5章 エアリアルプラズマディスプレイ

早崎 芳夫^{†1}, 熊谷 幸汰^{†1}, 長谷川智士^{†1}, 落合 陽一^{†2, †3}, 星 貴之^{†3}

キーワード: フェムト秒レーザ, 計算機ホログラム, レーザ生成プラズマ, バーチャルリアリティ, 視触覚融合, 体積ディスプレイ

1. まえがき

体積ディスプレイは, SF映画の重要な場面で登場し, その実現は, われわれディスプレイ研究者にとっての夢の一つである. SF映画における体積像の利用法の変化は, 研究者にとって興味深い. 当初, 体積像は, 単に2次元映像の3次元拡張であり, 複数人による体積像の共有と, 体積像と音声の重量による外界との情報共有手段として利用された. 近年では, 体積像を媒体とした人工知能との高度インタフェースや, 脳内映像の表現方法として使われている. 気になることは, 1980年代のSF映画では, カラーの体積像であったのに対して, 近年のSF映画では, モノカラーか, 彩度の低い体積像である. 体積像のフルカラー化は, SF映画の製作者ですらリアリティのない技術として感じるほどのチャレンジングなテーマであるのかもしれない. 本稿の主題であるエアリアルディスプレイも, 情報伝達のための役割を超えて, 人と体積像の背後にある計算機や情報ネットワークとのインタラクションを指向している. 筆者らのシステムも, 現状ではモノカラーであり, 特殊な気体を使うことによるカラー化は次のテーマである.

体積ディスプレイ¹⁾は, 現実空間中に3次元像を描画する. それゆえに, 特殊なデバイスを装着することなく, 全方向からその体積像を観察でき, 2次元スクリーンに基づく立体表示技術^{2)~5)}と比較して, 身体的・知覚的不快感は少ない. これまで, 多様な形式の体積ディスプレイが発表され, 今も次々と, 新方式の体積ディスプレイが登場するホットな研究開発領域である. それらは, 体積像を構成する画素(ボクセルと呼ばれる)の光学的な特徴で, 光散乱タイプまたは発光タイプの二つに分類される. 光散乱タイプでは,

回転投影スクリーン⁶⁾⁷⁾, 水流⁸⁾, 霧⁹⁾, 微小粒子¹⁰⁾が用いられた. これらの体積ディスプレイでは, 投影像により体積像を形成するため, 多色化を容易に実現できる. 発光タイプでは, 光ファイバ¹¹⁾, レーザ生成プラズマ¹²⁾, 量子ドット¹³⁾¹⁴⁾, 希土類金属¹⁵⁾¹⁶⁾, 蛍光分子により形成されるボクセルが用いられた.

筆者らは, これまでに, 3種のスクリーン(固体, 液体, 気体)による光アクセス型体積ディスプレイを実現した^{17)~19)}. 2015年, 筆者らの最初の体積ディスプレイ¹⁷⁾は, 二つの重要な特徴を持っていた. 一つは, 固体の多層蛍光スクリーンであり, 各層の蛍光色素を変えることでカラー表示を可能にした. もう一つは, 単位時間あたりの描画ボクセル数を増加するためのホログラフィック並列2光子励起であった. 2016年, 本稿の主題である, フェムト秒レーザ生成プラズマをボクセルとする空中体積ディスプレイを発表した¹⁸⁾. その利点は, フェムト秒レーザの利用により, 低エネルギーで空中プラズマ発光を誘起できることによる, 空中映像に触れられることである. さらに, 触れたときの輝度値の変化による, 描画する映像を切り替えるタッチインタラクションの実現である. そして, 2017年, レーザ生成マイクロバブルをボクセルとする体積ディスプレイを発表した. 高粘性液体の使用が, 液体中に体積像を描画することを可能にした¹⁹⁾.

2. ホログラフィック並列光アクセスに基づく体積ディスプレイの構成

光アクセス型体積ディスプレイは, 光源, 光変調部, スクリーンの三つの要素から構成され, それらの間に有線の接続がないため, 並列で再構成が容易な接続を可能にする. 結果として, 高速なアクセスと多様な物質へのアクセスを可能にする. 単位時間あたりのボクセル数と定義される描画速度を向上するために, 図1に示すような, 液晶空間光変調素子(LCSLM: Liquid Crystal Spatial Light Modulator)に表示された計算機ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)を用いたホログラフィック並列光アクセス²⁰⁾が体積表示に適用された. N_{fr} を単位時間あたり

^{†1} 宇都宮大学 オプティクス教育研究センター

^{†2} 筑波大学 デジタルネイチャー 推進戦略研究基盤

^{†3} ピクシーダストテクノロジーズ株式会社

"Aerial Plasma Display" by Yoshio Hayasaki, Kota Kumagai, Satoshi Hasegawa (Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University, Tochigi), Yoichi Ochiai (Strategic Research Platform towards Digital Nature, University of Tsukuba, Ibaraki/Pixie Dust Technologies, Inc., Tokyo) and Takayuki Hoshi (Pixie Dust Technologies, Inc., Tokyo)

図1 ホログラフィック並列光アクセス

の体積像の数(フレームレート), N_{rep} を単位時間あたりのレーザ照射回数, N_{para} を並列アクセス数とすると, 1体積像を構成するボクセル数 N_{voxel} は, $N_{voxel} = N_{para}N_{rep}/N_{fr}$ である. 動画表示を考えると, N_{fr} と N_{voxel} は, 共に多いほど良い. N_{voxel} を増加する方法は, N_{rep} を決めるレーザの繰り返し周波数を増加し, N_{para} を大きくすることであるが, レーザパワーを P_{laser} , そのボクセルを形成するために必要な励起エネルギー E_{ex} とすると, $N_{para}N_{rep} = P_{laser}/E_{ex}$ の関係となるので, 体積ディスプレイのためには, $E_{ex} > P_{laser}/N_{rep}$ となるように, P_{laser} と N_{rep} の大きなレーザ(ハイパワー高繰り返しレーザ)が選択される. その際, 高すぎる N_{rep} は, ビームスキャナと光スイッチング素子に高い性能を要求するので, N_{para} を増やすことで, そのスクリーン材料に最適な照射条件が決められる.

3. 実験システム

図2に, ボリュームディスプレイシステムを示す. そのシステムは, 主に, レーザ光源, LCSLM, 3D光スキャナから構成される. レーザ光源は, 中心波長800 nm, 繰り返し周波数1 kHz, パルス幅35 fs, 出力7 Wの再生増幅型フェムト秒レーザ(Micra and Legend Elite Duo, Coherent)である. 一部の実験で, 中心波長1045 nm, 繰り返し周波数200 kHz, パルス幅269 fs, 出力10 Wのファイバレーザ(FCPA Jewel DE1050, IMRA America)も用いた. LCSLMは, 空間光位相変調素子(X8267, 浜松ホトニクス)を用いた. 3D光スキャナは, 2Dガルバノスキャナ(GM-1010, キヤノン)と可変焦点距離レンズ(EL-10-30-C, Optotune)から構成された.

フェムト秒レーザから出射されたレーザパルスは, LCSLMに表示されたCGHにより多点同時集光を実行するために空間的位相変調された. その後, 2枚のレンズによりビーム径の縮小とともにガルバノスキャナに結像され, 2枚のレンズにより可変焦点距離レンズの瞳面に拡大結像された. 可変焦点距離レンズと対物レンズにより空气中に集光された. 集光点は, 空中プラズマによる立体映像を描画するために3D光スキャナにより高速走査された.

図2 体積ディスプレイシステム

4. 実験結果

図3は, 1 kHzでレーザ照射しながら, 3D光スキャナによる高速ビーム走査を用いて, 体積的に生成されたプラズマ発光である. 表示領域は数mm角程度であった. 図4は, 照射パルスエネルギーに対するプラズマ発光強度を示す. パルス幅30fsのフェムト秒レーザの場合, 0.2 mJでプラズマが生成され, レーザのエネルギーの増加にともない発光強度も増加した. これは, パルス幅100fsのフェムト秒レーザを用いた場合よりも, 少ないエネルギーで発光し, 同一照射エネルギーに対して高い発光強度であった. 図5(a)は, ホログラフィック並列光アクセスにより多点同時に発生した時の, 励起エネルギーに対するプラズマ発光強度を示す.

図3 レーザ照射の高速ビーム走査による体積的に生成したプラズマ発光

図4 照射パルスエネルギーに対するプラズマの発光強度

(a) 空中プラズマの指輪への接触による点から“星”

(b) 指と円筒状の“3次元リサージュ図形” (c) 種からの“芽吹き”

図6 空中プラズマ画像

(a)

(b)

図5 (a) 励起エネルギーに対するプラズマ発光強度、(b) 並列励起されたプラズマの側方撮影像

図5(b)は並列に励起されたプラズマの発光の様子であり、現システムでは、4点の並列プラズマを観測した。

レーザープラズマは発光だけではなく、可聴域の音も放射する。音と照射パルスエネルギー、パルス幅、プラズマ発光強度の関係を調べた。音は、プラズマから20 mm離れた位置で、騒音計(NL-52, リオン)により計測された。計測時の背景音量は55.7 dB SPLであった。本実験での最短パルス幅である40 fsのパルスを用いた時に、最大音量77.2 dB

SPLであり、発光強度も高かった。パルスエネルギーの増加に伴って、プラズマ発光強度と発生音量とも増大した。

図6(a)は、弧を描く空中映像に指輪を近づけると触れた瞬間に星形のセンターストーンになる。空中映像が指輪に触れた瞬間の輝度値の増加をカメラで検出して描画画像を変更した。図6(a)は、3次元リサージュ図形である。画像を体積化することでその人への情報提示力は増大する。図6(c)は、種から発芽する様子を描画したものであり、芽を空中映像で表現した。これらの実験は、空中プラズマ映像が、観るだけでなく、新しいインタフェース媒体になることを示す。

5. むすび

本稿では、空気中でのフェムト秒レーザー生成プラズマを用いた体積ディスプレイとその特徴や特性について述べた。今後の課題は、現システムの1 cm角程度の表示領域の拡大である。ボリュームディスプレイの三つの構成要素である光源、光変調部、スクリーンのそれぞれについて考える。まず、光源に関して、単位時間に生成できるボクセルの最大数は、レーザーの出力を励起エネルギーで割った値であるので、レーザー出力を増加することに加えて、励起エネルギーを下げる必要がある。そのために、空中プラズマの高い発光を得るための最適なパルス形状の探索や、空気に特定の原子や分子を加えて、励起エネルギーを下げることである。光変調部は、集光光学系とビーム走査光学系、ホログラムを表示する空間光変調素子を含む。まず、集光光学系の焦点距離を長くすることにより、ビーム走査領域を拡大する。しかし、励起に必要なエネルギーの増加を伴う集光スポットサイズの拡大を抑えるために、口径の大きなレンズを使うことで、可能な限り開口数を下げることなく、焦点距離を長くする。3次元スキャナの高速化も

重要である。空間光変調素子の性能は、その速度や空間分解能も充分でないが、着実な進歩を期待したい。スクリーンに関しては、励起エネルギー低下やカラー化のために、多くの工夫の余地があるので、レーザパルスの時間的制御、照射光学系の工夫、材料探索をあわせ、研究を進めて行く。

(2018年4月2日受付)

〔文 献〕

- 1) B.G. Blundell and A.J. Schwarz: "The classification of volumetric display systems: characteristics and predictability of the image space", IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. **8**, 66-75 (2002)
- 2) S. Tay, P.-A. Blanche, R. Voorakaranam, A.V. Tunc, W. Lin, S. Rokutanda, T. Gu, D. Flores, P. Wang, G. Li, P. Sr Hilaire, J. Thomas, R.A. Norwood, M. Yamamoto, N. Peyghambarian: "An updatable holographic three-dimensional display", Nat. Lett. **451**, 694-698 (2008)
- 3) J. Son, B. Lee, O. Chernyshov, K. Moon and H. Lee: "Holographic display based on a spatial DMD array", Opt. Lett. **38**, 3173-3176 (2013)
- 4) T. Kozacki and M. Chlipala: "Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM", Opt. Express. **24**, 2189-2199 (2016)
- 5) I.E. Sutherland: "A head-mounted three dimensional display", Proc. Fall Joint Computer Conf. 757-764 (1968)
- 6) G.E. Favalora, J. Napoli, D.M. Hall, R.K. Dorval, M.G. Giovino, M.J. Richmond, W.S. Chun: "100 Million-voxel volumetric display", Proc. SPIE **4712**, 300-312 (2002)
- 7) A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, P. Debevec: "Rendering for an interactive 360° light field display", ACM Trans. Graph., **26**, 1-10 (2007)
- 8) P.C. Barnum, S.G. Narasimhan and T. Kanade: "A multi-layered display with water drops", ACM Trans. Graph., **29**, 1-7 (2010)
- 9) I. Rakkolainen, S. DiVerdi, A. Olwal, N. Candussi, T. Hüllerer, M. Laitinen, M. Piirto and K. Palovuori: "The interactive fog screen", Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies (ACM, 2010), p.8
- 10) Y. Ochiai, T. Hoshi and J. Rekimoto: "Pixie dust: Graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field", ACM Trans. Graph., **33**, 1-13 (2014)
- 11) D.L. MacFarlane: "A volumetric three dimensional display", Appl. Opt. **33**, 7453-7457 (1994)
- 12) H. Kimura, T. Uchiyama and H. Yoshikawa: "Laser produced 3d display in the air", Proceeding of ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies (ACM, 2006), p.20
- 13) I.T. Lima, Jr.: "Volumetric display based on two photon absorption in quantum dot dispersions", J. Display Technol. **6**, 221-228 (2010)
- 14) R. Hirayama, M. Naruse, H. Nakayama, N. Tate, A. Shiraki, T. Kakue, T. Shimobaba, M. Ohtsu, T. Ito: "Design, implementation and characterization of quantum-dot-based volumetric display", Scientific Reports **5**, 1-6 (2015)
- 15) E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston and R. Macfarlane: "A three-color, solid-state, three dimensional display", Science **273**, 1185-1189 (1996)

- 16) T. Honda, T. Doumuki, L. Galambos and L. Hesselink: "One-color one-beam pumping of Er³⁺-doped ZBLAN glasses for a three-dimensional twostep excitation display", Opt. Lett. **23**, 1108-1110 (1998)
- 17) K. Kumagai, D. Suzuki, S. Hasegawa and Y. Hayasaki: "Volumetric display with holographic parallel optical access and multilayer fluorescent screen", Opt. Lett., **40**, 3356-3359 (2015)
- 18) Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, Y. Hayasaki: "Fairy lights in femtoseconds: aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields", ACM Trans. Graph. **35**, 1-14 (2016)
- 19) K. Kumagai, S. Hasegawa and Y. Hayasaki: "Volumetric bubble display", Optica **4**, 298-302 (2017)
- 20) Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita and N. Nishida: "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator", Appl. Phys. Lett. **87**, 031101 (2005)

早崎 芳夫 1993年、筑波大学大学院工学研究科。同年、理化学研究所フォトダイナミクス研究センター。1995年、徳島大学工学部光応用工学科。2008年、宇都宮大学オプティクス教育研究センター、2011年、同大学教授となり、現在に至る。専門は、情報フォトニクス、計算イメージング、レーザ加工。博士(工学)。

熊谷 幸汰 2014年、宇都宮大学工学部情報工学科卒業。2016年、同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学博士後期課程在学中、日本学術振興会特別研究員DC1。3Dディスプレイの研究に従事。

長谷川智士 2010年、宇都宮大学大学院工学研究科博士課程修了。同年、同大学オプティクス教育研究センター特任研究員。2014年、同大学大学院工学研究科先端光工学専攻助教となり、現在に至る。専門は、レーザ加工、光情報処理、および光計測。博士(工学)。

落合 陽一 2015年、東京大学学際情報学府博士課程修了。ピクシーダストテクノロジーズ(株)代表取締役CEO。筑波大学デジタルネイチャー推進戦略研究基盤代表/准教授。専門はCG, HCI, VR, 視・聴・触覚提示法、デジタルファブリケーション、自動運転、身体制御など。博士(学際情報学)。

星 貴之 2008年、東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。ピクシーダストテクノロジーズ(株)取締役CTO。超音波フェーズドアレイによる非接触触覚提示、3次元音響浮遊、集束スピーカのほか、光や磁力などを用いた間制御技術の研究開発に従事。博士(情報理工学)。