

# 時分割方式による全周囲から観測可能な ホログラフィック 3次元ディスプレイ

## *Holographic 3D Display for Horizontally Full Viewing Zone Angle Based on Time Division Method*

山東 悠介\* 茨田 大輔\*\* 谷田貝 豊彦\*\*  
Yusuke Sando Daisuke Barada Toyohiko Yatagai

(2016年6月24日 受理)

This report presents a holographic three-dimensional (3D) display system, based on the time division method, having a viewing zone angle of 360°. A digital micromirror device (DMD) is used for the time division method as a high-speed spatial light modulator. The rotating mirror rotation is synchronized with the DMD. After the wavefronts are modulated by the DMD, they enter the rotating mirror, which is tilted by 45° to the horizontal plane. Consequently, the mirror-reflected wavefronts propagate in horizontal directions depending on the mirror rotation angle. When the rotating speed is sufficiently high, the time division method becomes effective. The horizontal viewing zone angle becomes equivalent to 360°. An optical experiment conducted to verify this proposed system demonstrated that binocular vision and motion parallax can be realized from anywhere within the horizontal plane.

**Key Words:** computer-generated hologram, holography, 3D display, time division, viewing zone, DMD

### 1. はじめに

3次元(立体)ディスプレイに関する歴史は古く、19世紀には既にステレオグラフィによる立体視に関する研究が報告されている。ステレオグラフィ以外にも多くの立体表示技術は存在するが、原理的な簡便さから駅構内での立体広告やシール等の小物に至るまで、幅広い分野で商品化されている。また、現在市場で流通している3Dテレビも原理的にはステレオグラフィである。2010年は3D元年と呼ばれ、立体技術に関し盛り上がりを見せたのも記憶に新しい。しかしながら、現状では3Dテレビが十分に普及、発展しているとは言いがたい。これには多くの要因が挙げられるが、そもそもステレオグラフィでは両眼の網膜に結像される投影像の差異(両眼視差)を手がかりに、観測者自

身が脳内で立体像を合成する方式であり、実空間には立体像は存在(結像)しない。そのため、知覚に関する他の生理的知覚要因(運動視差、輻輳、調節等)との間に矛盾を生じさせ、これが3D酔いの原因となっている。さらに、Fig. 1(a)に示すように市販の3Dテレビでは、観測する位置が変化しても、知覚される立体像に変化はない。つまり運動視差が存在しない。これは、現実世界では起こり得ない奇妙な現象である。運動視差は、両眼視差と共に、立体感に影響を与える主要な要因であり、運動視差の欠如は自然な表示という点では致命的である。また、左右の眼に異なる像を投影するため、専用眼鏡を要することも大きな欠点と言える。これらの欠点は、映画館等ではあまり問題視されないが、家庭用テレビや工業用・医療用ディスプレイでは問題となる。

著者らは、現状の3Dディスプレイで採用されているステレオグラフィとは異なる立体表示技術であるホログラフィック3Dディスプレイについて研究開発

\* 製品信頼性科

\*\* 宇都宮大学大学院工学研究科

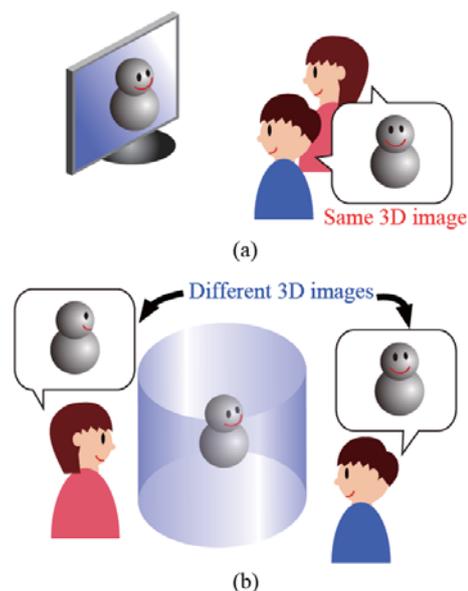
\*\*\* 宇都宮大学オペティクス教育研究センター

を進めてきた。ホログラフィ<sup>1)</sup>では、実際に3次元空間に立体像を結ぶため、ステレオグラフィでは問題となった生理的知覚要因間の矛盾がない、理想的な立体像を表示することができる。しかし、ホログラフィをディスプレイ用途に応用するためには、動画再生が必要不可欠であるが、従来の光学式写真乾板では不可能である。そこで、空間光変調器 (SLM) を表示素子として用いる電子ホログラフィが1980年代に報告された<sup>2)</sup>。電子ホログラフィで用いるSLMは、微細加工により製造される半導体デバイス的一种である。しかし、光波を空間上で変調できる点数(画素数)、および解像度(画素ピッチ)共に従来の写真乾板と比較して著しく劣っている。これらは表示性能として、表示される立体像の大きさや観測可能な範囲(視域)に影響を与え、特に視域に関しては、現状のSLMの性能から算出すると、数度程度となり、両眼視が極めて困難であり、運動視差も得られない。

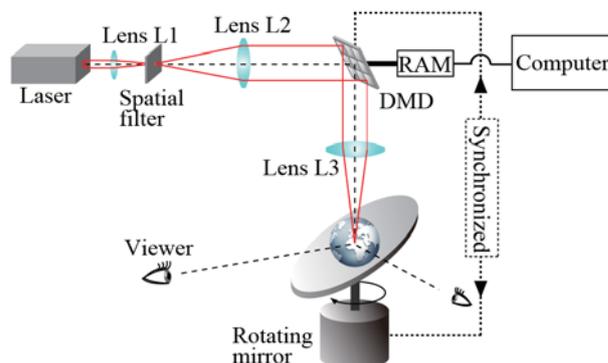
再生像の大きさと視域を共に改善させるには、画素数の向上が不可欠となる。しかし、要求される画素数は少なくとも現状の100倍と推定されるため、今後の半導体技術の進展に加え、技術的な取り組みが重要である。画素数増加に向け、複数のSLMを空間的に並べる空間分割多重方式が最も明確な手法であるが<sup>3-5)</sup>、コストが増大するという点と光学系が大きくなるという欠点がある。これに対し、高速応答可能なSLMを用いた時分割方式も提案されており<sup>6,7)</sup>、単一のSLMでありながら、ある程度の運動視差が表現できるホログラフィックディスプレイが報告されている。しかしながら、複数の観測者が観測できる程の十分な視域は実現できていない。そこで本研究では、この時分割方式において、DMDに同期した回転ミラーを用いることで、Fig. 1(b)に示すように全周囲から観測可能な方式を提案し、実証に成功したので報告する。視域が360°に拡大されることで、水平方向に完全な運動視差が得られる。これにより、今まで以上に立体感の得られるディスプレイが実現でき、応用分野の広がりも期待できる。

## 2. 時分割方式による視域の拡大

本研究では、時分割方式により視域を拡大するため、高速応答可能なSLMとしてDMDを用いる。DMDは、リフレッシュレートが10 kHz以上にも及ぶため、時分割方式のSLMに適している。また、像空間に回転ミラーを設置し、DMDと同期させることで視域を360°にまで拡大させる。



**Fig. 1** Comparison of the viewing styles between (a) conventional 3D stereoscopic display and (b) proposed holographic 3D display.



**Fig. 2** Schematic of proposed holographic 3D display based on the time division method by using a DMD as an SLM.

### 2.1 視域拡大のための光学系

水平方向の視域を360°にまで拡大させるため、Fig. 2に示す光学系を用いた。光源としてHe-Neレーザー(波長632.8 nm)を用い、入射光をレンズとスペイシャルフィルタにより平面波に成形する。DMDにより空間的に変調を受けた波面は、レンズL3により光学的にフーリエ変換され、レンズL3の後ろ側焦点付近に立体像を結像する。従って、DMDに表示されるホログラムはフーリエ変換型ホログラムとなる。また、レンズL3の後ろ側焦点には水平面に対し45°傾いた回転ミラーを設置しており、この回転ミラーに鉛直下向きに入射した波面は水平方向に反射する。回転ミラーの回転軸は入射波の光軸に一致しているため、

反射波の水平方向の方位角は、ミラーの向きに一致する。従って、ミラーを回転させることで、全周囲に波面を伝播させることができる。そして、ミラーの回転角とDMDに表示されるホログラムを同期制御させ、且つ、ミラーの回転速度を人間の眼の応答速度以上にすることで、時分割方式に基づき360°に広がる任意の波面を再生することができる。つまり、立体像の観測できる視域が360°になり、水平方向に完全な運動視差を持つ3Dディスプレイが実現できる。

## 2.2 ミラーの回転に伴う波面の回転

Fig. 2に示すような回転ミラーにより視域を拡大させる光学系では、反射後の波面が光軸回りに回転するという現象が生じるため注意が必要である。ここでは、この現象についてFig. 3に示す模式図を用いて説明する。ミラーでの反射前の波面の座標系を $(x, y, z)$ とし、光軸を $z$ 軸とする。ミラーの回転軸を $V$ とすると、 $V$ と $z$ 軸は平行になる。また、ミラーの水平軸 $H$ は、 $V$ に垂直で、且つミラー上で設定する。ミラーの回転角 $\theta$ は、 $x$ 軸と $H$ のなす角として定義される。また、ミラーでの反射後の波面の座標系を $(X, Y, Z)$ とする。ただし、 $(X, Y, Z)$ は、ミラーの回転角 $\theta$ に依存する。まず、Fig. 3(a)に示すように、 $\theta = 0^\circ$ の場合について考える。この時、 $x$ 軸と $X$ 軸、 $H$ は、全て互いに平行となり、 $V$ も $Y$ 軸に平行になる。 $Z$ は、 $\theta = 0^\circ$ の場合 $Z_0$ であり、このときの座標系を基準とする。次に、Fig. 3(b)に示す $\theta = \Theta$ の場合について考える。この時、 $x$ 軸と $H$ のなす角が $\Theta$ となる。そのため、簡単な幾何学的計算により、反射後の光軸 $Z$ 軸は、 $Z_0$ に対し方位角方向に $\Theta$ だけ回転し、さらに、 $X$ 軸と $Y$ 軸についても、 $Z$ 軸回りに $\Theta$ 回転することがわかる。 $Z$ 軸の回転は、伝播方向が水平面で変化することを意味し、これを実現するために本システムを構築している。しかしながら、 $X$ 軸と $Y$ 軸の回転は、反射後の波面に回転を与えるため、本回転に関して何も処置を行わなければ、再生像が回転することになる。また、その回転量は、観測位置に応じて異なる。これではディスプレイとして機能しないため、本研究では、事前に逆方向に回転させたホログラムパターンをDMDに表示することで、回転ミラーの反射時に生じる波面の回転を補正するという、ソフトウェア的な手法で解決している。

## 2.3 多大なホログラムの効率的な計算

Fig. 2に示すような時分割方式により視域を拡大させるためには、莫大な数のホログラムを計算により合成する必要がある。一般的には、ホログラム数と総計算時間は比例関係にあるため、時分割方式ではその計算時間が問題となる。著者らは、これまでに様々な方

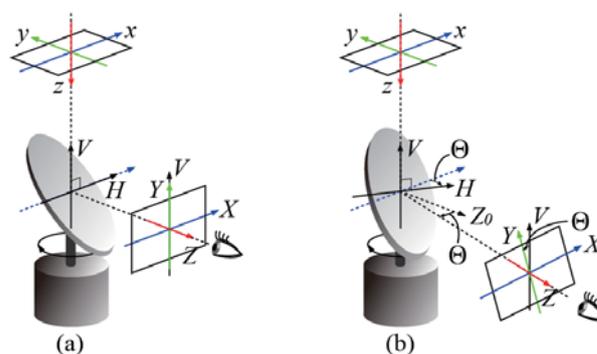


Fig. 3 Schematics of the wavefront rotation by the rotating mirror: (a)  $\theta = 0$  and (b)  $\theta = \Theta$ , respectively.

向に伝播する複数のホログラムを高速に計算する手法を提案した<sup>9)</sup>。この手法では、単一のホログラム計算時には利点は少ないが、伝播方向の異なる複数のホログラムを計算する際に極めて効率的に計算できる。以下に計算の流れを簡単に記載する。

1. 表示したい3次元物体のボクセルデータに対し、3次元Fast Fourier transform(3D-FFT)を行う。
2. 得られた3次元スペクトルから球面上の成分を抽出する。
3. 球面上の成分から、伝播方向に対応する軸を回転対称軸( $W$ 軸)とした半球成分を抽出する。
4. 抽出した半球成分を $W$ 軸方向に投影する。
5. 実部のみを抽出し、干渉縞(ホログラム)を得る。

複数のホログラムを計算する場合、異なる伝播方向に対し、3~5の処理を繰り返し行えばよい。なお、上記の項目の内、計算負荷が大きいのは、1.の3D-FFTのみである。従って、本研究のように、様々な方向に伝播する多くのホログラムを計算するのに、非常に適した計算方法であると言える。さらに、文献<sup>9)</sup>の方法を用いて3次元フーリエ変換を行うことで、リアリティのある像の再生に必要な不可欠な陰面処理が行えるのも、本計算方法の大きな利点である。

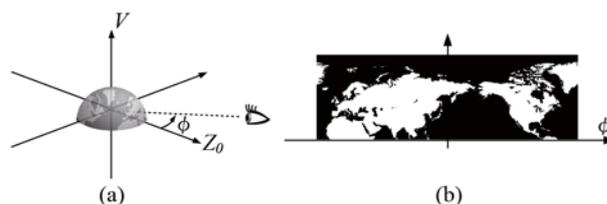
## 3. 光学実験による実証

本研究で提案した内容を実証するため、光学実験を行った。Fig. 4に示すように、本実験では3次元物体として地球儀の北半球を用いた。球ではなく、半球としたのは、ホログラムの課題の一つでもある、再生時に生じる共役像を空間的に分離するためである。入力データの標本点数、および空間サイズは、それぞれ

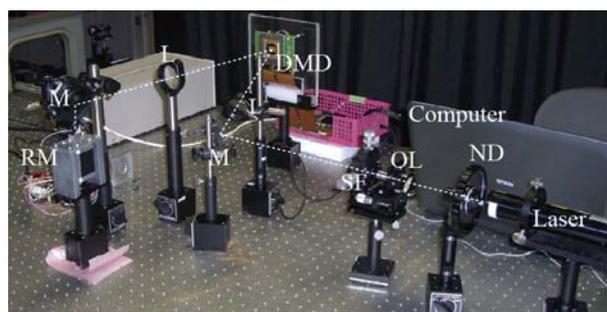
256×256×256, 17.6×17.6×17.6 mm<sup>3</sup> であり, この領域内に半径 6.1 mm の北半球をボクセルデータとして入力した. 地球儀は, Fig. 4(b) に示す平面図を半球面に球面マッピングすることで生成した. また, DMD の画素数および画素ピッチは, 1920×1080, 10.8×10.8 μm<sup>2</sup> であり, 合成されるホログラムもこれと同様になる. 光源として He-Ne レーザーを用いているため, 波長は 632.8 nm となる. レンズ L3 の焦点距離は 30 cm としたため, 単一のホログラムからの水平視域は 2.2~4.0° と算出され, 観測方向によって変化する. 時分割数は 500 とし, 隣接するホログラムからの再生像を一部互いに重畳させることで, 時分割方向の中間方向から観測した場合の再生像の画質の低下を軽減させている. ミラーの回転数は 10 Hz としたため, DMD のリフレッシュレートは, 10 Hz×500 = 5 kHz となる. なお, 人間の眼の応答速度を考慮すると 10 Hz は実質不十分であるが, 原理検証を行う上では十分と考える. Fig. 5 に実際に構築した光学系の写真を示す. 基本構成は, Fig. 2 に示す模式図と同じである. 回転ミラーは, ステッピングモーターの軸に 45° 傾いたミラーを取り付けて作製し, 信号発生器で生成される一定周期の信号を受け取り回転する. また, 回転ミラーに取り付けられているミラーは, 下半部を黒色の吸収素材で覆っている. これにより, 再生時に生じる共役像と 0 次回折光を空間フィルタリングしている. 以上の条件の下, 360° の水平視域を有するホログラフィック 3D ディスプレイの実証実験を行った. 再生された立体像の一例を Fig. 6 に示す. これらの画像は, 観測位置にデジタルカメラを配置し, 回転ミラー付近にフォーカスを合わせて撮影した.  $\phi$  は Fig. 4(a) に示すように, 観測方向と  $Z_0$  とのなす角として定義され, 地球儀での経度に対応する. Fig. 6 の (a), (b), (c) および (d) において, それぞれヨーロッパ大陸, ユーラシア大陸, 日本および北アメリカ大陸が中心に再生されており, 観測位置  $\phi$  に応じて適切な像が確認されている. 以上の結果から, 本実験において, 水平方向の視域が 360° にまで拡張されていることが実証された. また, 視域が完全な 360° であるため, 至近距離でも両眼視差や運動視差が十分に機能し, これまで以上の立体感が得られるのも特筆に値する. なお, Fig. 6(a) の上部に見える像は共役像の高次回折光である.

#### 4. まとめ

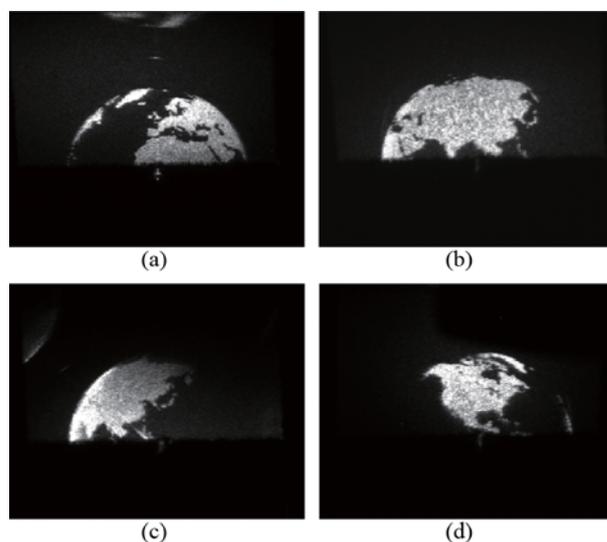
今回, 高速応答可能な DMD を SLM として用いることで, 時分割方式に基づいた 360° の水平視域を有



**Fig. 4** 3D object used for the optical experiment. (a) is the perspective view and (b) is the texture which is sphericaly mapped on the hemisphere.  $\phi$  is defined as the angle between  $Z_0$  and the observation direction.



**Fig. 5** Picture of the actual holographic 3D display with horizontally full viewing zone angle: M, mirror; L, lens; OL, objective lens; SF, spatial filter; ND, neutral density filter; and RM, rotating mirror.



**Fig. 6** Optical reconstructed images captured from (a)  $\phi = 0^\circ$ , (b)  $\phi = 90^\circ$ , (c)  $\phi = 135^\circ$  and (d)  $\phi = -90^\circ$ , respectively.

するホログラフィック 3D ディスプレイを提案し, 光学実験により実証した. 視域を 360° に拡張するため, 像空間中心に水平方向に対し 45° 傾いた回転ミラーを設置した. また, この回転ミラーに伴う反射波の波面の回転については, 予め逆方向に回転したホログラムを DMD に表示することでソフトウェア的な補正を実

施した。地球儀の北半球を物体として用いて実証実験を行い、理論通り水平方向の視域が 360° に拡張されたことを確認した。本手法は、水平方向に関し完全な両眼視差と運動視差が実現できるため、今まで以上に立体感や臨場感のある自然な 3D ディスプレイが実現できると共に、医療分野での臓器や工業分野での試作品の仮想表示等、これまでエンターテインメント用途に限定されていた 3D ディスプレイの新たな市場開拓にも貢献するものと期待する。今後は、ホログラムの計算速度をさらに向上させ、実時間再生を目指す予定である。上述のような応用を考えた場合、インタラクティブなホログラフィック 3D ディスプレイは必須である。

## 参考文献

- 1) D. Gabor: Nature, **161**(1948) 1911.
- 2) F. Mok, J. Diep, H.-K. Liu and D. Psaltis: Opt. Lett., **11** (1986) 748.
- 3) J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park and B. Lee: Opt. Express, **16** (2008) 12372.
- 4) F. Yaraş, H. Kang and L. Onural: Opt. Express, **19** (2011) 9147.
- 5) T. Kozacki, M. Kujawińska, G. Finke, B. Hennelly and N. Pandey: Appl. Opt., **51** (2012) 1771.
- 6) Y. Takaki and N. Okada: Appl. Opt., **48** (2009) 3255.
- 7) Y.-Z. Liu, X.-N. Pang, S. Jiang and J.-W. Dong: Opt. Express, **21** (2013) 12068.
- 8) Y. Sando, D. Barada and T. Yatagai: Opt. Express, **20** (2012) 20962.
- 9) Y. Sando, D. Barada and T. Yatagai: Appl. Opt., **52** (2013) 4871.