

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11914

研究課題名(和文) 実物大立体像の空中浮遊化と超高臨場感を実現するホログラフィック3Dディスプレイ

研究課題名(英文) Holographic 3D display realizing aerial reconstruction of a real-scale object and super realistic sensations

研究代表者

山東 悠介 (Sando, Yusuke)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任研究員

研究者番号：30463293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：現状のホログラフィック3Dディスプレイでは、立体像の再生位置が画面近傍に制限されるという課題がある。この原因は、空中浮遊化に必要な大型光学素子の実現が難しいことにある。そこで本研究では、大型光学素子を実現するため、ホログラフィック光学素子(HOE)を用いた。HOEを大型にするため、分割露光に対応した露光装置を独自に設計・開発した。本装置を用いて水平方向に5分割、垂直方向に3分割の露光を行うことで、約25 cm×15 cmの大型HOEを作製した。この大型HOEを従来のホログラフィック3Dディスプレイに組み込み、水平・垂直共に視野角10°の空間内にて、再生像の空中浮遊化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、大型光学素子を独自開発することで、ホログラフィック3Dディスプレイの課題の一つである立体像の空中浮遊化に取り組み、原理的に実現可能であることを実証した。再生像の視野角や画質において改善の必要はあるが、ホログラフィック3Dディスプレイの高い将来性を示すことができた。本研究成果は、ホログラフィック3Dディスプレイの早期実現に向けた有効な手法になると示唆した。また、本システムを構成する光学素子の改良・発展の動機付けにもなると期待する。

研究成果の概要(英文)：In the present holographic 3D displays, there is a problem that the reconstructing positions of their three-dimensional (3D) objects are limit to the vicinity of the display devices. This stems from the fact that it is difficult to fabricate large optical elements required for aerial reconstruction. In this study, we used a holographic optical element (HOE) to realize a large optical mirror. To fabricate a large HOE, an equipment enabling exposure partitioning was originally designed and developed. By the exposure partitioning five times and three times in the horizontal and vertical directions, respectively, a large HOE with the dimensions of 25 cm×15 cm was successfully fabricated. This large HOE was incorporated into our conventional holographic 3D display. Aerial display of the reconstructed image was realized in the 3D space whose field of views were 10 deg. in the both horizontal and vertical directions.

研究分野：情報光学

キーワード：ホログラフィック3Dディスプレイ 計算機ホログラム HOE 高速計算 3D-FFT

### 1. 研究開始当初の背景

現在、VR などの仮想空間において、立体表示技術の進化が求められている。数ある立体表示技術の中でも、装着物が不要で、3D 酔いも生じないホログラフィック 3D ディスプレイへの期待は大きい。しかし、現状のホログラフィック 3D ディスプレイでは、立体像は画面近傍にしか表示できず、物体が単独で存在しているかのような空中浮遊感を得られない。これはホログラフィの原理的な問題ではなく、空中浮遊化に必要な大型光学素子の実現が極めて難しいことに起因する(レンズ等の一般的な光学素子では、非球面レンズを用いたとしても、収差や重量の関係から大幅な大型化は現実的でない)。また、観測時に光学素子そのものが観測者に知覚されるため、再生像の空中浮遊感を損なう原因の一つになっている。

従って、存在感の少ない機能的大型光学素子の実現は、ホログラフィック 3D ディスプレイの実用化に向けた一つの課題であり、実験室レベルで作製可能な技術開発が強く望まれる。

### 2. 研究の目的

本研究では、空中浮遊感の高い立体表示を実現することを目的とする。まず、観測時における光学素子の存在感を低下させるため、ホログラフィック光学素子(HOE)を用いる。HOEは、感光材料に干渉縞を記録することで、光学特性を独自に設定できるため、近年、光学素子の集積化にも用いられている。また、HOEは鋭い波長選択性を有し、記録時の波長の光にのみ機能し、それ以外の光には機能しない。つまり、ガラスのような透過材と同等になる。したがって、Fig. 1 に示すように特定波長の光に対して所望の光学特性(射出点  $a$  から出た波面を視点  $b$  に集光させる楕円面反射特性)を付与することで、室内照明等の環境光に対しては機能しない透明ミラーが実現でき、光学素子の存在を隠すことができる。

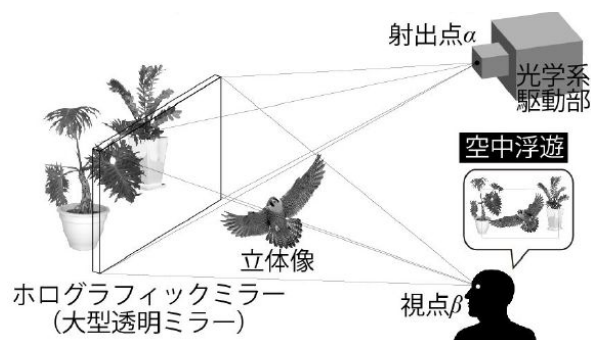


Fig. 1 空中浮遊感の高いホログラフィック 3D ディスプレイの模式図

また、HOEを用いることで、素子の大型化も可能になる。HOEの感光層は数  $10\ \mu\text{m}$  と非常に薄く、感光層の大面积化には問題はない。しかし、大面积の感光層に干渉縞を記録し光学特性を付与するためには、大型のレンズ等が必須になり、上述の当初の問題に帰着する。ただし、HOEでは記録面を分割して、個々の区画毎に記録することが可能であるため、干渉縞の記録の仕方次第では、市販の光学素子を用いて、大型 HOE の実現が可能であると考えられる。

本研究では、このような手法に基づいて、存在感の少ない機能的大型光学素子(大型透明ミラー)を実現し、空中浮遊感の高い像を再生することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、主に以下の3項目について実施する。

#### (1) HOEを用いた大型透明ミラー(大型HOE)の作製

上述の通り、分割露光をすれば、市販されている光学素子を用いてHOEの大型化が可能である。しかし、分割露光するための露光装置の構造が複雑になる。本研究では、作製するHOEの回転対称性を考慮した1軸の機械的走査、および2軸の機械的走査について取り組む。

#### (2) ホログラフィック 3D ディスプレイにおける空中浮遊化

(1)で作製した大型HOEをホログラフィック 3D ディスプレイに組み込み、再生像の空中浮遊化、および実在物体の拡張現実(AR)表現を実現する。なお、光学系駆動部については高速応答可能な空間光変調器(SLM)を用いた時分割方式[1]を用いることで、再生像の大型化にも取り組む。

#### (3) 大型空中浮遊像を再生するためのホログラム計算の高速化

本研究では、時分割方式により再生空間の視野を拡大させる。再生空間の拡大に伴いホログラムの計算量が増加するため、ホログラム計算の高速化が不可欠となる。そこで本研究では、3次元フーリエ変換を用いた回折計算法[2]で最も計算負荷の大きい3D-FFT(高速フーリエ変換)の高速化に取り組む。具体的には、再生像のスパース性(物体の分布は表面のみで、内部は空洞)を活用し、不要な演算を削除する。

#### 4. 研究成果

##### (1) HOE を用いた大型透明ミラーの作製

分割露光により大型 HOE を作製するため、分割露光に対応した露光装置を独自に設計・開発する必要がある。本研究では作製する HOE の形状を円筒とした。そして、Fig. 1 に示す射出点  $\alpha$  と視点  $\beta$  を円筒面の中心上に設定した。これにより、Fig. 2 に示すように HOE に記録される干渉縞が回転対称となるため、干渉縞の分布は、方位角方向に変化はなく、高さ方向のみの 1 次元分布となる。この回転対称性を活用することで、分割露光装置の可動軸を高さ方向（鉛直方向）の 1 軸に削減し、分割露光装置の構造を容易にした。方位角方向については、その高さで記録した同じ HOE を複数個並べる。ただし、このような円筒形 HOE を作製するためには、HOE の形状を円筒形に固定する必要がある。本研究では、HOE としてフォトポリマーフィルムを用いており、フィルム状であるため円筒形に固定する治具が必要になる。そこで、Fig. 3 に示すような治具を作製した。アクリル製の平板にフォトポリマーフィルムを張り付け、この平板ごと作製した治具で挟み込むことで、平面を円筒形に強制的に変形させた。次に波長 532 nm のレーザーを用いて干渉計を構築した。レーザー光源から分けられた 2 つの波面を、互いに対向する方向からフォトポリマーフィルム面に入射させることで、鋭い波長選択性を有する体積型ホログラムとして干渉縞を記録した。作製した HOE には、想定通りの集光特性（ある点から入射した光が別の点に集光する楕円面反射特性）が得られた。HOE を大型化するためには、この手法で記録した複数の HOE を方位角方向に並べる必要がある。そこで Fig. 3 の固定用治具から HOE を取り外し、別の円筒形の型に張り付けた。その後、光学特性を確認したところ、Fig. 3 の固定用治具で固定した時とは異なり、集光特性に著しい低下が見られた。原因を検討したところ、取り外したフォトポリマーフィルムの再配置時に微小な歪みが発生し、記録時の干渉縞とは異なる構造に変形したためと考えられる。体積型ホログラムの干渉縞のピッチは  $1 \mu\text{m}$  以下であるため、微小な変形でも無視できない影響を与えることが分かった。

記録後のフォトポリマーフィルムの再配置が基本的に不可能となったため、分割露光の機構を最初から設計し直した。まず、露光装置の可動軸を高さ方向の 1 軸から、方位角方向も含めた 2 軸とした。2 軸にすることで、露光装置の構造が複雑になるが、フォトポリマーフィルムの再配置が不要になる。さらに、2 軸機構の場合、回転対称性を考慮する必要がないため、フォトポリマーフィルムを円筒形に固定する型も不要となる。そのため、今回は透明のガラス平板をフォトポリマーフィルムの型として用いた。この露光装置で撮影した単一の HOE の写真を Fig. 4 に示す。本露光装置の単一露光で記録できる HOE の領域は、直径約 8 cm の円形であった。走査機構の構造を考慮すると、単一露光時に露光する領域（露光領域）は正方形が望ましいため、遮蔽マスクを用いて  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  の正方領域とした。

次に、本露光装置を用いて大型透明ミラーの分割露光を行った。水平方向に 5 分割、垂直（高さ）方向に 3 分割の計 15 回の分割露光を行い、約  $25 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  の大型透明ミラーを作製した。その時の写真を Fig. 5 に示す。Fig. 5 では、記録したフォトポリマーフィルム面を白色 LED で照射し、その反射光をカメラで撮影した。カメラや白色 LED の位置が設計値から多少外れているため、反射光強度が斑になる。しかし、記録波長に対応する緑色の光のみが反射しており、鋭い波長選択性が確認できた。また、マスク開口や暗幕等、フォトポリマーフィルムの奥にある実在物体もフォトポリマーフィルム越しに見えることから、AR 表示に対する適合性も確認できた。



Fig. 2 円筒形 HOE の干渉縞の模式図

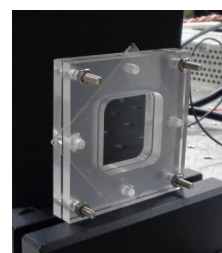


Fig. 3 円筒形固定用治具

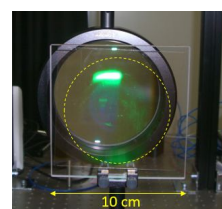


Fig. 4 単一露光で作製できる HOE

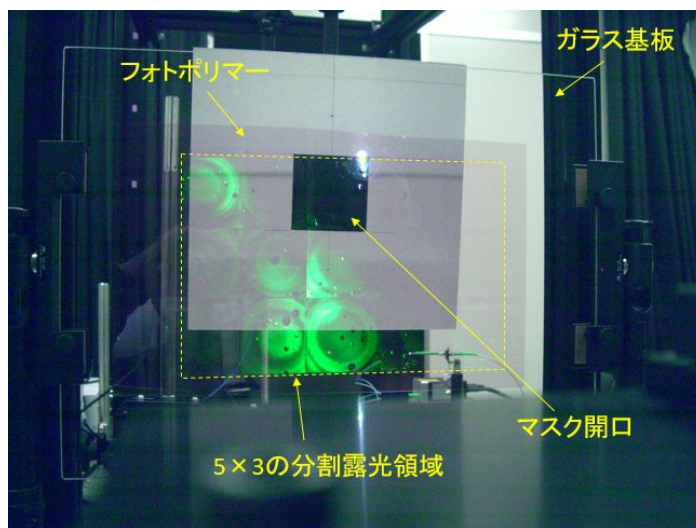


Fig. 5 分割露光数  $5 \times 3$  の大型 HOE

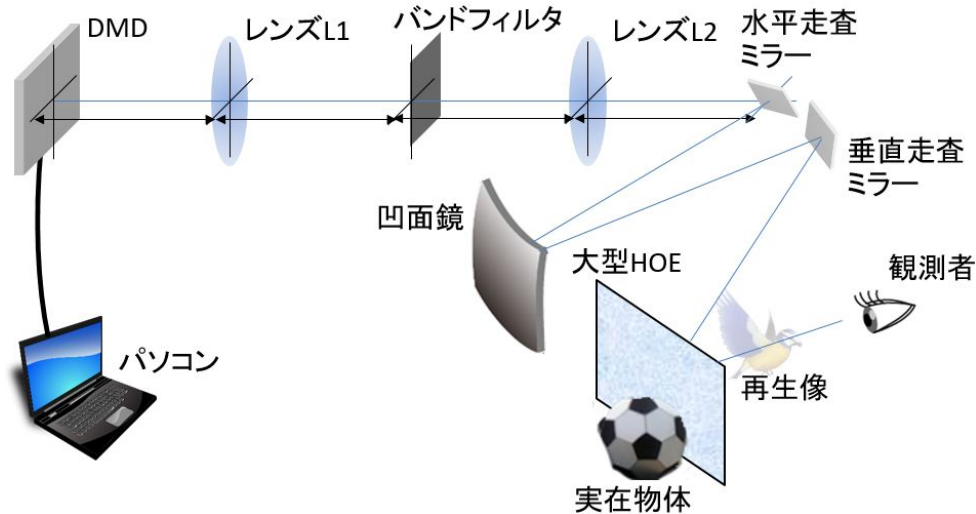


Fig. 6 空中浮遊像を表示するホログラフィック 3D ディスプレイの模式図

(2) ホログラフィック 3D ディスプレイにおける空中浮遊化

Fig. 6 に本研究で構築したホログラフィック 3D ディスプレイの模式図を示す。図中の大型 HOE が (1) で作製したものである。なお、Fig. 6 には記載していないが、DMD には HOE 記録時と同じ波長 532 nm の平面波が入射する。また、視野を拡大する (大型の立体像を再生する) ため、高速応答する SLM とそれに同期制御された水平・垂直走査ミラーを用いた時分割方式を採用した。なお、高速応答 SLM として、Digital Micromirror Device (DMD) を用いた。パソコンにより合成されたホログラムパターンは、ケーブルを通じて DMD に転送され、入射波面をパターンに応じて変調する。ただし、DMD は振幅のバイナリ変調型であるため、0 次光や共役像等の不要光が発生する。これを除去するため、レンズ L1 と L2 による 4f 光学系を構築し、レンズ L1 の後ろ側焦点平面にバンドフィルタを設置した。4f 光学系の射出点にはガルバノミラーによる水平走査ミラーを配置し、水平方向に波面を走査する。走査後の波面は凹面鏡により垂直走査ミラーの位置に集光する。この時、水平走査ミラーと垂直走査ミラーは結像関係にあるため、垂直走査ミラーから射出される波面は、実質的に 2 軸走査され、大型 HOE の 2 次元平面を時分割で照射する。大型 HOE に入射した波面は、反射後、観測者の視点に集光する。したがって、Fig. 1 の射出点  $a$  と視点  $b$  が、垂直走査ミラーの原点と観測者の視点にそれぞれ対応する。観測者の視点と大型 HOE の距離は約 53 cm であり、再生像は大型 HOE と観測者の中間付近に空中浮遊像として表示される。Fig. 7 に構築したホログラフィック 3D ディスプレイの写真を示す。本システムは原理検証用のプロトタイプであり、将来的にはこれらを光学系駆動部として統合することで、視点周辺には何も無い状態で観測することは可能である。

次に、本システムを用いて空中浮遊像の実験を行った。Fig. 8(a)に用いた画像を示す。また、Fig. 8(b)に、カメラを観測者の位置に設置して撮影した空中浮遊像を示す。Fig. 8(a)と比較すると、像が再生されていることは確認できるが、画質が低い。特に、強度ムラが著しく、一部 (例えば、鳥の頭部) が欠落しているかのように見える。これは、分割露光により記録した個々の HOE の回折効率のばらつきが大きいためである。HOE では、記録時の振動対策が重要であるが、本研究では十分な対策が取れず、結果として回折効率にばらつきが生じた。この問題は、大型 HOE を記録する分割露光装置を改良することで改善可能である。また、Fig 8(c)にカメラのピントを大型 HOE 面に合わせた結果を示す。再生像の代わりに個々の HOE そのものの強度ムラが確認できる。また、Fig. 8(c)には、強度が低いものの、下部に HOE 付近に配置した実在物体 (紙で作製したサッカーボール) が写っているのが確認できる。今回得られた再生像の視野は水平・垂直共に約  $10^\circ$  であり、現行の

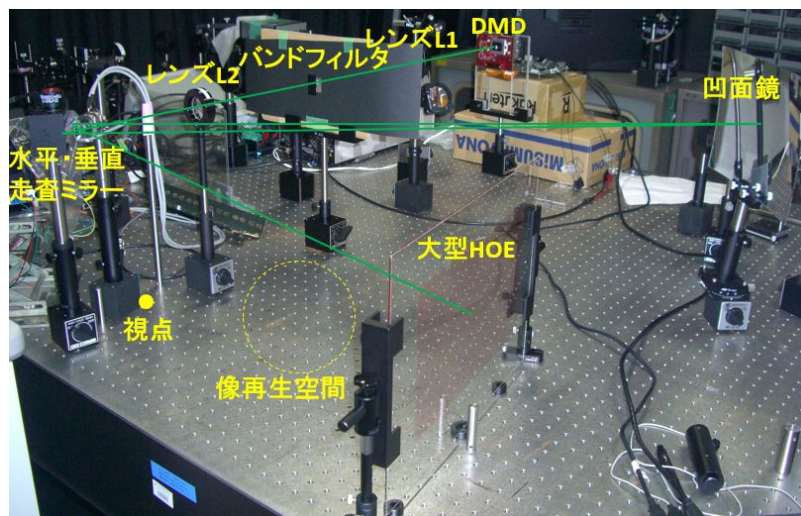


Fig. 7 構築したホログラフィック 3D ディスプレイの写真

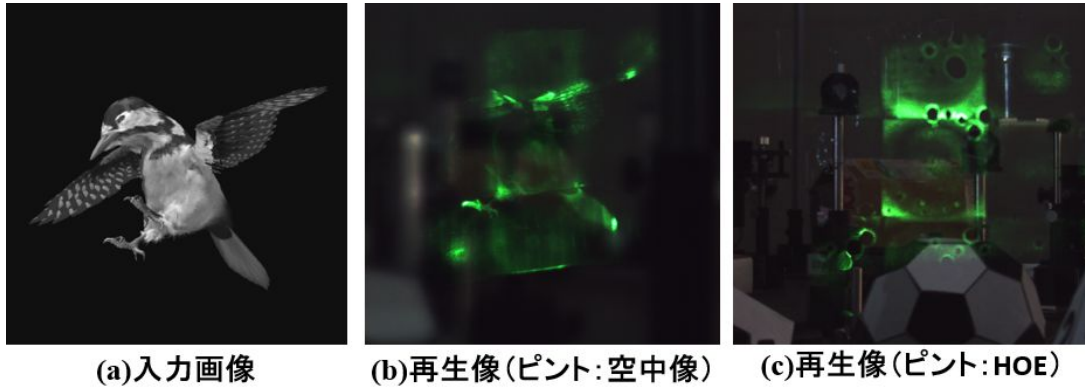


Fig. 8 入力画像と再生像

ホログラフィック 3D ディスプレイと比較しても十分に優位性がある。

以上の結果より、画質において改善は必要であるが、視野角の大きな空中浮遊像の再生と AR 表示への可能性を示すことができた。

### (3) 大型空中浮遊像を再生するためのホログラム計算の高速化

本研究において時分割方式を実装するためには、Fig. 8(b)に示す 1 シーンの再生にも多くのホログラムが必要であり、必然的に計算量も増加する。また、動画再生を可能にするという点においても、ホログラム計算の高速化が重要となる。我々は、回折計算に 3 次元フーリエ変換に基づいた手法[2]を用いているが、3D-FFT の計算負荷が支配的である。そこで本研究では、ホログラフィック 3D ディスプレイで再生される 3 次元物体は表面のみであり、物体の内部は空洞である点に着目した。つまり、Fig. 9 に示すように、物体の 3 次元分布は奥行き方向においてスパースである（局在している）と考えることができる。これにより、3D-FFT の各軸のフーリエ変換の内、奥行き方向については解析解が得られ、最終的に複数の 2D-FFT に分解できる。その結果として約 33% の計算量の削減に繋がった。また、近年ではホログラム計算の高速化にグラフィックス・プロセッシング・ユニット (GPU) を用いることが一般的であり、計算アルゴリズムも GPU との適合性が重要視される。本アルゴリズムは GPU による並列計算との親和性が高く、GPU を用いて実装することで、計算速度をさらに加速できることも実証した。

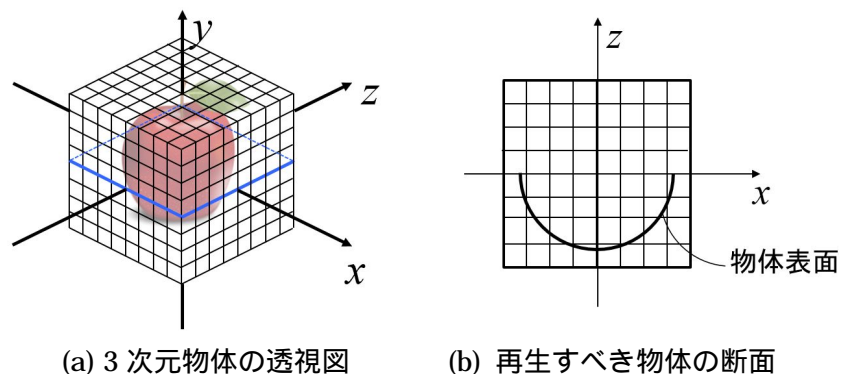


Fig. 9 3次元物体の分布

#### <参考文献>

- [1] Y. Takaki and N. Okada, "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator," *Appl. Opt.* **48**, 3255-3260 (2009).
- [2] Y. Sando, D. Barada, and T. Yatagai, "Fast calculation of computer-generated holograms based on 3-D Fourier spectrum for omnidirectional diffraction from a 3-D voxel-based object," *Opt. Express* **20**, 20962-209693 (2012).

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 1件）

1. 著者名 Yusuke Sando, Kazuo Satoh, Daisuke Barada, and Toyohiko Yatagai	4. 巻 3
2. 論文標題 Holographic augmented reality display with conical holographic optical element for wide viewing zone	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Light: Advanced Manufacturing	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.37188/lam.2022.012	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 Yusuke Sando, Kazuo Satoh, Daisuke Barada, and Toyohiko Yatagai	4. 巻 12025
2. 論文標題 Holographic 3D display with peripheral viewing zone beyond planar holograms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1202507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2613908	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yusuke Sando, Daisuke Barada, and Toyohiko Yatagai
2. 発表標題 Fast Calculation of 3D Fourier Transform for Hologram Synthesis Based on Sparse Distribution
3. 学会等名 Information Photonics 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 物体のスパース性を利用したホログラム高速計算法のGPU化
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山東 悠介
2. 発表標題 3次元フーリエスペクトルに基づいた回折計算の応用展開
3. 学会等名 第7回日本光学会関西支部講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山東 悠介、後藤 佑太郎、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 3次元FFTを用いたホログラム高速計算による実在物体の実時間遠隔立体表示
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 ホログラフィック3Dディスプレイの広視域化に向けた円錐形HOE
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 Yusuke Sando, Kazuo Satoh, Daisuke Barada, and Toyohiko Yatagai
2. 発表標題 Holographic 3D display with peripheral viewing zone beyond planar holograms
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2022, Ultra-High-Definition Imaging Systems V (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 広視域を実現するための円錐形ホログラムの検討
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山東 悠介
2. 発表標題 ホログラフィック光学素子の非平面化
3. 学会等名 ORIST 技術シーズ・成果発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホログラフィによる立体・大型・空中浮遊像の表示（地方独立行政法人大阪産業技術研究所テクノレポート）
---

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
研究分担者	佐藤 和郎  (Satoh Kazuo)  (30315163)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主幹 研究員   (84431)	



6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	宮島 健  (Miyajima Ken)  (10847916)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・研究員    (84431)	

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