

デニシユク型光学系を用いた波面プリンタの基礎研究

Basic Study of a Wavefront Printer Using Denisyuk-type Optical System

齋藤智崇

松島恭治

Tomotaka Saito

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 wavefront printer is equipment used to produce computer-generated holograms (CGH) as volume holograms that feature reconstruction with white light illumination because of wavelength selectivity. To produce volume holograms, a reference wave must enter into the recording material from the side opposite to the object wave, which is generated by a spatial light modulator (SLM). However, if this is realized by branching a laser beam, the optical system is so complicated that optical intensity of the object wave is commonly very weak. In this paper, we propose a wavefront printer using the Denisyuk-type optical system. This type of optical system makes the wavefront printer simple and allow us to enhance the optical intensity of the object wave.

Keyword: volume hologram, CGH, wavefront printer

1. はじめに

コンピュータで仮想物体モデルを作成し、その仮想物体からの光波の干渉縞を数値計算して作製する計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram, 以下 CGH)の干渉縞を描画する方法として、我々がかつて、ホログラム乾板に干渉縞をドットごとに描画するフリンジプリンタの開発を行ってきた[1,2]. 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。たとえば、「The Moon」や「Shion」などの数十億ピクセルもの大規模 CGH を報告している[3]. しかしながら、この方法で作製された CGH を白色光で再生すると色収差により著しい色にじみが生じ

てしまう。波長選択性のある体積型ホログラムであればこのような問題は生じないため、描画光波を空間光変調器(Spatial Light Modulator, 以下 SLM)を用いて発生させ、参照光と干渉して体積型 CGH を描画する波面プリンタの開発が進められている[4,5]. 同様に体積型ホログラムを描画するホログラフィックプリンタがホログラフィックステレオグラムを作製するのに対し、波面プリンタは原理的に波面そのものを再生するため、深い奥行き3D画像を再生できる利点がある。

一般の光学ホログラフィにおいて体積ホログラムを記録するためには、Fig.1の(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、記録材料に対して互いに反対方向から入射する必要がある。しかし、この方法では光学系が複雑になり、またレーザーを分岐するため、光強度が弱くなってしまいう問題がある。一方、Fig.1の(b)に示すデニシユクホログラムの手法では、記録材料を通して物体を照射するため、簡素な光学系によって体積型ホログラムを

齋藤智崇

<saito@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)

記録することができる。

そこで、本研究ではこの考え方を応用し、簡素な光学系によって体積型 CGH を描画する波面プリンタを提案する。本研究ではこれをデニシュク型光学系と呼んでいる。本報告では、提案手法を用いて作製した CGH の再生像を示す。

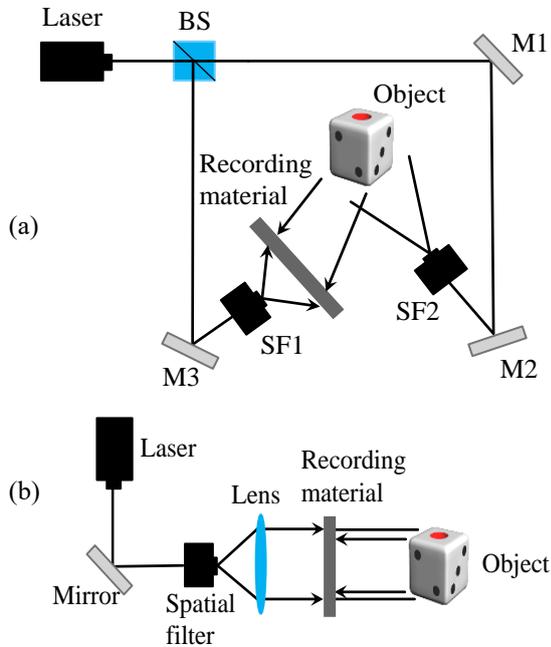


Fig.1 The recording step of a volume hologram in conventional optical holography.

2. デニシュク型光学系の構造と原理

2.1 デニシュク型光学系

波面プリンタをデニシュク型光学系で実現する方法は幾つか考えられるが、本研究で試みた光学系を

Fig.2 に示す。この光学系では、体積型ホログラムを記録するため、反射位相変調型 SLM で発生された描画波面と入射光を逆方向から記録材料に入射する。SLM の非回折光/高次回折光を除去するために $4f$ 光学系を用いるが、この時レーザー光を分岐せず、記録材料および $4f$ 光学系を透過して SLM を照明する。また、入射光をフーリエレンズ 1 に対してわずかに斜入射する。その結果、SLM 照明光も斜入射となり、非回折光および高次回折光を除去するために必要なバンドパスフィルタを軸外れで設置でき、入射光がこのフィルタを通過できる。

2.2 入射角とバンドパスフィルタの設計

入射光と SLM 変調光の光路図を Fig.3 に示す。またフィルタの設計を Fig.4 に示す。フーリエレンズ 1 に対して θ の角度で斜入射した入射光がフーリエ面上で集光する位置は

$$d_1 = f_1 \sin \theta \quad (1)$$

となる。ここで f_1 はフーリエレンズ 1 の焦点距離である。一方で、SLM 変調光の 0 次光がフーリエ面上で集光する位置は

$$d_2 = f_2 \sin \theta \quad (2)$$

となるため、Fig.4 に示すように、この位置に 0 次光を遮蔽するハイパスフィルタが必要である。ここで f_2 はフーリエレンズ 2 の焦点距離である。

これら二つの光の集光点はフーリエ面上で距離

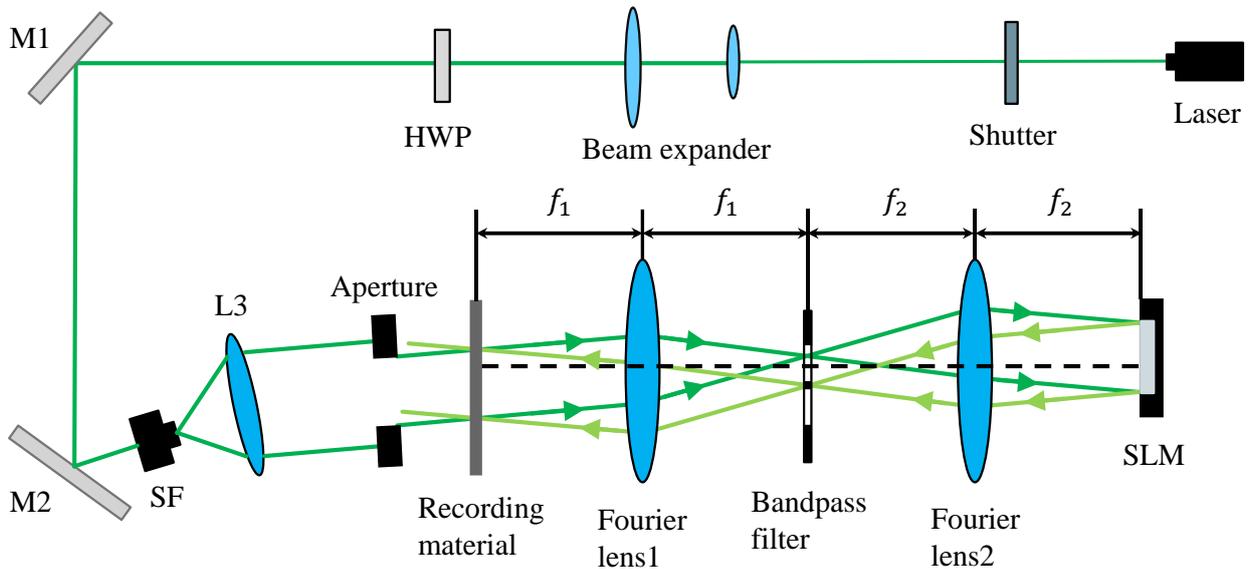


Fig.2 A wavefront printer using Denisyuk-type optical system.

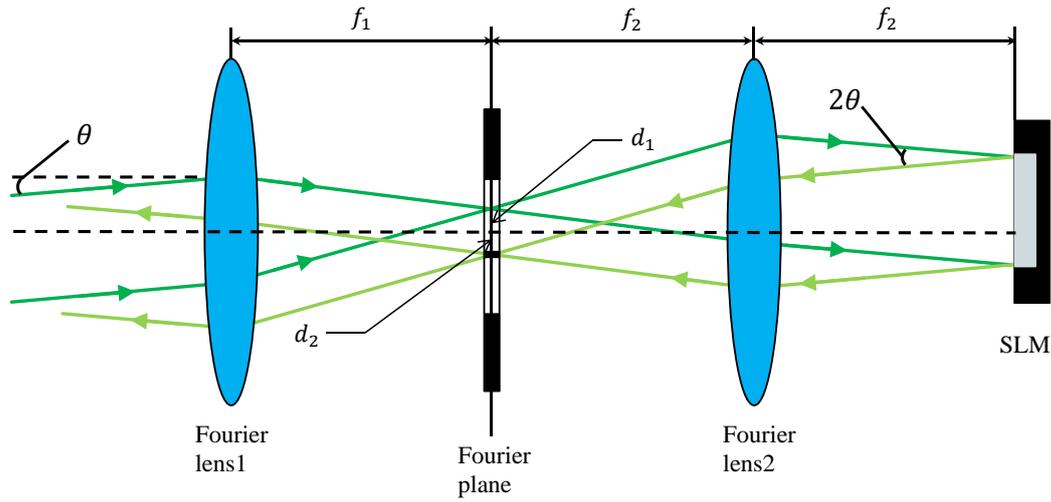


Fig.3 The optical path of incident light and reflected light form SLM.

$$d_3 = d_1 + d_2 = (f_1 + f_2) \sin \theta \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{\lambda f_2}{4(f_1 + f_2) \delta_x} \right\} \quad (6)$$

となる.

離れることになる.

また, SLM のピクセル数を $N_x \times N_y$, ピクセルピッチを $\delta_x \times \delta_y$ とすると, フーリエ変換像の大きさは

$$W_x \times W_y = \frac{\lambda f_2}{\delta_x} \times \frac{\lambda f_2}{\delta_y} \quad (4)$$

と表され, 高次回折像を除去するためのローパスフィルタはこのサイズとなる. 入射光はこの両方のフィルタマスクを避けて SLM に到達する必要がある. そのためには, Fig.4 に示したように,

$$\frac{W_x}{4} = d_3 \quad (5)$$

として, 両フィルタのちょうど中間を通るようにすればよいことがわかる. したがって, 入射角は

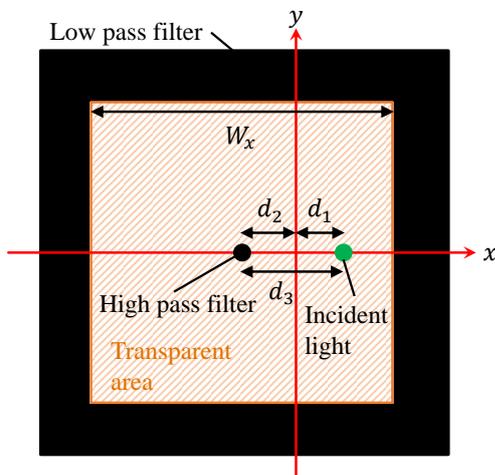


Fig.4 Design of the band pass filter and incident light in the Fourier plane.

3. 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 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 $f_1 = f_2 = 200$ [mm] である. 従って, $W_x = 13.3$ [mm] となり, $\theta = 0.47$ [°] となる. 本プリンタで描画する物体モデルと 3D シーンを Fig.5 に示す. 物体モデルは, 点光源法で計算した六角錐のワイヤーフレームである. このモ

Table 1 Specifications of SLM used for the wavefront printer.

Maker	HOLOEYE
Model number	PLUTO
Number of pixels	1,920 × 1,080
Pixel Pitches	8 × 8 μm
Modulation level	256 (8bit)

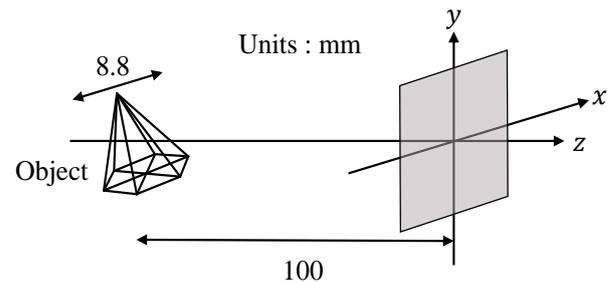


Fig.5 The 3D scene used for printing volume CGH.

Table 2 Parameters of the object field.

Number of samples	1,920×1,080
Wavelength	532 nm
Sampling interval	8×8 μm

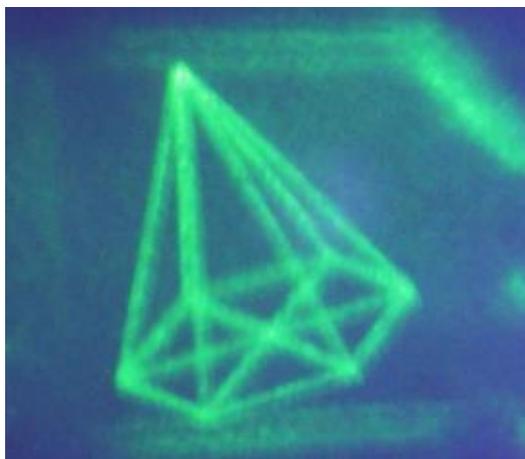
デルをホログラム面から 100mm 離れた位置に配置している。描画波面のパラメータを Table 2 に示す。

4. 光学再生像

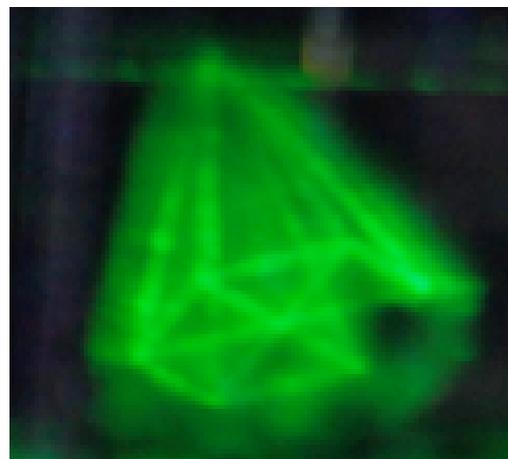
Fig.6 (a)に提案手法でフォトポリマーに描画したホログラムを白色光源で再生した再生像を示す。従来手法の波面プリンタの再生像(b)に比べて再生像が鮮明に見えていることがわかる。従来手法では描画光の強度が低いため露光時間が 300 秒必要であったのに対して、提案手法では光強度が増加したため、露光時間を 90 秒に短縮できた。しかし、提案手法の光学系ではフーリエレンズ 1 の入射角度が極めて小さいため、再生時に照明光をほぼ垂直にホログラムに入射する必要がある。

5. まとめ

デニシユクホログラムの記録手法の考え方を応用し、従来の波面プリンタよりも簡素な光学系によって体積型 CGH の描画を行うデニシユク型光学系を用いた波面プリンタを提案した。また、提案手法を用いて作製した体積型 CGH の再生像を確認した。今後は、提案手法よりも大きな角度で入射可能な光学系の考案、またタイリングにより大規模な CGH の描画を試みる予定である。



(a) This work



(b) Conventional technique

Fig.6 Optical reconstructions of printed CGHs

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費(15K00512)、および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成 25 年～平成 29 年)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 宮内宏之, 山中俊介, 栗林佑宇真, 松島恭治: デジタル合成ホログラム描画用フリンジプリンタ, 3次元画像コンファレンス 2004, 89-92 (2004).
- [2] K. Mastushima, S. Kobayashi, H. Miyauchi: A high-resolution fringe printer for studying synthetic holograms, SPIE Proc. **6136**, 347-354 (2006).
- [3] K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara: Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography, J. Electron. Imaging **21**, 023002 (2012).
- [4] W. Nishii, K. Matsushima: A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms, SPIE Proc. **9006**, 90061F (2014).
- [5] 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).