

軸外れデニシユク型光学系を用いた波面プリンタの開発 Development of a Wavefront Printer Using Off-Axis Denisyuk-type Optical System

橋村直柔 齋藤智崇 松島恭治
Naonari Hashimura Tomotaka Saitou Kyoji Matsushima
関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

ABSTRACT

A novel type of wavefront printer is proposed. The wavefront printer is an equipment to print computer-generated holograms (CGH) as a volume hologram. A wavefront printer has been proposed using paraxial Denisyuk-type optical system where reference light passes through the recording material like Denisyuk-type hologram and illuminates a spatial light modulator (SLM). However, this system has a severe problem that the reconstructed image is disturbed by zeroth-order light because the reference light enters the recording material almost perpendicularly. In this paper, a novel system is proposed using an off-axis Denisyuk-type optical system. The optical reconstruction of a volume CGH is demonstrated to verify the proposed technique.

Keyword: volume hologram, volume CGH, wavefront printer, Denisyuk-type hologram

1. はじめに

計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下 CGH)はコンピュータで作成した仮想物体光波から干渉縞パターンを数値計算によって生成し、それを描画装置で描画することで作製するホログラムである。現在では、レーザーリソグラフィ技術を応用して短時間で高解像度の CGH を描画できるようになっている。しかし、この方法で作製された CGH はいわゆる「薄いホログラム」となる為、白色光で再生すると色収差による色にじみが生じてしまい、正しい再生像を得ることができない。体積ホログラムは波長選択性を持つ為この様な問題が生じない。そこで、空間光変調器 (Spatial Light

Modulator, 以下 SLM)を用いて描画光波を発生し、参照光波と干渉させて体積 CGH を作製できる波面プリンタの開発が進められており[1,2], 高解像度化が進んでいる[3]. また、フルカラー体積 CGH を描画できる波面プリンタの開発も進められている[4].

一般に、体積ホログラムを作製する際は Fig.1(a)に示すように、レーザーから出た光を2つのアームに分岐し、一方を記録物体に照明して物体光波を発生する。もう一方を参照光として記録材料を挟み込むように干渉させることで体積ホログラムを記録している。しかし、この方法ではレーザー光を分岐することから、光学系が複雑になり振動に弱くなることと、分岐により光強度が弱くなることが問題であった。これに対して(b)に示すデニシユク型ホログラムの記録手法では、これらの問題が緩和され比較的簡単に体積ホログラムを作製できる。

そこで、我々はこの手法を応用した近軸デニシユク型光学系を用いた波面プリンタを報告している[5]. しかし、この光学系では参照光を記録材料に

橋村直柔

<hashimura@laser.ee.kansai-u.ac.jp>

関西大学システム理工学部電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

対してほぼ垂直に入射しなければならないため、同じ角度で入射する必要がある再生照明光の光源や0次光が再生像の観察の妨げになるという問題を持っていた。

本研究では、この問題を解消する新たなデニシュク型光学系として、軸外れデニシュク型光学系を提案する。本報告ではこの手法の詳細と、提案手法で描画した体積 CGH の再生像を示す。

2. デニシュク型光学系を用いた波面プリンタ

2.1. 原理

波面プリンタでは、記録物体の代わりに SLM を用いて描画光波を発生する。本研究では、この時、Fig.1(b)に示したデニシュク型ホログラムの記録手法と同じ考え方を用い、記録材料越しに SLM を照明して描画光波を発生する。このような光学系を我々はデニシュク型光学系と呼んでいる。これにより光を分岐せずに描画光波と参照光を得られるため、簡素な光学系で体積 CGH を描画できると考えられる。

2.2. 近軸デニシュク型光学系

我々は以前、Fig.2 に示している近軸デニシュク型光学系を用いた波面プリンタを開発した[5]。このプリンタでは平行光を参照光とし、記録材料に対してわずかに斜入射する。これにより記録材料を透過した参照光波がバンドパスフィルタを通過できるようにしている。この参照光はフーリエレンズ1で再び平行光に戻り、SLM を照明する。

この光学系の問題点は、参照光をほぼ垂直に入射しなければならないことである。ホログラム再生時には照明光を参照光とほぼ同じ角度で入射する必要があるため、再生像に再生照明光の光源や0次光が重なり、再生像の観察の妨げになっていた。そこで本研究では、この問題を解消する新たなデニシュク型光学系として、軸外れデニシュク型光学系を導入した。

2.3. 軸外れデニシュク型光学系

Fig.3 に本研究で用いた波面プリンタの光学系を示す。この光学系ではレーザー光を空間フィルタとコリメータレンズを用いて平行光にし、可変開口を用いて矩形にしたものを参照光としている。参照光

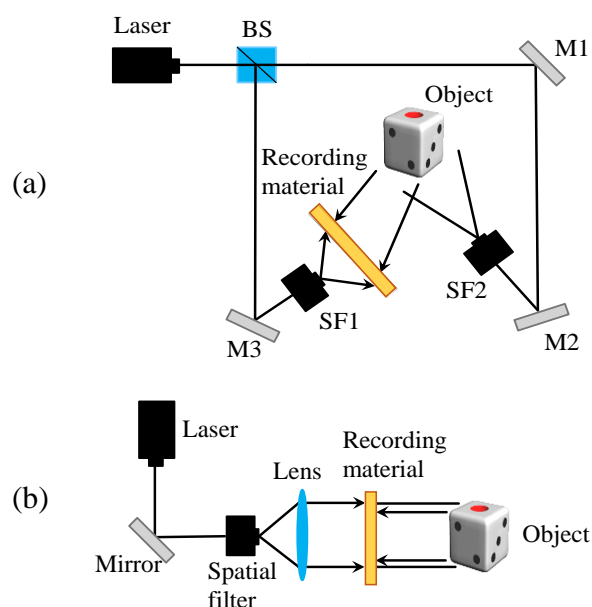


Fig.1 The recording step of a volume hologram.

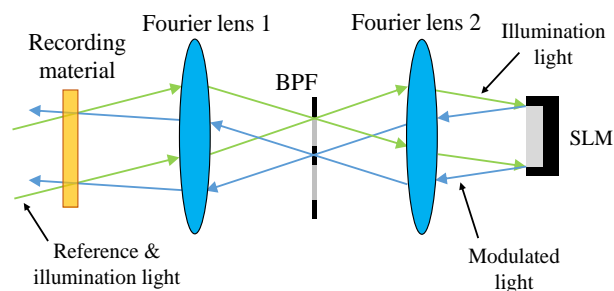


Fig.2 Paraxial Denisyuk-type optical system.

は記録材料に大きく斜入射し、透過した光をビームエキスパンダでビーム径を広げるだけでほぼそのまま SLM に照明する。発生した描画波面は、 $4f$ 光学系とバンドパスフィルタを透過して記録材料にほぼ垂直に入射している。これにより、デニシュク型光学系でありながら大きな角度で参照光を記録材料に入射できるため、再生時においても再生照明光の光源や0次光が再生像の観察の妨げにならない。

なお、 $4f$ 光学系によって描画波面が縮小されるため、像面のサンプリング間隔は

$$\delta' = \frac{f_1}{f_2} \delta \quad (1)$$

となる。ここで、 f_1 と f_2 はそれぞれフーリエレンズの焦点距離であり、 δ は SLM のピクセルピッチである。

2.4. タイリング

一般に SLM は発生できる描画波面のサイズが小さく、大規模な再生像が得られない。そのためタイ

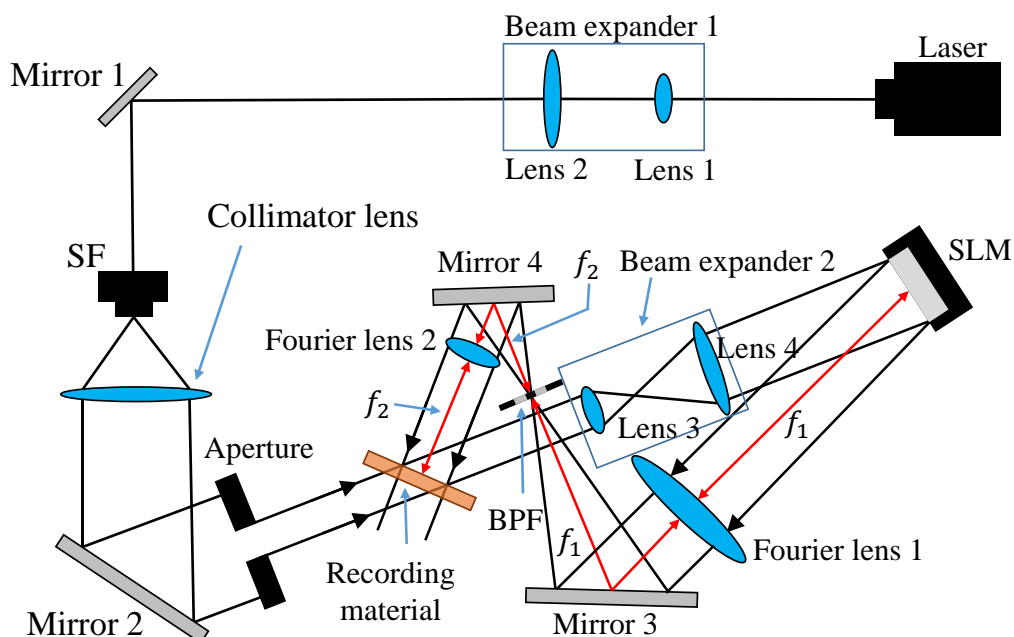


Fig.3 Optical system in the experiment.

リングを行う。タイリングでは、一つの描画波面を SLM で発生可能な範囲に分割する。この分割した波面を部分波面と呼ぶ。そして、部分波面に対応する位置に記録材料を順次移動させて部分波面を描画することで波面全体を描画する。

3. 体積 CGH の描画

本研究で使用した SLM の仕様を Table 1 に示す。光源には狭帯域化した 532 [nm] の緑色レーザーを使用しており、フーリエレンズの焦点距離は $f_1 = 400$ [mm], $f_2 = 100$ [mm] である。従って、描画波面のサンプリング間隔は SLM の 4 分の 1 に縮小される。本研究では Fig.3 に示すプリンタで CGH を描画している。記録材料と SLM の間にビームエキスパンダを挿入しているのは、参照光を描画波面と同じ大きさにする必要があることから、SLM に照明する際には SLM の有効変調領域サイズまで拡大する必要があるためである。

本プリンタで描画した物体モデルと 3D シーンを Fig.4 に示す。物体はサーフェスモデルであり、トーラスを 5 つ組み合わせたものである。物体モデルはホログラム面から 160 [mm] 離れた位置に配置している。描画波面のパラメータを Table 2 に示す。16×16 のタイリングによって描画波面のサイズは SLM の有効変調領域の 4 倍に拡大されている。Fig.5 は描画した体積 CGH の表面にピントを合わせて撮影した

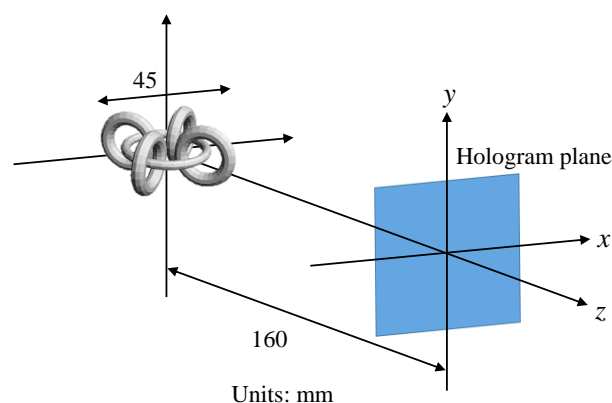


Fig.4 3-D scene.

Table 1 Specifications of SLM used for the wavefront printer.

Manufacturer	HOLOEYE
Model number	PLUTO
Number of pixels	1,920 × 1,080
Pixel Pitches	8 × 8 μm
Display size	15.36 × 8.64 mm ²

Table 2 Parameters of the writing object field.

Number of samples	30,720 × 17,280
Wavelength	532 nm
Sampling interval	2 × 2 μm
Object field size	61.44 × 34.56 mm ²

写真である。描画の安定性が不十分であり、正しく描画できず欠けているタイルが複数箇所見て取れる。

4. 光学再生像

Fig.6 に軸外れ及び近軸デニシユク型光学系で描画した CGH を白色光で再生した再生像を示す。近軸デニシユク型光学系の波面プリンタの再生像(a)では、記録材料に対する参照光の入射角がわずかに0.5度であるため、再生時に0次光が映り込み、再生像の観察の妨げになっていることがわかる。これに対して軸外れデニシユク型光学系を用いて作製したFig.5のCGHの再生像(b)では参照光の入射角が約30度に拡大しているため、再生時に0次光が映り込まず、再生像が観察し易くなっている。

5. まとめ

軸外れデニシユク型光学系を用いた波面プリンタで体積CGHの描画を行い、その再生像を確認した。再生照明光を斜入射できるようになったことにより再生像の観察が容易になり、提案法で展示可能な体積CGHの描画が可能であることを確認した。今後は更に高解像度のSLMを使用してより広い視域を持つ体積CGHを作製すると共に、安定して大規模な体積CGHを作製するシステムを開発する予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費18H03349の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] W. Nishii and K. Matsushima: "A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms", SPIE Proc. **9006**, 90061F (2014).
- [2] S. Hong, E. Stoykova, H. Kang, Y. Kim, J. Hong, J. Park, K. Park: "Image-quality enhancement for a holographic wavefront color printer by adaptive SLM partitioning", J. Opt. Soc. Korea **19**, 29-37 (2015).
- [3] R. Oi, P.Y. Chou, J. B. Jessie, K. Wakunami, Y. Ichihashi, M. Okui, Y.P. Huang and K. Yamamoto: "Three-dimensional reflection screens fabricated by holographic wavefront printer", Opt. Engineering **57**, 061605(2018).

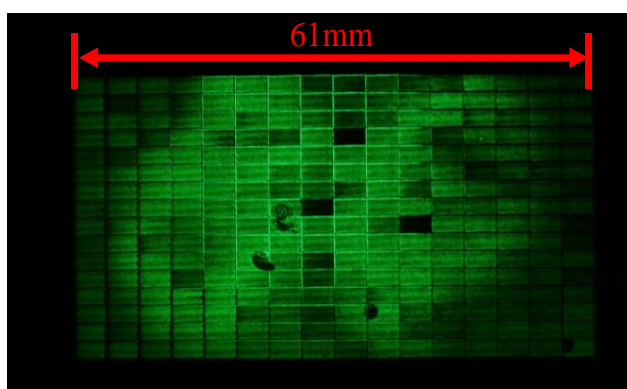
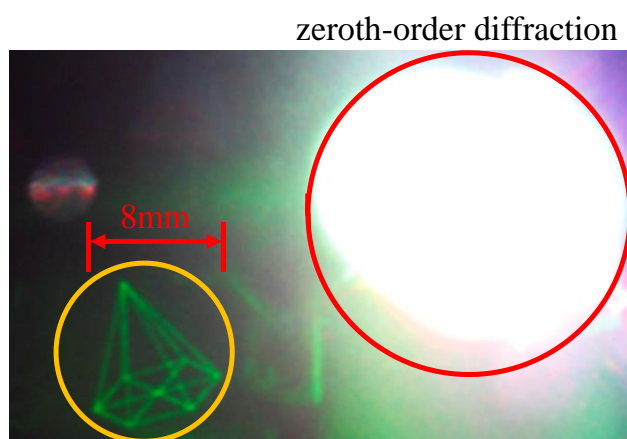
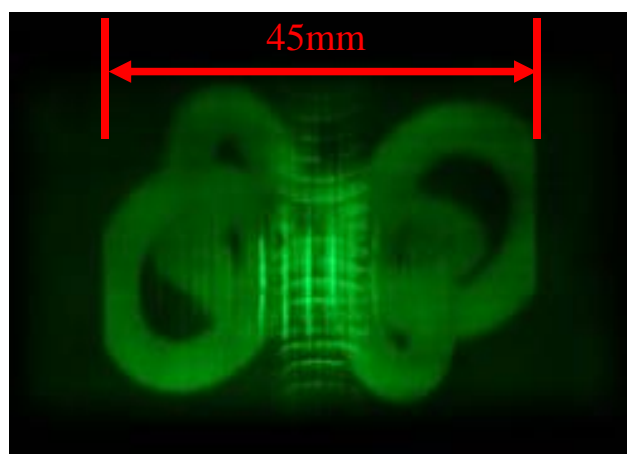


Fig.5 A picture of the CGH surface printed by off-axis system.



(a) Paraxial Denisyuk-type optical system



(b) Off-axis Denisyuk-type optical system(this work)

Fig.6 Pictures of optical reconstructions of the printed CGHs.

- [4] 青柳翔真, 廣橋美葵, 山口健, 吉川浩: "フルカラー体積型ホログラムプリンタの構築", HODIC Circular **37**, No. 3, 18-21 (2017).
- [5] 齋藤智崇, 松島恭治: "デニシユク型光学系を用いた波面プリンタの開発", 3次元画像コンファレンス 2017, P-3 (2017).