

体積型 CGH 描画用波面プリンタのための空間光変調器を用いた複素振幅書き込みの基礎研究

A study of complex amplitude recording by spatial light modulators in wavefront printer for producing volume CGHs

○西井渉, 岩田直大, 松島恭治

○Wataru Nishii, Naohiro Iwata, and 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

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

The wavefront printer is equipment used to produce computer-generated holograms (CGH) as volume holograms that are capable of reconstructing 3D images with white light illumination. However, phase-type spatial light modulators (SLM), used for generating recorded wavefront, commonly modulate not only the phase but also the polarization angle of the incident field. This angle modulation leads to effective amplitude modulation of the recorded wavefront. This paper describes a method to measure effective complex amplitude modulation of SLMs for recording wavefronts.

1. はじめに

計算機合成ホログラム(CGH)は数値計算によって干渉縞を求め、それを描画することで作製するホログラムである。CGHにおいて近年、空間光変調器(SLM)によって描画波面を発生させ参照光と干渉して体積ホログラムを描画するプリンタが白色光再生が可能なことから注目されている^{1,2)}。我々はこれを波面プリンタと呼んでいる。本研究では、偏光板を取り除いた位相型 SLM による位相変調と偏光角度変調を用い、光波の複素振幅を直接書き込むタイプの波面プリンタを目指して基礎的な実験を行った。本論文では位相型 SLM に表示するピクセル値に対して実質的に書き込まれる複素振幅値を測定した結果を報告する。

2. 波面プリンタと複素振幅書き込みの原理

本研究の波面プリンタの原理を 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書き込み波面を発生し、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 で発生できる書き込み波面の範囲が小さいため、複数の波面をタイリングし、一つの波面を描画する。さらに、SLM の空間分解能が低いことから、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により分解能を高めている。

ここで、位相型 SLM を用いた場合、変調光波は SLM に表示するピクセル値に応じて位相と偏光角度の両方が変化する。参照光波は一定の偏光面を持っているため、干渉縞強度は偏光角度によって変化する。これはすなわち、書き込み光波の位相と振幅(複素振幅)が実質的にピクセル値に応じて変調されていると考えることができる。

3. 偏光角度の測定

SLM の偏光角度を測定する光学系を Fig.2、実験で使用した SLM の仕様を Table 1 にそれぞれ示す。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、その入射偏光面と同じ角度に偏光板を設置する。また、高次回折光を遮断し、SLM 面の中央付近に測定位置を限定するために開口を設置している。

SLM の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

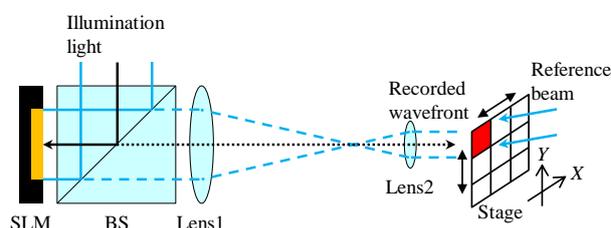


Fig. 1 The principle of the wavefront printer used for producing volume CGHs.

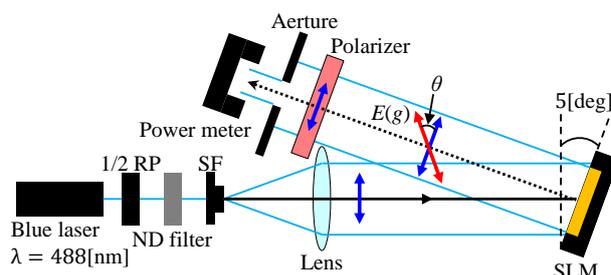


Fig. 2 The experimental setup for measuring the angle of polarization of the output field of the SLM.

Table 1 Parameters of phase-type SLM.

Type	LCOS(reflective)
Number of Pixels	1,920×1,080
Pixel Pitches	8μm×8μm
Modulation depth	2π
Modulation level	256(8bit)

$$I(g) \propto [E_0 + E(g)]^2 \quad (1)$$

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電界強度である。実際のプリンタで参照光の偏光面を本実験の偏光板の角度と一致させることにより、 $E(g)$ が書き込み光の見かけの電界強度となる。式(1)より、回折光の電界強度は

$$E(g) \propto \sqrt{I(g)} - \sqrt{I_0} \quad (2)$$

となる。ここで、 $I_0 = E_0^2$ は非変調光の光パワーであり、SLM に通電しない状態で測定した光パワーである。得られた $E(g)$ の測定結果を Fig.3 に示す。

4. 位相シフト量の測定

Fig.4 に変調光の位相シフトを測定するための光学系を示す。ダブルピンホールを用いて入射光を二つのビームに分割し、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.5 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。(c) は偏光面の回転により干渉縞のコントラストが減少した結果である。(a) から (b) へ移り替わ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求めた。なお、この実験方法は SLM のメーカーが位相シフト量を線形化補正するために指定している方法でもあるので、まずそれによって、位相シフト量とピクセル値を線形補正するように SLM を設定し、次に、線形補正後の SLM の位相シフト量とピクセル値の関係を最小二乗法で求めた。その結果、ピクセル値 g と位相シフト量の関係は

$$\phi(g) = 0.0088g + 0.0316 \text{ [rad]} \quad (3)$$

となった。

5. ピクセル値と複素振幅値の関係

以上で求めた電界強度 $E(g)$ と位相シフト量 $\phi(g)$ より、書き込み光波の実質的な複素振幅値は

$$\tilde{E}(g) = E(g) \exp[i\phi(g)] \quad (4)$$

として求められる。得られた複素振幅値とピクセル値の関係を Fig.6 に示す。

6. まとめ

本研究では、体積型 CGH 描画用波面プリンタにおいて位相型 SLM を用いて光波の複素振幅を書き込むための基礎研究として SLM のピクセル値に対する書き込み光波の複素振幅値を測定した。今後は得られた複素振幅値を用いて書き込みたい波面に最適な SLM 表示パターンをコーディングし、実際に体積ホログラムとして転写することを試みる。

参考文献

- 1) 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”, 新画像システム・情報フォトニクス研究討論会講演予稿集, 18-19(2011).
- 2) 山口, 宮本, 吉川: “体積型ホログラムプリンタの開発 —ホログラム面付近にある物体の記録の問題点とその改善—”, 3次元コンファレンス 2012 講演論文集, 98-101(2012).

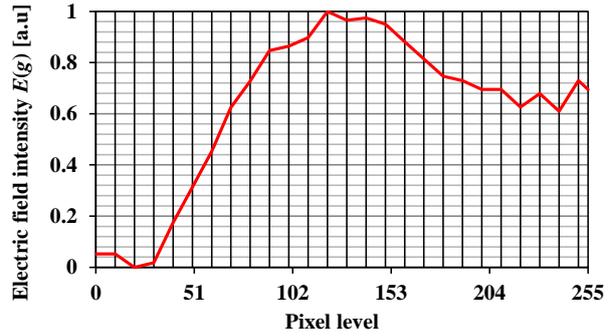


Fig. 3 Electric field intensity $E(g)$

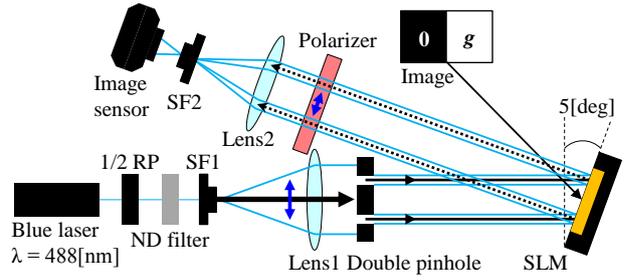


Fig. 4 The experimental setup for measuring phase shift of the SLM.

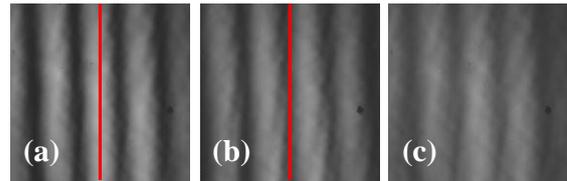


Fig. 5 Interference fringe obtained from different pixel levels (a)-(c).

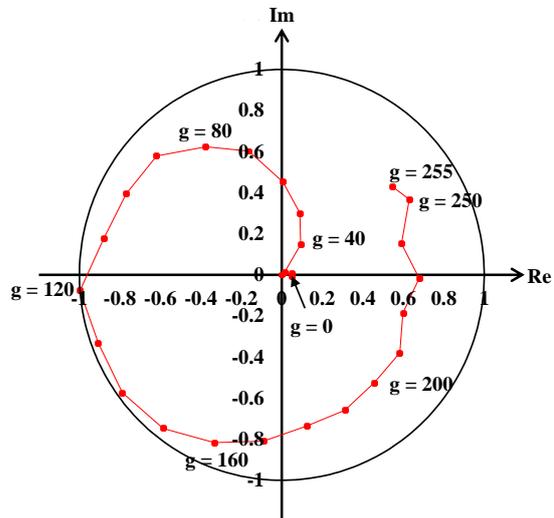


Fig. 6 Effective complex amplitude of recorded fields in the wavefront printer.