

高解像度 CGH 照明用スペクトル狭帯域化 ホログラフィック光学素子の作製

Fabrication of holographic optical element for narrowing spectrum of illumination light in high definition CGH

山崎光誠

五十嵐勇祐

松島恭治

Kosei Yamasaki

Yusuke Igarashi

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

When an LED is used for the illumination light source of high-definition CGHs, the reconstructed image is often blurred due to chromatic aberration. This problem can be solved by using a laser light source because of its narrow band. However, a coherent light source has the problem of speckle noises as well as a risk to human eyes. In this paper, a method to narrow the spectrum of LEDs using a holographic optical element (HOE) is proposed for eye-safe and sharp optical reconstruction of high-resolution CGHs. Lighting units using the fabricated HOE are also designed and fabricated for practical exhibition.

Keywords: CGH, HOE, オーバーサンプリング

1. はじめに

近年、コンピュータホログラフィの進歩により、高解像度計算機合成ホログラム(以下 CGH)を実際に展示する機会が増えている。しかし、高解像度 CGH は一般に薄いホログラムであるため、実際の展示では、非回折光の非常に明るい光輝が観察の邪魔になったり、共役像が真の像と重なったりする問題が生じる。これらの問題は、再生照明光の CGH に対する入射角を大きくすることで回避できる。しかし、そのためには干渉縞の画素ピッチを小さくする必要があり、その結果、物体光波計算時間の長大化を招く問題がある。

そこで、計算時間を長大化せずに高解像度 CGH の画素ピッチを細かくする手法として考案された技術が、干渉縞オーバーサンプリングである[1]。この技術では物体光波を従来のサンプリング間隔で計算し、

それを補間して参照光を数値的に干渉させることにより干渉縞パターンを計算する技術である。しかし、この技術を用いた CGH は波長以下の画素ピッチを有するため、LED 光源で照明すると色収差による再生像のボケが顕著に生じる問題がある。この問題は、狭帯域なスペクトルを持つレーザー光源を用いれば解決できるが、レーザー光源は高価であったり大型であったりするだけでなく、視覚への危険性やスペックルノイズの問題がある。

そこで、本研究では体積ホログラムであるホログラフィック光学素子(以下 HOE)を用いて LED 光源のスペクトルを狭帯域化し、LED 照明による高解像度 CGH の再生像品質の向上を試みた。本論文では、干渉縞オーバーサンプリングした最小画素ピッチ $0.4\ \mu\text{m}$ の高解像度 CGH をピグテイル LED 光源により鮮明に再生することを目的として作製したスペクトル狭帯域化 HOE の作製とそれを用いた照明ユニットを報告する。

2. スペクトル狭帯域化照明光源

2.1. 構成

スペクトル狭帯域化光源の構成を Fig.1 に示す。

山崎光誠

<yamasaki@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)

本研究では、LED 光源の出力を HOE に入射し、そのスペクトルを HOE により狭帯域化し、その反射回折光で CGH を照明する。従って、HOE には高い回折効率と波長選択性が必要であるため、そのような特性が得られるようにパラメータを最適化して HOE の製作を行う。

2.2. HOE の特性

HOE は体積ホログラムの一種であり、参照光と物体光波を記録材料に対して反対側から入射することにより作製する。その波長選択性と回折効率は、入射角度等に依存して変化する。そこで、Fig.2 に示す二光束干渉法を用いて、本研究で使用する記録材料である COVESTRO 社のフォトポリマー Bayfol®HX200 の回折効率と波長選択性の測定を波長 640 nm(赤色)と 532 nm(緑色)の 2 波長で行った。この実験では焦点距離 50mm と 80mm のレンズ L1 と L2 を用いて作成した平行光を干渉させ、サイズ約 30mm の HOE を作製した。用いたパラメータを Table 1 に示す。いま L1 を通過する側のビームを HOE の入力光、L2 を通過する側を出力光として、入力光と出力光の角度を $\varphi=90^\circ$ に固定し、入力光に対する記録材料の角度 θ を 30° から 60° まで変化した HOE を作製した。この HOE に入力光として作製時と同じビームを入射して回折効率を、また LED の光を入力して出力光のスペクトルを測定した。

回折効率の測定結果を Fig.3 に示す。図のエラーバーは最大最小を示している。この結果より、赤色、緑色ともに $\theta=50^\circ$ で回折効率が最大になっていることが分かる。波長選択性の指標であるスペクトル幅の測定結果を Fig.4 に示す。この結果から赤色では θ が大きくなると線幅が小さくなり、波長選択性がよくなる傾向にあると分かるが、緑色では $\theta=60^\circ$ のみ波長選択性が向上し、それ以外はほぼ一定であった。しかし、測定範囲内ではスペクトルは十分狭帯域化されており、機能的には問題ないと考えられる。これらの結果から、入力光と記録材料の角度は回折効率が最も良かった $\theta=50^\circ$ とした。一方、入力光と出力光の角度は、 $\varphi=180^\circ$ に近づくほど波長選択性が強く働くことが理論的にわかっている。そのため、できるだけ 180° に近く、また実際に照明光源として

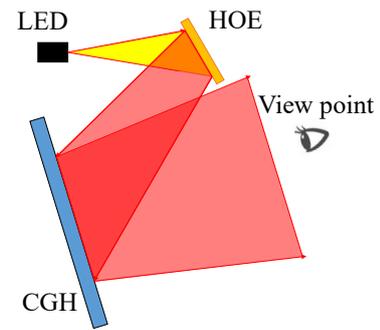


Fig. 1 Narrowing the spectrum of the LED light source by HOE.

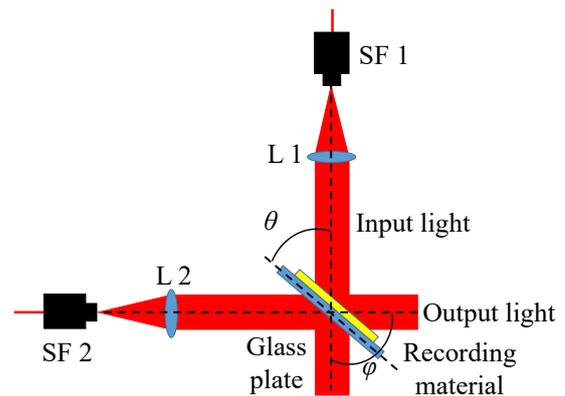


Fig. 2 Setup for two-beam interference to fabricate volume holograms and measure properties of HOE.

Table 1 Parameters used for HOE recording.

Color	Red	Green
Wavelength [nm]	640	532
Exposure [mJ/cm ²]	15	20
Ratio of input to output light	1:1	
Exposure time [s]	2	
Number of trials	3	

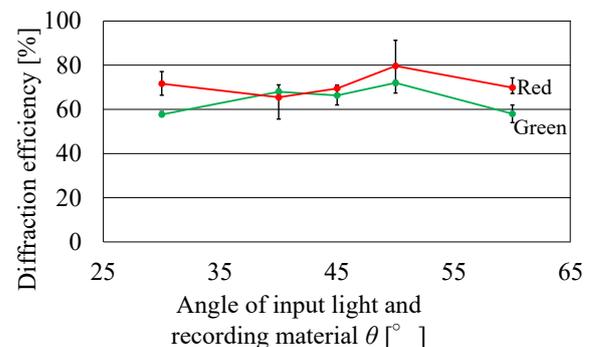


Fig. 3 Diffraction efficiency for incident angles in Bayfol®HX 200.

配置できる角度として, 本研究では $\phi = 150^\circ$ とする.

2.3. HOE の製作とその出力スペクトル

本研究で用いる照明に用いる LED 光源はピグテイル型であり, ファイバ端面からの光の発散角は約 45° である. HOE のサイズを 30mm として HOE の設計した結果が Fig.5 である. この HOE を Fig.6 の光学系を用いて製作した. ここで, 入力側には倍率 40 倍, 出力側には 20 倍の対物レンズを用いたため, 本研究で使用したレーザー光源を組み合わせる場合, 対物レンズからの光の発散角は赤色で 17° , 緑色で 13° となった. これが HOE の出力光の発散角 θ_d となる. なお, HOE の製作に用いたパラメータは Table 1 と同じである.

通常の LED 出力とそれを HOE で反射した場合のスペクトルの測定結果を Fig. 7 と 8 に示す. いずれも, (b)にオレンジ色で示したスペクトルは, カラーフィルタ方式フルカラーCGH において LED 光がカラーフィルタを往復で透過した場合の実効照明スペクトルである[2]. 本研究で製作した HOE を用いた方が狭帯域であることがわかる.

3. 照明光源ユニットの作製と CGH の光学再生

作製した HOE を組み込んだ照明ユニットの作製を行った. その構造を Fig.9 に示す. このユニットはピグテイル LED 光源のファイバ・パッチケーブルのフェルールを挿入することで, 赤色で 17° , 緑色で 13° の発散角の狭帯域化光を放出する. 製作した照明ユニットの写真を Fig.10 に示す.

製作した照明ユニットを用いて, 実際に CGH の光学再生を行った. 本実験で用いた約 5cm 角の高解像度 CGH の 3D シーンを Fig.11 に示す. この CGH をおよそ 120mm 離して設置した HOE で照明することを想定して, 赤と緑それぞれの CGH の参照光源位置を決定した. そのパラメータを Table 2 に示す.

通常の赤色 LED 光源を用いた場合とスペクトル狭帯域化HOEを用いた場合の再生像の比較を Fig.12 に示し, 同様に, 緑色の場合の比較を Fig.13 に示す. 赤色, 緑色ともに狭帯域化した再生像の方がシャープになっていることが確認できる. また, 元々スペクトルが広い緑色 LED では, スペクトル狭帯域化

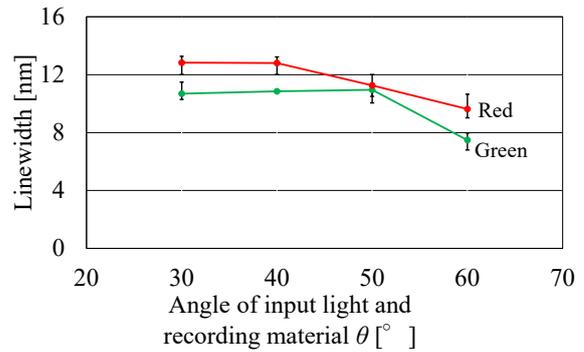


Fig. 4 Wavelength selectivity of incident angles in Bayfol®HX200.

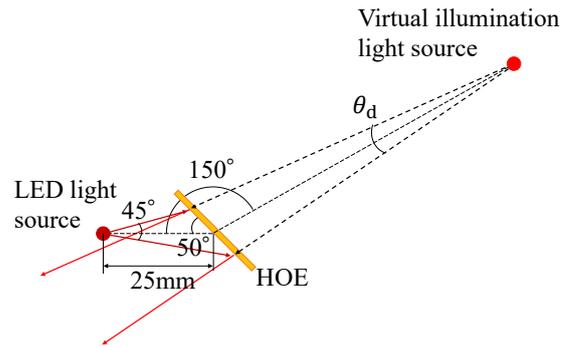


Fig. 5 Design of HOEs.

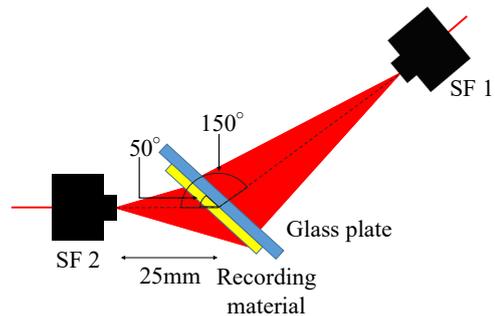


Fig. 6 Optical setup for fabricating HOEs.

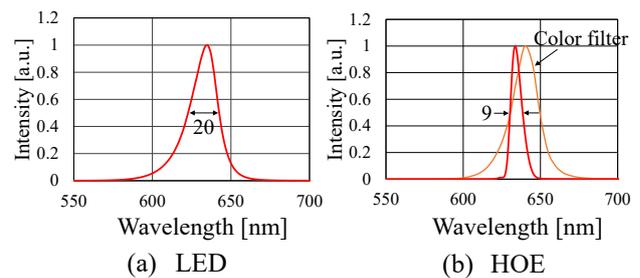


Fig. 7 Spectra of LED and HOE outputs (Red).

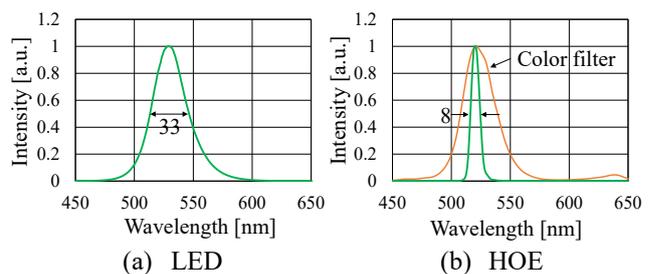


Fig. 8 Spectra of LED and HOE outputs (Green).

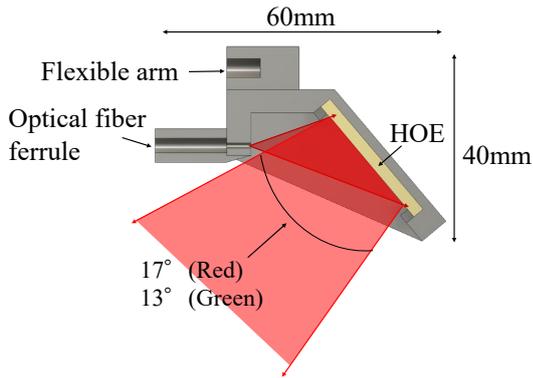


Fig. 9 The structure of the lighting unit.

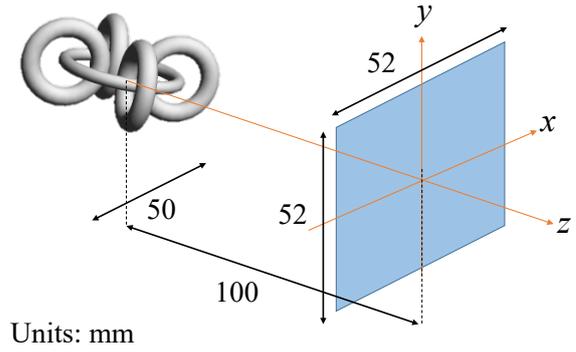


Fig. 11 The 3D scene of the sample CGHs.

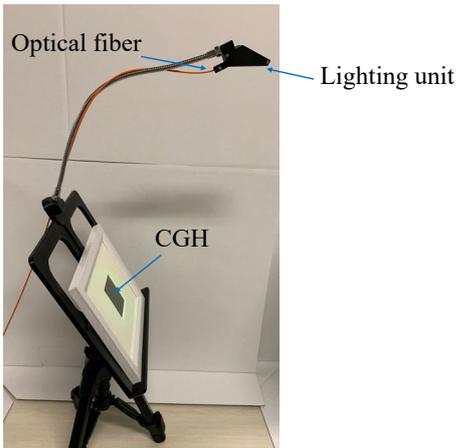


Fig. 10 Exhibition of a CGH using the lighting unit.

Table 2 Parameters of the sample CGHs.

Color	Red	Green
Number of pixels	65,536 × 131,072	
Pixel pitch [μm]	0.8 × 0.4	
Size [mm^2]	52 × 52	
Wavelength [nm]	640	532
Center of ref.wave(x,y,z)	(0,94,163)	(0,115,200)

HOE の効果がより高く感じられることが分かった.

4. まとめ

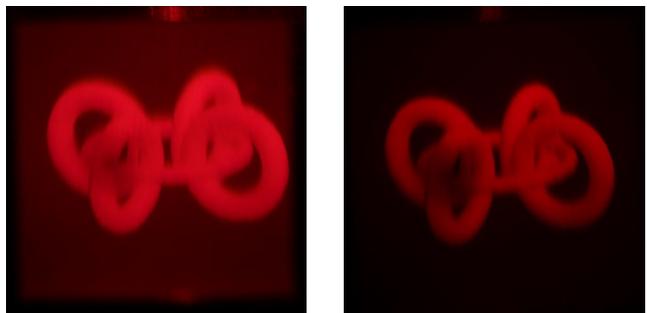
従来の高解像度 CGH の明るさを失わず、安価かつ小型で鮮明な再生像が得られる照明システムを製作する手法を提案し、その有用性を確認した。特に緑色では、LED のスペクトルが広いため従来は鮮明な再生像が得られなかったが、狭帯域化により LED 照明でも展示可能になった。

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。

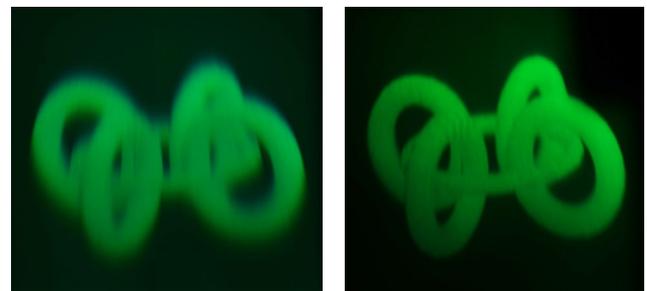
参考文献

- [1] K. Matsushima: *Introduction to computer holography*, Section 8.8.3 (Springer, 2019).
- [2] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: "Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters," *Opt. Express* **25**, 2016-2030 (2017).



(a) Without HOE (b) With HOE

Fig. 12 Optical reconstruction (Red).



(a) Without HOE (b) With HOE

Fig. 13 Optical reconstruction (Green).