

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：84431
研究種目：若手研究
研究期間：2018～2019
課題番号：18K18098
研究課題名(和文) 特殊球面ミラーを用いた全方向から観測可能なホログラフィック3D表示による拡張現実

研究課題名(英文) Holographic 3D and AR display observable from all directions using a special spherical mirror

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、視域拡大を意図した凸型放物面鏡を用いたホログラフィック3Dディスプレイにおいて、波長選択性を有するホログラフィック光学素子(HOE)による放物面鏡の置き換えに取り組んだ。具体的には、フォトポリマーを用いて、平面波を発散球面波に変換する円筒形のHOEを作製した。また、円筒形HOEでの反射を適切に考慮した回折計算法を独自開発し、所望の立体像を表示させるためのホログラムを計算することができた。実際に、円筒形HOEを用いてホログラフィック3Dディスプレイを構築し、実在物体と仮想物体の重畳表示(AR表示)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、将来的な3Dディスプレイとして期待されているホログラフィック3Dディスプレイの実用化促進を目指し、視域拡大と拡張現実を実現可能な手法に取り組んだ。具体的には、曲面形状を有するホログラフィック光学素子(HOE)を用いた本手法は、申請者独自の手法であり、HOEの潜在能力の高さとホログラフィの将来展望を示すことができた。また、実際に構築したシステムでの再生像については、サイズや画質、ノイズ等において改善は必要であるが、広視域と拡張現実が実現可能な本手法の有用性を示すには、十分な結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried to replace the convex parabolic mirror with a wavelength-selective holographic optical element (HOE) in a holographic 3D display with a convex parabolic mirror for wide viewing zone. A cylindrical HOE, which converts an incident plane wave into a diverging spherical wave, was fabricated by using a photopolymer film. Diffraction calculation method considering the reflection on the cylindrical HOE was also originally developed, and holograms reconstructing desired 3D objects were calculated. A holographic 3D display system with a cylindrical HOE was practically constructed. Augmented reality display of a real object and virtual object was successfully demonstrated.

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 ホログラフィック光学素子 回折計算法 拡張現実 計算機ホログラム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ホログラフィは位相を含んだ波面を再生できるため、実在する波面と物理的に等価な波面を再生することで、自然な立体像を表示することができる。このようなホログラフィック 3D ディスプレイは原理的には理想的であるものの、立体像の見える範囲(視域)が限定的という課題がある。例えば、ホログラムの側面や上側、後ろ側から立体像を観測することはできない。これは、ホログラムが平面形状をしていることに起因するが、ホログラムを表示するデバイスである空間光変調器(SLM)は、現状では平面形状のものしか入手できず、これまで、この課題を解決することはできなかった。

申請書は、ホログラムより生成された波面を凸型放物面鏡で放射状に発散反射させることで、視域を劇的に拡大する手法を提案した。これは、平面波を発散球面波に変換するという、凸型放物面鏡の幾何学的特徴を活かしたものである。原理的には、360°の水平視域と90°以上の垂直視域を同時に実現できる。しかし、波面を放物面鏡で反射させ、その内部に虚像として立体像を再生する本手法では、「凸型放物鏡の内部が見えない」、「観測者との相互作用が起こせない」、「環境光が映り込む」といった問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、上述の凸型放物面に起因する問題の解決に取り組む。上述の課題は、発散反射素子が金属であることが原因である。そこで、波長選択性を有する特殊な曲面ミラーを開発し、金属性ミラーに置き換える手法を提案する。つまり、ある特定波長のみ発散反射させ、それ以外の波長については透過するような、特殊ミラーを開発する。このような特性を持つ素子として、ホログラフィック光学素子(HOE)が有力である。本研究では、HOEを作製するための感光材料としてフォトポリマーを用いた手法に取り組む。最終的には、非平面のHOEを用いたホログラフィック 3D ディスプレイを構築し、実在物体との重畳表示(拡張現実)を実現することを最終目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、凸型放物面鏡と同じ球面波生成機能を備えつつも、拡張現実の実現に必要な波長選択性が得られる非平面 HOE の作製、および、非平面 HOE での反射を適切に考慮した回折計算法の開発が主な取組みとなる。そこで、以下の項目を実施した。

(1) 非平面 HOE の作製

HOEの感光材料として、露光後に化学的な現像プロセスが不要なフォトポリマーを用いた。現在、市販購入できるフォトポリマーはシート状であるため、球形 HOE を作製することはできない。そこで、本研究では、形状を円筒形に変更した上で、凸型放物面鏡と同様の機能を付与することにした。HOEの光学的特性は、HOE内に形成される干渉縞によって決まる。ここでは、凸型放物面鏡と同様に、平面波を発散球面波に変換する機能と、特定(記録)波長のみ反射する波長選択性を実現するため、図1に示す光学系をHOEの記録光学系として用いた。広角の発散球面波を生成するため、開口数0.85の対物レンズを用いた。波長選択性を有するため、物体波と対向する方向から平面波を照射し、半円筒形台座の内側に張り付けたフォトポリマー内部に体積型ホログラムを記録した。

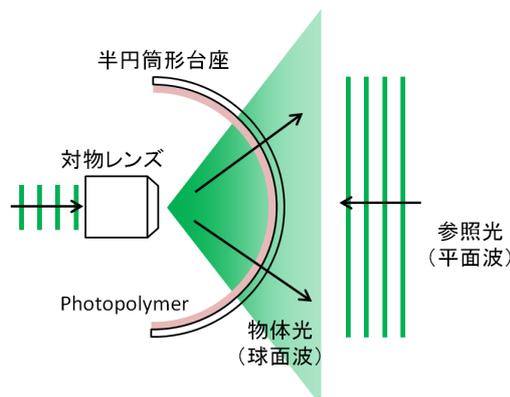


図1. 円筒形 HOE の記録光学系

(2) 非平面 HOE での反射を考慮した回折計算法

円筒形 HOE を用いて構築する、本研究の再生光学系の模式図を図2に示す。再生すべき3次元物体情報はホログラムとして符号化され、空間光変調器(SLM)に表示される。SLMにより変調を受けた波面はビームスプリッタ(BS)により反射した後、円筒形 HOE に入射する。円筒形 HOE で反射することで、3次元物体が円筒形 HOE の中心付近に虚像として再生される。

このとき、SLM に表示されるホログラムは、円筒形 HOE での反射を適切に考慮する必要がある。しかし、円筒形のような非平面 HOE での反射を考慮した回折計算法は確立されていない。本研究では、HOE 内部に記録される干渉縞面を鏡面として反射法則を適用した手法（鏡面反射法）を独自開発した。

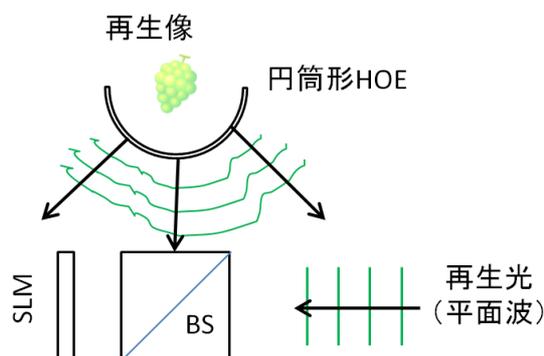


図 2 . 再生光学系の模式図

(3) 広視域ホログラフィック AR ディスプレイの検証実験

広い発散角と波長選択性を持つ円筒形 HOE と、非平面 HOE での反射を適切に考慮した回折計算法を用いて、図 2 に示すような広視域ホログラフィック AR ディスプレイシステムを構築し、本提案内容の妥当性を検証した。

4 . 研究成果

(1) 非平面 HOE の作製

図 1 に示す記録光学系を用いて作製した円筒形 HOE の写真を図 3 に示す。円筒の直径は約 26 mm であり、また、記録時に用いた波長は 532 nm である。なお、正面からの観測を可能にするため、参照光を円筒に対し 45°傾いた方向から照射し作製した。図 3 の通り、フォトポリマーを張り付けた場所は、少し赤味がかっているものの、基本的には透明であることがわかる。

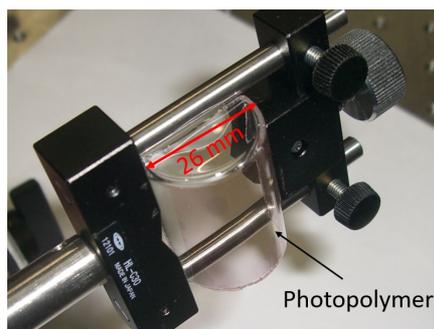


図 3 . 作製した円筒形 HOE

(2) 非平面 HOE での反射を考慮した回折計算法

鏡面反射法は、HOE に形成される干渉縞を鏡面と考え、反射の法則に従い伝搬方向を決定

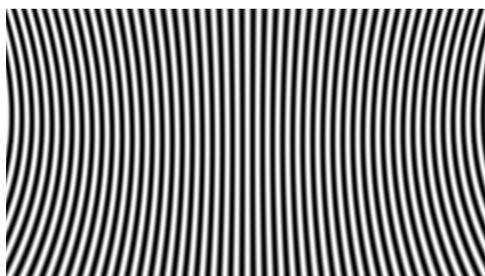


図 4 . ホログラム面での波面の強度分布（2 点の点物体時）

する手法である。干渉縞面の法線方向は、HOE の記録光学系によって決まり、HOE の場所に依存する。つまり、鏡面の法線方向を場所の関数として扱い計算することで、非平面 HOE で

の反射を適切に考慮することができる。本手法を用いて、水平方向に並ぶ2つの点光源を3次元物体とした場合の、ホログラム面（SLM面）での強度分布を図4に示す。予想通り水平方向に強く変化する結果が得られている。また、垂直方向の若干の湾曲、非対称性についても、円筒形の形状や、参照光の45°の傾斜照射を考えると妥当な結果だと言える。しかし、この結果だけでは、計算結果が正しいと断定することはできないため、詳細は(3)の実証実験に持ち越すこととする。

(3) 広視域ホログラフィック AR ディスプレイの検証実験

図5に、構築したホログラフィック AR ディスプレイシステムの写真を示す。基本的には、図2に示す模式図の通りであるが、円筒形 HOE を水平面に対し45°傾けて設置した点が異なる。これにより、円筒形 HOE での反射後の光軸は、水平面に対し45°傾くため、BS等の光学素子と干渉を避けることができる。SLMに表示するホログラムにより再生される仮想物体は、ワイヤーフレームで表示した立方体であり、さらに前面に4つの線分を付与したものをを用いた。また、実在物体はM2の金属製ネジとした。図6に、本ディスプレイシステムでの再生像の一例を示す。仮想物体であるワイヤーフレーム立方体は虚像であるため、実在物体とは物理的に干渉せずに再生され、拡張現実が実現できていることがわかる。また、観測位置に応じて像が適切に変化して（視差が得られて）おり、像が立体的に再生されていることもわかる。水平方向の視域については、 $-16^{\circ} \sim 37^{\circ}$ を達成している。左側の視域が -16° に制限されているのは、ホログラムを表示している SLM が、カメラの視野を覆ってしまうためであり、原理的には左側も 37° 以上の視域を達成できていると推測される。

以上の結果より、ホログラムの計算方法を含め、本研究での提案手法の妥当性が実証され、 50° 以上もの広視域を有するホログラフィック AR ディスプレイを実現することができた。今後は、再生像の大きさの拡大や、リアルタイム再生、フルカラー再生等に取り組み、本手法をさらに発展させる予定である。

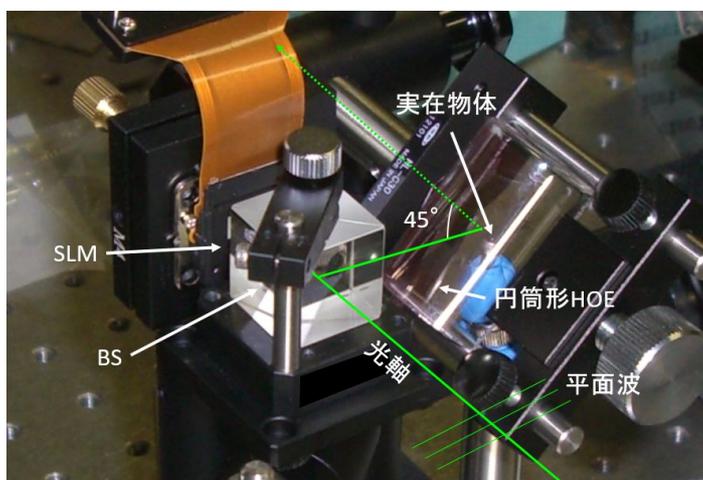


図5．試作したホログラフィック AR ディスプレイの写真

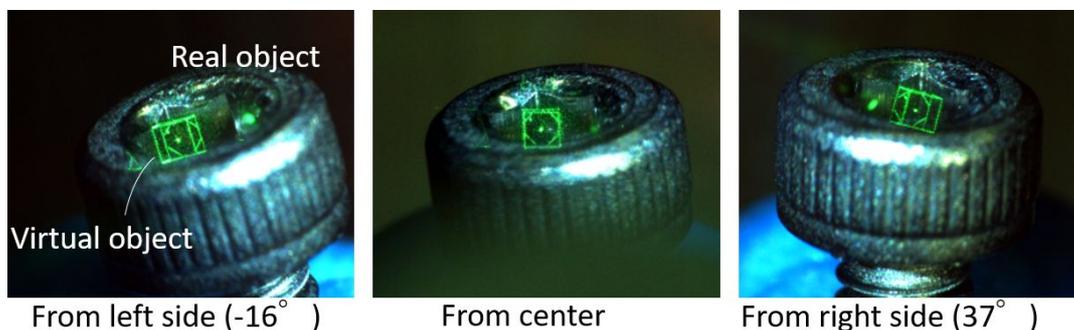


図6．各方向から撮影した再生像の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Sando, K. Satoh, D. Barada, and T. Yatagai	4. 巻 11310
2. 論文標題 Holographic AR display based on the cylindrical holographic optical element for wide viewing zone	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11310: Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2543588	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12件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 放物面鏡を用いた広視域計算機ホログラムの区画分割による高速計算法
3. 学会等名 第79回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茨田 大輔、山東 悠介、新井 佑亮、福田 隆史、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 回転放物面座標系における光波伝播式の導出(II)
3. 学会等名 第79回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Arai, Y. Sando, D. Barada, T. Fukuda, and T. Yatagai
2. 発表標題 Complex Amplitude Calculation on Three-Dimensional Parabolic Surface for Parabolic Hologram
3. 学会等名 International Workshop on Holography and related technologies (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 凸型放物面鏡を用いた広視域ホログラフィック3D ディスプレイにおける再生可能像空間
3. 学会等名 第66回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sando, D. Barada, and T. Yatagai
2. 発表標題 Reconstructable Object Space in Holographic 3D Display with a Convex Parabolic Mirror
3. 学会等名 Information Photonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sando, D. Barada, and T. Yatagai
2. 発表標題 Parabolic-mirror-reflection holographic 3D display for super wide viewing zone and its fast calculation algorithm
3. 学会等名 Digital Holography and 3-D Imaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山東 悠介、佐藤 和郎、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 全周囲観測のための非平面ホログラムの形状の検討
3. 学会等名 第80応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 非平面HOEを用いたホログラフィック3Dディスプレイにおけるホログラム計算法
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茨田 大輔、山東 悠介、新井 佑亮、福田 隆史、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 放物面CGH設計のための三次元放物面座標系におけるヘルムホルツ方程式の解の導出
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井 佑亮、茨田 大輔、山東 悠介、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 球面CGH設計のための平面から球面および球面から平面への光伝播式の導出
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sando, K. Satoh, D. Barada, and T. Yatagai
2. 発表標題 Holographic AR display based on the cylindrical holographic optical element for wide viewing zone
3. 学会等名 Proc. SPIE 11310: Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山東 悠介、茨田 大輔、谷田貝 豊彦
2. 発表標題 非平面HOEにおける縞構造に基づいた波面反射計算法
3. 学会等名 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	佐藤 和郎 (Satoh Kazuo)		
研究協力者	茨田 大輔 (Barada Daisuke)		
研究協力者	谷田貝 豊彦 (Yatagai Toyohiko)		