

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：84431

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21699

研究課題名(和文)凸型放物面鏡を用いた全方位から観測可能なホログラフィック3Dディスプレイの研究

研究課題名(英文)Study on omnidirectionally observable holographic 3D display using a convex parabolic 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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：自然な立体像の表示が可能なホログラムは、一般的に平面形状であるため、視域が原理的に制約されるという問題がある。本研究では、凸型放物面鏡の幾何学的特徴を活用し、平面のホログラムでありながら、半球形ホログラムと同等以上の視域を実現する手法を提案した。まず、機械的切削加工により凸型放物面鏡を作製した。次に、凸型放物面での反射を考慮した効率的な波面計算法を開発した。最後に、光学実験により提案手法とその効果を実証した。

研究成果の概要(英文)：A hologram, which can reconstruct 3D images naturally, is planar in general, and its viewing zone is fundamentally limited by its shape. In this study, we proposed a tactical method to realize equal to or wider than the viewing zone of a hemispherical hologram in spite of a planar hologram used by utilizing a geometrical property of a convex parabolic mirror. At first, a convex parabolic mirror was fabricated by machining. Then, an efficient calculation method of the wavefront considering the parabolic mirror reflection was developed. Next, our proposal and its effect were successfully verified by an optical experiment.

研究分野：情報光学

キーワード：計算機ホログラム ホログラフィック3Dディスプレイ 凸型放物面鏡 立体表示

### 1. 研究開始当初の背景

3D ディスプレイが市場に登場して久しいが、現状では十分に普及したとは言えない。3D ディスプレイの普及には多くの課題が指摘されているが、中でも運動視差が実現できない点が重要視されている。これは、既存の3D ディスプレイは、水平視差を有する異なる一対の映像を左右の目に投影するステレオスコープという、2次元ディスプレイの延長として開発されたためである。したがって、基本的に観測者が直立に静止した状態で映像を観ることを前提としている。この前提は映画館やゲームなどの娯楽用途では比較的成り立つものの、それ以外の用途では利用が難しい。また、原理的にも実空間に立体像が形成されるのではなく、観測者自身が脳内で擬似的に立体感を生み出す手法であるため、長時間観測時に3D酔いが発生するなどの欠点もある。

擬似的な立体感ではなく、実空間に実際に自然な立体像の形成が可能な3Dディスプレイとして、ホログラフィを用いた手法(ホログラフィック3Dディスプレイ)が、近年活発に研究されている。ホログラフィック3Dディスプレイでは、観測位置が変わると、立体像もその位置に応じて適切に変化し、運動視差を実現できる。実空間に立体像が形成されるため、3D酔いもしなければ、観測時に専用メガネも必要としない。また、芸術としての価値も高く、実物と見間違えるほどの臨場感のある立体像の提示も可能である。

### 2. 研究の目的

一般的なホログラムは平面形状をしているため、ホログラフィック3Dディスプレイには、立体像の観測可能な範囲(視域)が制限されるという問題がある。例えば、ホログラムの側面や後ろ側からは観測できず、十分な運動視差が実現できない。本研究では、このような平面形状に起因する原理的限界を解決するため、図1に示すように、ホログラムにより変調を受けた波面を凸型放物面鏡で反射させる手法を開発した。凸型放物面鏡には、平面波が回転軸方向から入射すると、反射後の波面は焦点を中心とした発散球面波として伝播すると言う、幾何学的特性がある。発散角は凸型放物面の半径 $r$ と焦点距離 $p$ の比率によって決まり、 $r/p$ を2以上にすることで、 $180^\circ$ 以上の広範囲な発散角を実現できる。この特性をホログラフィック3Dディスプレイに組み込むことで、極めて広範囲な視域を達成する。

### 3. 研究の方法

凸型放物面鏡を用いて極めて広範囲な視域を実現するため、以下の項目を実施した。

#### (1)凸型放物面鏡の作製

凸型放物面鏡は市販されていないため、研究代表者の所属する地方独立行政法人大阪産業技術研究所にて自作した。具体的には、

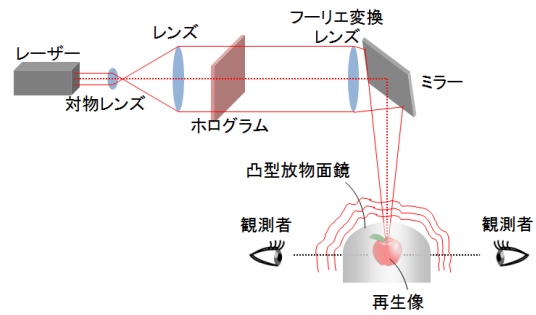


図1 視域拡大用凸型放物面鏡を用いた光学系の模式図。

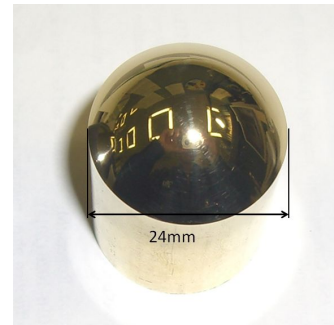


図2 作製した凸型放物面鏡(蒸着前)。

機械的切削加工により凸型の回転放物面の粗面を形成し、研磨により鏡面に仕上げる。最後に、反射率を向上させるため、アルミニウムを電子ビームにて蒸着した。また、必要な作製精度が得られているかを判定するため、加工した凸型放物面の表面形状を計測し、シミュレーションにより集光状態(球面波の生成状態)を確認した。

#### (2)ホログラムの計算方法の開発

本手法では、凸型放物面で反射後の波面を観測するため、ホログラムの設計には、凸型放物面での反射を適切に考慮する必要がある。しかし、放物面での反射を考慮した高速な計算法は未開拓であり、本研究では、高速で効率的な(メモリ使用量の少ない)計算手法を独自に開発した。

#### (3)実証実験

提案手法の実証と性能評価を行うため、図1に示す光学系を構築し、光学実験を行った。

### 4. 研究成果

#### (1)凸型放物面鏡の作製

作製した凸型放物面鏡の写真を図2に示す。素材は真鍮であり、放物面鏡の焦点距離と半径は、それぞれ5mm、12mmとした。次に、接触式の輪郭形状測定装置で放物面形状を計測した結果を図3に示す。さらに、本形状に対し回転軸方向から平面波を照射した場合の反射後の波面をシミュレーションにより求めた結果を図4に示す。放物面の外側は順方向の回折計算を、内側は逆方向の回折計算を行った。放物面鏡作製の評価指標として

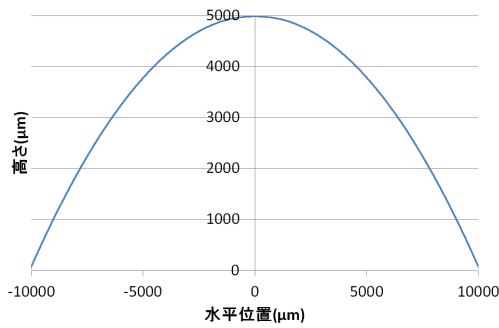


図3 作製した凸型放物面鏡の表面形状。

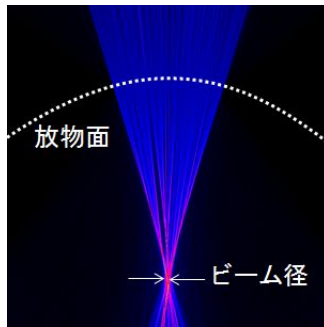


図4 放物面鏡による球面波生成シミュレーション。

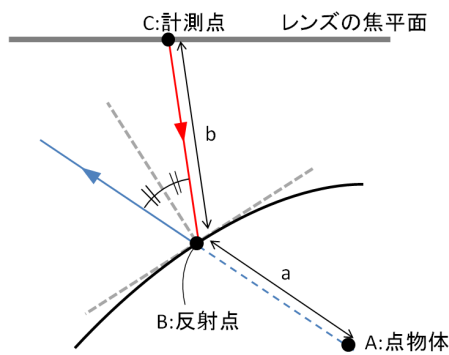


図5 幾何光学的手法の模式図。

仮想集光点でのビーム径を用いたところ、そのビーム径は0.06mmであった。0.06mmは決して高精度ではないものの、本提案手法の原理検証については十分可能である。

### (2) ホログラムの計算方法の開発

放物面のような曲面を介した回折計算では、高速フーリエ変換 (FFT) 等の高速計算アルゴリズムを適用することができない。しかし、3次元物体を構成する点物体群に対し、波動光学に基づく回折積分を直接計算するには莫大なメモリと時間を要するため、ここでは放物面の反射を幾何学的に処理する。図5にそのための模式図を示す。物体を構成する点物体Aから出た仮想的な光線が、レンズの焦平面上のある点Cに至るまでの光線経路を考える。この時、放物面鏡上の点Bにおいて、反射の法則に従い、伝播方向が変化することを考慮すると、2点A、Bが決まれば点Cが一意に決まる。つまり、光路長が求

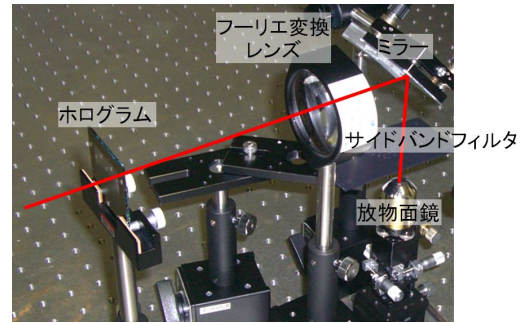


図6 構築した実験光学系の写真。

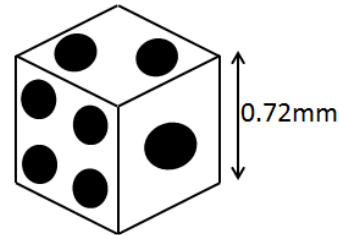


図7 用いた3次元物体。

まる。ただし、再生像は虚像であり (凸型放物面鏡の内部に再生され)、点AからBへの経路は逆伝播となるため、光路長は、 $b-a$  で与えられる。この処理を全ての点物体に対し行い、得られた波面の重ね合わせを計算する。さらに、この一連の処理を焦平面上の全ての点に対し行うことで、焦平面上の波面が得られる。最後に、逆フーリエ変換を行うことでホログラム面上の波面が計算できる。つまり、本手法で用いるホログラムはフーリエ変換型ホログラムとなる。

### (3) 実証実験

図6の写真に示す通り、実験光学系を実際に構築した。ただし、簡略化のため、ホログラム以降の部分を表示した。フーリエ変換レンズの焦点距離は15cmとし、用いたレーザー波長は632.8nmである。作製したホログラムの画素数および画素ピッチは、それぞれ8,192×8,192,  $4\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$  である。また、用いた3次元物体は図7に示すサイコロとした。サイコロは一辺0.72mmであり、684個の点物体から構成される。本条件におけるホログラムの計算時間は約3時間であった。また図6に示すように、フーリエ変換レンズの後ろ側焦平面上に、サイドバンドフィルタを挿入している。これは、作製したホログラムが振幅型であるため、フーリエ変換レンズの後ろ側焦平面には、所望の波面の他に、共役像と強い0次光が発生するが、これらを物理的に遮蔽するためである。したがって、視域の方位角は180°に制約される。なお、位相型ホログラムを用いた場合、0次光等の不要光は発生しないため、サイドバンドフィルタは不要となり、視域の方位角は360°全周となる。

図8に再生像を各種方向から撮影した結果を示す。撮影位置に応じた適切な立体像が再生されていることがわかる。しかしながら、再生像の強度が再生部によって異なってい



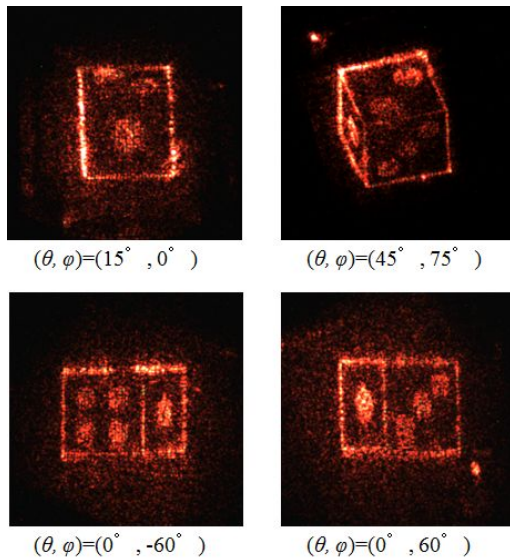


図 8 各方向から撮影した再生像。  
 $\theta$  と  $\varphi$  は、それぞれ仰角，方位角を表す。

ることが確認された。これは、本実験に用いたホログラムがバイナリ形式であるため、ダイナミックレンジが極めて低い、加えてレンズの焦平面上での波面の重ね合わせの計算において、位相のみを考慮し振幅を一定として扱ったことが原因と考えられる。なお、本課題については、詳細な検討が今後必要である。また、本実験では、図 6 に示すミラー等の光学部品との物理的干渉により撮影できなかったが、仰角  $90^\circ$  以上、方位角  $180^\circ$  の極めて広範囲な視域が実現できており、本結果により、提案手法を実証できた。また、用いた 3 次元物体（サイコロ）には、例えば 3 の目の面の反対側には 4 の目の面が存在するなど、裏面データも存在しているが、図 8 に示す再生像には表面のみが再生されている。これは、複雑な立体像を再生するのに必要不可欠な陰面処理が適切に機能していることを意味する。陰面処理は本手法においては、幾何光学的手法により波面を計算する際、点物体間の前後関係を考慮することで容易に実装できる。具体的には、点物体から発せられる仮想光線の光路上に、他の点物体の存在について判断するだけである。陰面処理が容易に実装できるのも、本手法の大きな利点である。

上述の通り、当初の目的であった凸型放物面鏡を用いた視域の拡大について、実験的に実証した。従来のホログラフィック 3D ディスプレイと比較して、各段に広範囲な視域を実現でき、ホログラフィック 3D ディスプレイの研究分野を大きく進捗させることに成功した。今後は、再生像の拡大や計算時間の短縮、画質の向上などの課題について取り組み、ホログラフィック 3D ディスプレイの実用化に貢献する。

##### 5. 主な発表論文等 [雑誌論文](計 2 件)

Y. Sando, D. Barada, B. J. Jackin, and T. Yatagai, "Bessel function expansion to reduce the calculation time and memory usage for cylindrical computer-generated holograms," *Appl. Opt.* **56**, 5775-5780 (2017); 査読有,  
 doi: 10.1364/AO.56.005775.

Y. Sando, D. Barada, B. J. Jackin, and T. Yatagai, "Fast calculation of computer-generated spherical hologram by spherical harmonic transform," *Proc. SPIE* **10233**, 102331H (2017); 査読有,  
 doi: 10.1117/12.2264926.

[学会発表](計 9 件)

茨田大輔, 山東悠介, 福田隆史, 谷田貝豊彦, "回転放物面座標系における光波伝播式の導出," 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018).

山東悠介, 茨田大輔, 谷田貝豊彦, "凸型放物面鏡を用いた広視域ホログラフィックステレオグラム," 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018).

Y. Sando, K. Satoh, T. Kitagawa, M. Kawamura, D. Barada, and T. Yatagai, "Enlargement of viewing zone of holographic 3D display using a parabolic mirror," *The 7th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics* (2017).

Y. Sando, D. Barada, and T. Yatagai, "Calculation method for computer-generated hologram considering parabolic mirror reflection for viewing zone enlargement," *International Workshop on Holography and Related Technologies 2017* (2017).

茨田大輔, 山東悠介, 福田隆史, "曲率パラメータを用いた仮想曲空間における光伝播解析方法の検討," 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (2017).

山東悠介, 佐藤和郎, 北川貴弘, 川村誠, 茨田大輔, 谷田貝豊彦, "凸型放物面鏡を用いたホログラフィック 3-D ディスプレイにおける方位角  $180^\circ$ ・天頂角  $90^\circ$  の視域実現," 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (2017).

山東悠介, 佐藤和郎, 北川貴弘, 川村誠, 茨田大輔, 谷田貝豊彦, "凸型放物面鏡を用いた全周観測可能なフルパララックス計算機ホログラム," 3 次元画像コンファレンス 2017 (2017).

Y. Sando, D. Barada, B. J. Jackin, and T. Yatagai, "Fast calculation of computer-generated spherical hologram by spherical harmonic transform," SPIE **10233**, Holography: Advances and Modern Trends V (2017).

山東悠介, 茨田大輔, ボワスジャッキン, 谷田貝豊彦, "球面調和関数変換を用いた球形計算機ホログラムの高速計算法," 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016).

[ 産業財産権 ]

出願状況 (計 1 件)

名称 : 立体像表示装置

発明者 : 山東悠介, 佐藤和郎, 北川貴弘, 川村誠

権利者 : 同上

種類 : 特許

番号 : 特願 2017-054411

出願年月日 : 2017 年 3 月 21 日

国内外の別 : 国内

## 6 . 研究組織

### (1) 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・製品信頼性研究部・主任研究員

研究者番号 : 30463293