

空間位相変調器を用いた 体積型計算機合成ホログラム描画用波面プリンタ

西井 渉[†] 松島 恭治[†]

[†] 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

E-mail: nishii@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし 波面プリンタは、体積ホログラムとして計算機合成ホログラム(CGH)を作製する描画装置であり、空間光変調器(SLM)によって発生させた波面を記録する。提案する方式では、広い空間バンド積を得るために位相型 SLM を使用しており、位相変調によるコーディングノイズの影響で波面が劣化する問題がある。本研究では、位相型 SLM の位相変調と偏光角度変調の併用により位相と振幅の両方を変調した波面を描画することで、位相変調によるコーディングノイズを緩和する手法を報告する。

キーワード 体積ホログラム, 計算機合成ホログラム, 波面プリンタ, 位相型空間光変調器, 複素振幅変調

A wavefront printer using phase SLM for producing computer-generated volume holograms

Wataru NISHII[†] Kyoji MATSUSHIMA[†]

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University
Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: nishii@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract The wavefront printer is equipment for producing computer-generated holograms (CGH) as volume holograms. This printer records the wavefront generate by spatial light modulator (SLM). We use the phase-only SLM to generate the wavefront because of its wide space-band product. However, the phase-only SLM causes a problem of degradation of reconstructed images because of coding noise due to phase only modulation. This paper describes a technique to make complex amplitude modulation by using a phase-only SLM and ease the coding noise.

Keyword volume hologram, CGH, wavefront printer, phase-only SLM, complex amplitude modulation

1. はじめに

コンピュータホログラフィは、コンピュータ上でホログラムの干渉縞パターンを数値合成する技術であり、これによって合成されたホログラムは計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram 以下, CGH)と呼ばれる。従来の CGH は 2 次元の干渉縞画像として専用的高精細プリンタ [1-3] 等で描画されたが、この方法では、イメージ型以外では再生時に単色照明光が必須であり白色光での再生は難しいという問題がある。一方、白色光再生が可能な体積ホログラムとして CGH を作製するホログラフィックプリンタが存在する [4]。しかし、これによって作製されるのはホログラフィックステレオグラムであり、奥行きが浅い再生像しか得られないという問題がある。これに対して、波面プリンタと呼ばれる CGH 描画装置が提案されている。波

面プリンタは、空間光変調器(Spatial Light Modulator 以下, SLM)によって描画波面を発生させて参照光と干渉することで、体積ホログラムとして CGH を作製する [5,6]。波面プリンタで作製された CGH は物体光波を再生するため、原理的に奥行きが深い再生像を得ることができる。描画波面の発生に用いられる SLM には振幅型または位相型があるが、我々は広い空間バンド積を得るために位相型 SLM を使用する方式を提案している。しかし、位相型では位相変調によるコーディングノイズの影響で描画波面が劣化する問題がある。

そこで本研究では、位相型 SLM による位相変調だけでなく偏光角度変調を併用することにより位相だけでなく部分的に振幅も変調した波面を描画することで、位相変調によるコーディングノイズの緩和を試みた。

2. 波面プリンタ

2.1. 構造

本研究の波面プリンタの構造を Fig.1 に示す. 本波面プリンタでは, SLM によって仮想物体光波の波面(描画波面)を発生し, 素材を挟んで反対側から入射する参照光と干渉露光することで体積ホログラムとして CGH の干渉縞を記録する. この時, SLM は空間分解能が低いため, レンズ 2 枚を用いたアフォーカル系を用いて縮小投影することで空間分解能を高めている. また, SLM で発生できる描画波面のサイズが小さいため, 複数の波面をタイリングし, 一つの波面を描画する. なお, SLM の非変調光を除去するために 1 枚目のレンズの焦点面にハイパスフィルタを設置し, 参照光の露光面積を描画波面と同じにするために, 参照光側にも開口を設置して感光材料に照射している.

2.2. 複素振幅変調の原理

位相型 SLM による複素振幅変調の原理を Fig.2 に示す. 位相型 SLM では, SLM に表示するピクセル値に応じて変調光波の位相が変化する. この時, 偏光角度の方も完全に一定ではなく, 僅かに変化する. ピクセル値 g における変調光波の偏光角度と参照光波の偏光角度の差を $\theta(g)$ とすると, 干渉で記録される成分は

$$A(g) = A_0 \cos(\theta(g)) \quad (1)$$

となり, Fig.2 に示すように偏光角度によって変化することになる. ここで A_0 は本来の描画波面の振幅である. 従って描画波面がピクセル値 g に応じて複素振幅変調されていると考えることができる. この様に, 位相型 SLM の位相変調だけでなく偏光角度変調も併用する

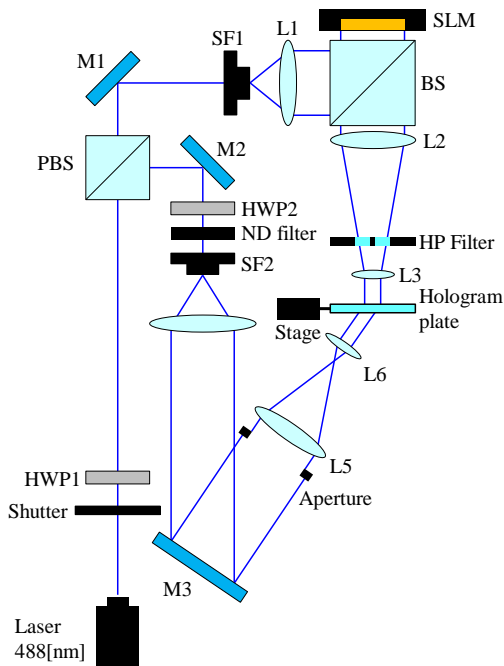


Fig.1 波面プリンタの構造

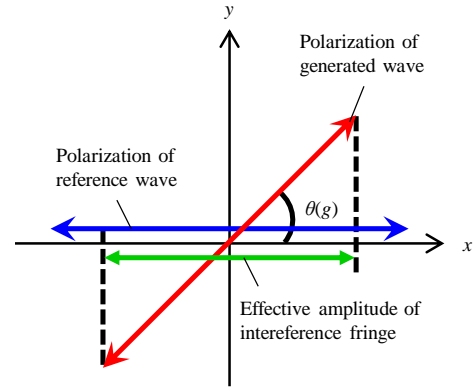


Fig.2 複素振幅変調の原理

ことで複素振幅変調された光波を記録することができる.

3. 複素振幅変調値の導出

3.1. 位相変調量の導出

Fig.3 に位相変調量を導出するための光学系を示す. ダブルピンホールを用いてビームを二つに分割し, それぞれのビームを SLM に照射する. この時, SLM 面の半分をピクセル値 0 で一定とし, 一方のビームをそこに照射する. もう一方のビームが入射する半面のピクセル値を変化させ, 得られた干渉縞をイメージセンサで記録する. 得られた干渉縞を Fig.4 に示す. (a)は SLM 全体のピクセル値を 0 で一定として得た干渉縞であり, これを位相測定のための基準とした. (b)は干渉縞が反転し(a)と比べて π だけシフトした場合である. (a)から (b)へ移り替る際の干渉縞の移動量から各ピクセル値に対する位相シフト量を位相変調量として導出した.

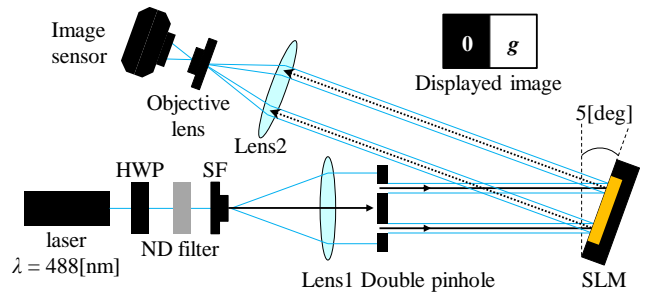


Fig.3 位相シフト量測定光学系

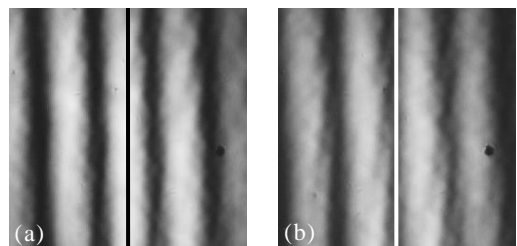


Fig.4 異なるピクセル値から得た干渉縞(a),(b)

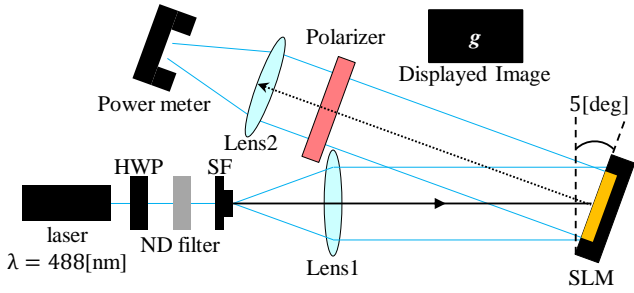


Fig.5 振幅変調量測定光学系

3.2. 振幅変調量の導出

Fig.5 に振幅変調量を導出するための光学系を示す. 本実験では, 半波長板を用いて SLM の変調効率が最大となるように入射光の偏光面を回転している. また, 偏光板はパワー変化が最大となる角度に設定する. この角度が描画時の参照光の偏光面角度となる.

SLM 全面に一定のピクセル値 g を表示して, 光を入射すると, SLM によって変調された変調光と変調されない非変調光が重ね合って出射する. このとき測定される光パワーは

$$I(g) \propto [E_0 + E(g)]^2 \tag{2}$$

となる. ここで E_0 と $E(g)$ は, それぞれ偏光板透過後の非変調光と変調光の振幅である. 描画時の参照光の偏光面角度は本実験と同じであるので, $E(g)$ が描画波面の振幅となる. 式(1)より, 変調光の振幅は

$$E(g) \propto \sqrt{I(g)} - \sqrt{I_0} \tag{3}$$

となる. ここで, $I_0 \propto E_0^2$ は非変調光の光パワーである.

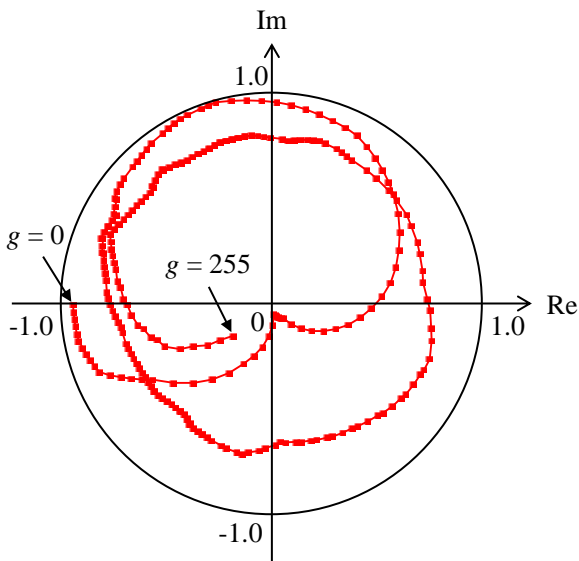


Fig.6 SLM のピクセル値 g に対する疑似複素振幅変調値

3.3. 複素振幅変調値

以上で求めた位相変調量 $\varphi(g)$ と振幅変調量 $E(g)$ より, 表示ピクセル値 g に対する描画波面の複素振幅変調値は

$$\tilde{E}(g) = E(g) \exp[i\varphi(g)] \tag{4}$$

として求められる. Fig.6 に得られた複素振幅変調値を複素平面図で表示した結果を示す.

4. SLM 表示パターンのコーディング方法

求めた複素振幅変調値から SLM 表示パターンをコーディングする手順を Fig.7 に示す. ここで, u は描画したい波面の複素振幅値, $f(g)$ は SLM の表示ピクセル値 g に対する複素振幅値である. コーディングでは, 描画波面との位相差

$$\Delta\theta_n = |\arg(u) - \arg(f(g_n))| \tag{5}$$

が最も小さいピクセル値から順に N 個の候補 g_0, \dots, g_{N-1} を取り出し, 次に, これらの候補ピクセル値と描画波面の振幅差

$$\Delta A_n = ||u| - |f(g_n)|| \tag{6}$$

を最小にするピクセル値を選択する. この様に位相差を優先して探索を行う理由は, 位相型 SLM を使用しているため位相の方が高精度に変調できること, および波面の情報は主に位相に含まれているためである. 本報告の再生像では, 具体的にはピクセル値の候補数を $N=2$ としてコーディングを行っている.

5. CGH の描画

Fig.1 の波面プリンタを用いて CGH を作製した. 描画波面の発生に使用した SLM の仕様を Table 1 に示す. 光源には 488[nm] の青色レーザーを使用しており, 参

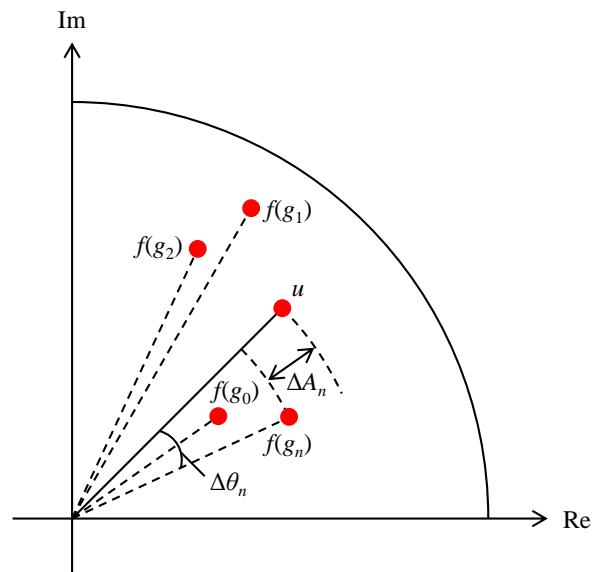


Fig.7 SLM 表示パターンのコーディング手順

Table 1 波面プリンタに使用した SLM の仕様

| | |
|------------------|-------------|
| Manufacturer | HOLOEYE |
| Model number | PLUTO |
| Number of pixels | 1,920×1,080 |
| Pixel pitches | 8×8μm |
| Modulation level | 256(8bit) |

照光の偏光面角度は、振幅変調量測定時に設定した偏光板の角度になるように半波長板を用いて回転している。本プリンタで描画する物体を Fig.8 に、描画波面のパラメータを Table 2 にそれぞれ示す。今回描画した物体は、点光源法によるワイヤーフレームモデルである。

本研究の波面プリンタで作製した CGH の光学再生像を Fig.9 に示す。提案法の方が従来法と比べて背景ノイズが少なく、物体が高コントラストで再生されていることが分かる。

6. まとめ

位相型 SLM の位相変調と偏光角度変調を利用して疑似的に複素振幅分布を描画する手法により、従来法と比べて鮮明な再生像を得ることができた。

本研究は、日本学術支援振興会の科研費(24500133)、平成 25 年度関西大学学術研究助成基金(共同研究)、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。

文 献

[1] 山中, 松島: “デジタル合成ホログラム用高解像度プリンタの高精度化”, 映像情報メディア学会 **58**, 1665-1668(2004).
 [2] H. Yoshikawa and M. Tachinami: “Development of direct fringe printer for computer-generated holograms”, SPIE Proc. **5742**, 5742-33(2005).

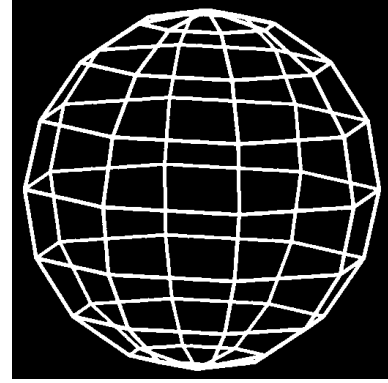
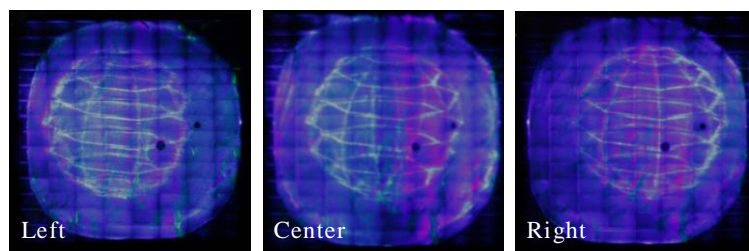


Fig.8 描画した物体モデル

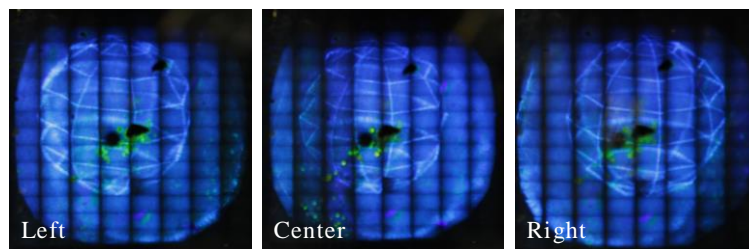
Table 2 作製した体積型 CGH のパラメータ

| | |
|----------------------------------|----------------------------|
| Number of total pixels | 30,720×30,240pixel |
| Effective pitches | 2.0×2.0μm |
| Size of hologram | 30.72×30.24mm ² |
| Number of pixels of a tile | 1,920×1,080pixel |
| Number of tiles | 8×14 |
| Wavelength | 488nm |
| Position of the center of object | (0, 0, -30)mm |

[3] K. Matsushima and S. Nakahara: “Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method”, Appl. Opt. **48**, H54-H63 (2009).
 [4] M. Yamaguchi, N. Ohya, and T. Honda: “Holographic three-dimensional printer: new method”, Appl. Opt. **31**, 217-222 (1992).
 [5] 春口, 高辻, 松島: “体積型ホログラムパターンを描画可能な波面プリンタの開発”, 第 5 回新画像システム・情報フォトンクス研究討論会講演予稿集, 18-19(2011).
 [6] T. Yamaguchi, O. Miyamoto and H. Yoshikawa: “Volume hologram printer to record the wavefront of three-dimensional objects”, Opt. Eng. **51**, 075802 (2012).



(a)位相変調のみ



(b)位相変調+偏光角度変調

Fig.9 作製した CGH の白色光による光学再生像