを適用したポリュメトリックディスプレイシステムを構築する。カラー化に対する DSS の有効性を、再結像されたボクセルを観察することで確認する。ここで、より明るく、サイズの大きい映像を得るために、描画空間に充填する材料を、発光輝度とレーザーの照射条件の関係を調べることで探索する。計算機上で設計されたボクセル位置と色情報に基づき、ディスプレイシステム上のボクセル走査および色抽出デバイスをコントロールする、カラー体積映像描画ソフトウェアを作製する。これにより、ボクセルの生成位置と発光色を任意に変更できる。以上の取り組みで構築されたディスプレイシステムと描画ソフトウェアを用いて、任意の色表示を可能とする空中ポリュメトリックディスプレイを実現する。

## 4. 研究成果

### (1) DSS に基づくポリュメトリックディスプレイシステムの構築

図 1(a)に示すように、空中再結像デバイスが適用されたポリュメトリックディスプレイシステムを構築した。本システムにおいて、体積映像はフェムト秒レーザーの集光照射により励起された空中発光点の高速走査に基づく残像効果により形成された。フェムト秒レーザーパルスは、計算機ホログラム(CGH: computer-generated hologram)が表示された液晶空間光変調素子(LCOS-SLM: liquid crystal on silicon spatial light modulator)により位相変調され、3D ビームスキャナを通過後、描画空間に集光照射されることでボクセルを生成した。描画空間に生成されたボクセルは、図 1(b)に示すように、2つの放物面鏡と LC カラーフィルタから構成される再結像デバイスを通過することで、発光色のうち任意色のみが映像空間に表示された。CGH によるレーザー光の位相変調は、集光点の多点同時生成に寄与し、単位時間あたりに生成可能なボクセル数を増加させる。3D ビームスキャナはガルバノスキャナと可変焦点距離レンズから構成され、集光点の 3D 走査を可能にする。描画空間に充填する材料は、研究成果(2)の取り組みを通して、キセノンガスが封入されたガラスセルが選定された。

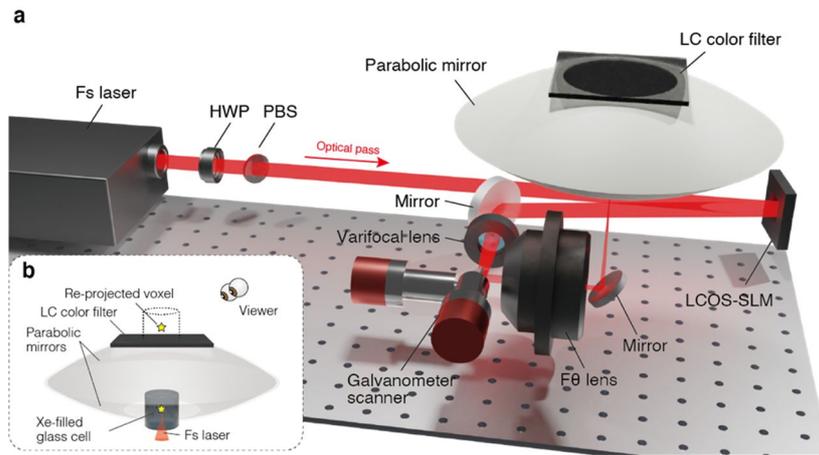


図1 (a) DSSに基づくポリュメトリックディスプレイ．(b) 空中再結像デバイス．

## (2) ボクセルのカラー化と材料探索

フェムト秒レーザーの集光により得られた空気中の発光から，構築されたディスプレイシステムが任意色を抽出できるか検証した．図2(a)は，再結像された空中ボクセルを示す．LCカラーフィルタに与える画素値( $r, g, b$ )を変化させることにより，視認されるボクセルは，対応する発光色が効果的に抽出された．システムは，任意の色で空気中にボクセルを生成できることが確認された．明るく，サイズの大きい映像を得るために，描画空間に充填する材料を探索した．可視領域を網羅する発光波長とその高い発光輝度，励起に必要なエネルギーしきい値を低減する観点から，キセノンガスに注目した．図2(b)は，空気とガラスセルに封入されたキセノンガスそれぞれを励起対象として，生成された発光点の入射フルエンスに対する発光輝度の変化である．キセノンガス中の発光は，照射フルエンス強度に対して劇的な輝度変化を示し，空気中で発光がはじまる  $19 \text{ mJ/cm}^2$  においておよそ 200 倍明るく観察され，その生成しきいエネルギー値も 66 % 削減された．図2(c)は，発光点の走査によりキセノンガス中描画されたりサーージュ図形である．実験室の照明環境下においても，十分に視認できるレベルの明るいボクセルを生成できることが確認できたため，充填する材料としてキセノンを採用した．

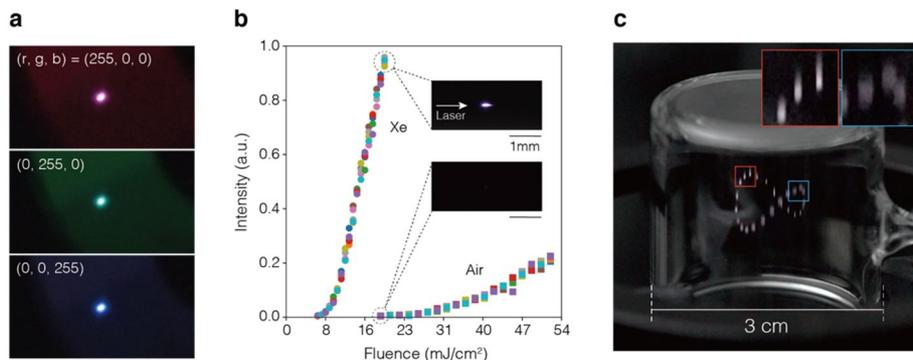


図2 (a)再結像により得られた空中ボクセル．(b)照射フルエンスに対する空気およびキセノンガスにおけるボクセル発光輝度．(c)キセノンガス中に生成されたりサーージュ図形．

## (3) カラー体積映像描画

構築されたディスプレイシステムを用いて，カラー体積映像の描画実験を実施した．図3は，2603 voxel から構成される 3D モデルの頂点座標を用いて描画された空中体積映像である．このとき照射パルスエネルギーは  $203 \mu\text{J}$ ，露光時間は  $5 \text{ s}$  であった．これらの映像は，層状にスライスされた 3D 点群データの 2D 断面を積層することで描画され，走査経路は，各層で頂点間の走査距離が最短になるルートが与えられた．映像の色は，異なる画素値( $r, g, b$ )を LC カラーフィルタ一面に与えることで変更された．結果より，DSS に基づくディスプレイシステムは，体積映像の任意色表示に対する有効性が実証された．

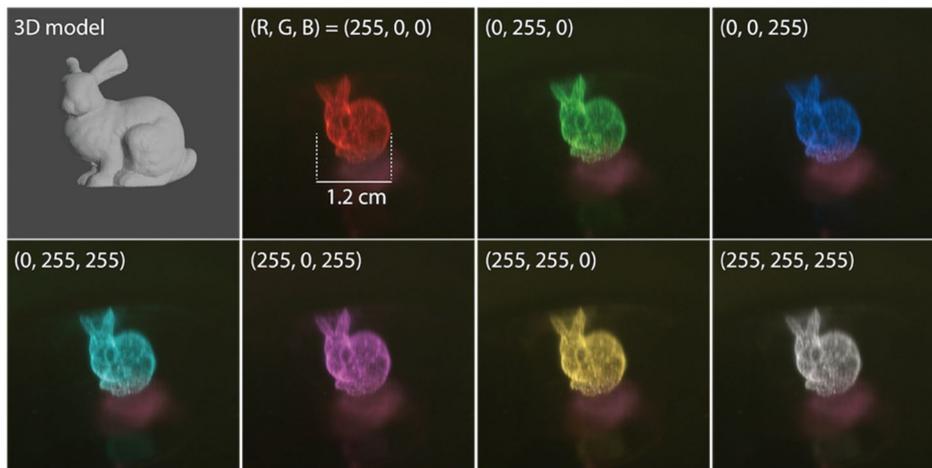


図3 空中に表示されたウサギのカラー体積映像 .

3D モデルの頂点位置と色情報に基づき、ディスプレイシステム上のボクセル走査および再結像デバイスを同期してコントロールするソフトウェアを開発し、体積映像描画とボクセルごとのカラー化を実施した . 図 4 は、頂点ごとに異なる色情報を有する 3D 点群データに基づき描画された映像であり、それぞれ露光時間 25 s で撮影された . 図 4(a)の球は、472 voxel で構成され、7つの異なる色情報をボクセルごとに与えられた . また、図 4(b)の花は、1206 voxel で構成され、茎と花びらとその中心部に異なる 3 色が与えられた . ボクセルの生成位置と LC カラーフィルタによる色切り替えの同期コントロールは、ボクセル単位でカラー化された体積映像表示を実現した .

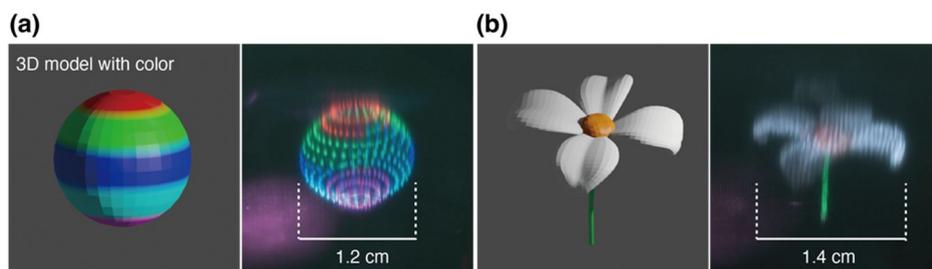


図 4 ボクセルごとにカラー化された(a)球と(b)花の体積映像 .

#### (4) CGH を用いたボクセルの多点同時生成

図 5 は、単一集光点および CGH による 4 点の多点同時生成集光点を用いて描画された体積リサージュ図形であり、20 fps の動画として撮影されたうちの 1 フレームである . 図 5(a)は、キセノンガスが充填されたガラスセル内に、単一集光点により生成されたボクセルと映像である . 図 5(b)は、CGH を用いて形成された 4 点のボクセルと、それを用いて描画された映像である . それぞれの集光点は、可変焦点距離レンズを無限遠に設定したときに、描画空間において光軸から 284  $\mu\text{m}$  離れるように配置された . 結果より、多点同時生成集光点は、単一集光点に比べ、より高密度にボクセルが充填された映像を生成した . 我々は、CGH により生成された多点同時生成集光点が、単位時間あたりに生成されるボクセル数増加に寄与し、さらに、体積映像描画に適用できることを実証した .

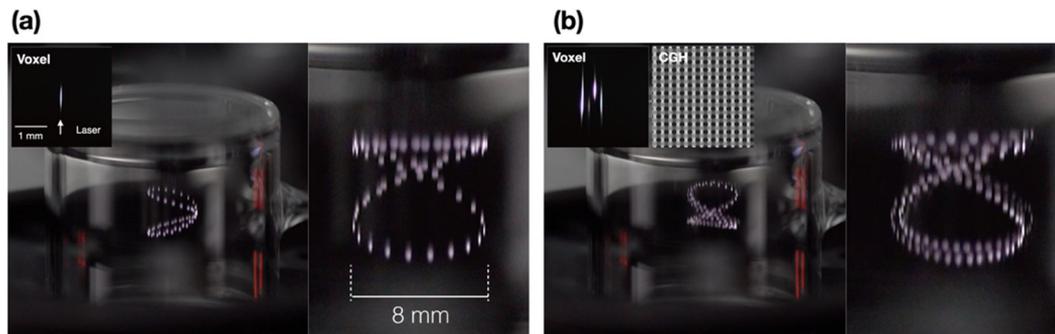


図 5 (a)単一および(b)CGH による 4 点同時生成された集光点を用いて描画された体積リサージュ図形 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kota Kumagai, Shun Miura and Yoshio Hayasaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Colour volumetric display based on holographic-laser-excited graphics using drawing space separation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-02107-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kota Kumagai	4. 巻 28
2. 論文標題 Volumetric bubble display with a gold-nanoparticle-containing glycerin screen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 33911-33920
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.405297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kota Kumagai, Shun Miura and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Volumetric display with multicolor based on re-imaging of aerial graphics rendered by femtosecond laser excitation
3. 学会等名 The 21st International Meeting on Information Display (IMID2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Color volumetric display based on drawing space separation
3. 学会等名 The 11th Japan-Korea Workshop on Digital Holography & Information Photonics (DHIP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Holographic-laser-excited volumetric display with re-projected aerial graphics based on drawing space separation
3. 学会等名 International Workshop on Holography and Related Technologies (IWH2021) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 計算機ホログラムとフェムト秒レーザー励起ボクセルを用いたポリュメトリックディスプレイ
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第41回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 三浦駿, 早崎芳夫
2. 発表標題 放物面鏡による再結像を用いたレーザー励起ポリュメトリックディスプレイ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 對馬優斗, 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 ホログラフィック紫外フェムト秒レーザー励起型体積ディスプレイ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦拓真, 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 フェムト秒レーザー誘起音を利用したレーザー焦点位置の適応的制御
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 希ガス充填描画空間の空中投影を用いた多色体積映像
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 描画・視認空間分離に基づく空中体積映像の多色化と像サイズ拡大
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 三浦拓真, 早崎芳夫
2. 発表標題 フェムト秒レーザー穴あけ加工における誘起音強度を用いた対物レンズ位置の制御
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Kumagai, Shun Miura and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Volumetric graphics of microbubble
3. 学会等名 SPIE/COS Photonics Asia 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuma Miura, Kota Kumagai, Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 In-process observation of femtosecond laser processing with induced acoustic waves
3. 学会等名 The 22nd International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Kumagai, Shun Miura and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Laser-excited volumetric display using aerial re-imaging by parabolic mirrors
3. 学会等名 SPIE Digital Optical Technologies (DOT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Kumagai, Shun Miura and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Aerial re-imaging of femtosecond-laser-excited graphics for volumetric display
3. 学会等名 Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kota Kumagai web  
<https://kotakumagai.uu-core.com/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------