

# 高解像度 CGH の二光束コンタクトコピーによる照明光入射角度の増大

清水 亮 西 寛仁 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: k598550@kansai-u.ac.jp (清水)

あらまし CGH(Computer-generated hologram)ではその干渉縞の物理解像度を光学ホログラムの解像度ほど高くできないため、一般に照明光入射角度を大きくすることができない。そのため、反射再生では CGH 前面にある照明光源が再生像の鑑賞の妨げとなり、また光学ホログラムのように壁面に展示することが困難である。そこで、二光束を用いて高解像度 CGH をコンタクトコピーし、再生照明光の入射角度を大幅に増大させたホログラムの作製手法を報告する。

キーワード 体積 CGH, 二光束コンタクトコピー, CGH

## Enhancement of Illumination Angle by Dual Beam Contact-Copy of High-Definition CGH

Ryo SHIMIZU Hirohito NISHI Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: k598550@kansai-u.ac.jp (R. Shimizu)

**Abstract** The illumination angle is commonly very small in computer-generated hologram (CGH), because the physical resolution of the printed fringe is not as high as that of optical holograms. As a result, the illumination light source arranged in front of the CGH obstructs the view of the reconstructed image. It is also difficult to display CGHs on a wall, unlike optical holograms. In this paper, we report a method for creating holograms where the illumination angle is significantly increase by dual beam contact-copy of high-definition CGHs.

**Keyword** Computer-generated volume hologram, Dual beam contact-copy, CGH

### 1. はじめに

計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下 CGH)はコンピュータ上で物体光と参照光を数値的に干渉することによって求めた干渉縞を印刷機器で描画して作製するホログラムであり、その描画方法が複数提案されている。

描画手段のひとつとして、ホログラム乾板等に干渉縞を描画するフリンジプリンタがある[1]。しかし、フリンジプリンタは一般に CGH の研究者が個別に自作している機器であり、安定して描画を行うことが困難な場合が多い。そこで、大面積で高解像度の干渉縞を比較的安定して描画でき、メーカー保守などにより属人性が低いレーザーリソグラフィが描画機器として用いられている[2]。

しかし、光学ホログラムとは異なり、レーザーリソグラフィのような描画機器で干渉縞を印刷して作製した CGH では、干渉縞の物理解像度を光学ホログラム

ほど高くできないため、再生照明光の入射角を大きくすることができない。そのため、共役像がホログラムの観察を妨げる位置に現れることや、非回折光が再生像と重なることが、実際の展示においては大きな問題となる。具体的には、我々が用いているレーザーリソグラフィで描画される干渉縞のピクセル間隔の限界は  $0.4\mu\text{m}$  程度であり、波長  $640\text{nm}$  では最大回折角が  $53$  度となるため、照明光入射角度をその  $2$  分の  $1$  とすると、CGH 中心部での入射角は  $26$  度程度以下となっている。また、様々な利点がある表面レリーフ位相変調型 CGH では、後述の様に、この入射角を実現することすらも困難である。

そこで本研究では、二光束コンタクトコピーを用い、表面レリーフ位相変調型 CGH を転写して計算機合成体積ホログラム (Computer-generated volume hologram: CGVH) を作製し、照明光入射角を増大する手法を提案する。また、この手法によって作製したホログラムの

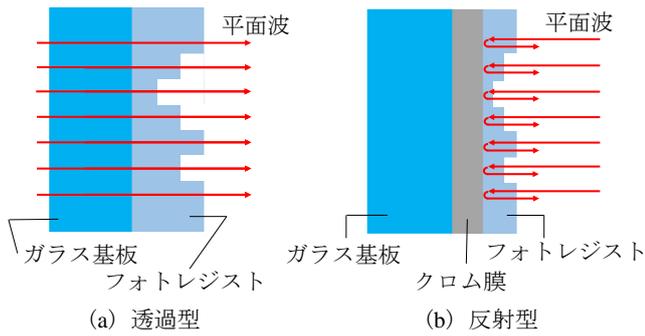


図1 表面レリーフ位相変調型 CGH

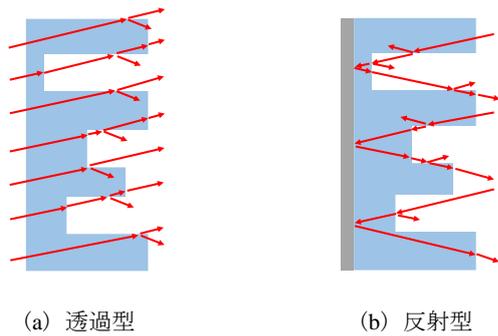


図2 表面レリーフにおける斜入射の問題

再生像を報告する。

## 2. 表面レリーフ位相変調型 CGH の問題点

レーザーリソグラフィでは、ガラス基板上にレジストで表面レリーフを形成し、図1に示すように、その厚み分布によって再生照明光の位相を変調することで像を再生する表面レリーフ位相変調型 CGH の作製が可能である。位相変調型 CGH は再生照明光を全く遮ることができないため、振幅変調型と比べて照明光の利用効率が高く、明るい再生像を得られる利点がある。また理論上、多値位相変調型では共役像や非回折光が発生しない利点もある。

しかし、表面レリーフの段差を正確に形成することが難しく、先行研究で作製された多値位相変調型には共役像や非回折光が発生し再生像と重なる問題があった[3]。これを解決するために、レーザー描画装置のパラメータを変えたフーリエホログラムを作製し、その再生像の真の像と共役像の強度比を測定し、共役像の割合が最も小さくなるパラメータを選ぶ校正手法が開発されている[4]。

残念ながら、この校正手法を用いても非回折光の問題を完全に解決することはできないため、表面レリーフ位相変調型においても振幅変調型と同様に照明光の入射角を大きくすることで非回折光の軽減する必要がある。しかし、照明光がレリーフに斜入射すると、レリーフのアスペクト比(深さ/幅)が高い場合、問題が生じる。例えば、標準的なレジストで $2\pi$ の位相変調に必

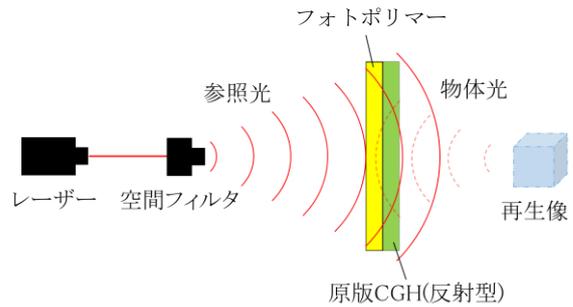


図3 コンタクトコピーの原理

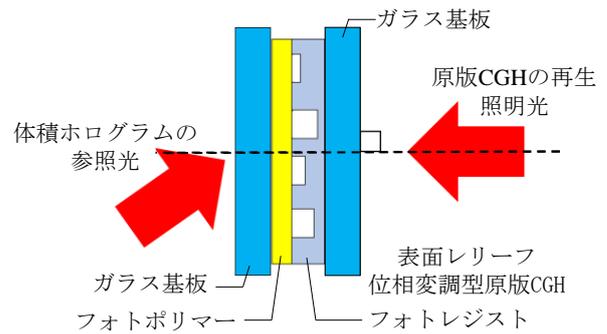


図4 二光束コンタクトコピーの原理

要なレリーフ段差が  $0.49\mu\text{m}$  である場合、ピクセル間隔が  $0.8\mu\text{m}$  であるとアスペクト比は  $0.61$  となる。非回折光と共役像の影響を軽減するために干渉縞オーバーサンプリング[5]を行った場合には、アスペクト比は  $1.2$  以上となる。

このような高アスペクト比の表面レリーフに再生照明光が斜入射すると、図2に示すように、光がレリーフの深い部分に到達できなかったり、あるいはレリーフの深い部分を通過した光がそのまま空間に放射されなかったりするため、正常な位相変調が行われない。

## 3. 二光束コンタクトコピーの原理

### 3.1. コンタクトコピー

レーザーリソグラフィによって描画された振幅型 CGH の干渉縞はクロム膜でできているため、反射率が高く反射再生が可能である。これによって作製した CGH を原版とし、図3に示すように、記録材料であるフォトポリマーと密着させた状態で転写光を入射し、記録材料を通して原版 CGH を照明する。これにより、原版 CGH の再生光と転写光の干渉縞が体積ホログラムとしてフォトポリマーに記録され CGVH が作製できる[6]。

### 3.2. 二光束コンタクトコピー

本研究で提案する二光束コンタクトコピーの原理を図4に示す。原版 CGH と記録材料を密着させる点は同じであるが、レーザー光を二分岐する点異なる。分岐した一方のレーザー光は、原版である表面レリーフ位相変調型 CGH の側からほぼ垂直に入射して像を

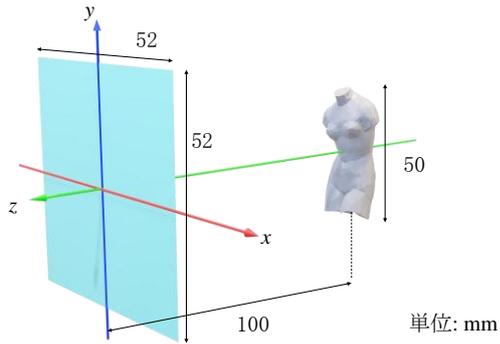


図5 原版CGHの3Dシーン

表1 原版CGHのパラメータ

ピクセル数	65,536×65,536
ピクセルピッチ[μm]	0.8×0.8
設計波長[nm]	640
ポリゴン数	1,396
参照光	平行光
参照光入射角度[deg]	20

再生する。もう一方の光は大きな入射角度でフォトポリマー側から入射させ、体積ホログラムを記録する。このようにして作製したCGVHは大きな入射角の再生照明光により像を再生することができる。

一方、通常のコンタクトコピーとは異なり、レーザー光を分岐させて干渉を行っているため振動に弱く、また狭帯域化された単一縦モードレーザーが転写光源として必要である。

## 4. CGVHの作製と再生像

### 4.1. 表面レリーフ位相変調型原版CGHの作製

原版CGHとして用いる表面レリーフ位相変調透過型CGHをレーザーリソグラフィで作製する場合、図1のようにガラス基板上にフォトレジストで表面レリーフを形成し、その厚さ分布によって再生照明光の位相を変調することで物体光を再生する。このとき、位相変調量は、

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [n(\lambda) - 1] h(x, y) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $h(x, y)$ はレジストの厚さであり、 $\lambda$ は光の波長、 $n(\lambda)$ はその波長におけるレジストの屈折率である。今回の実験では、波長640nmの転写光を用い、フォトレジストとしてAZP4210を用いた。また、転写波長におけるその屈折率を1.6455とした。

作製した原版CGHの3Dシーンを図5に、そのパラメータを表1に示す。原版CGHの位相分布 $\phi(x, y)$ の計算では、入射角20度の平面波参照光を用いている。これは位相変調型原版CGHであっても、製作時の誤差等により再生光にわずかに非回折光が生じ、それがCGVHに記録・再生されてホログラム鑑賞の妨げとな

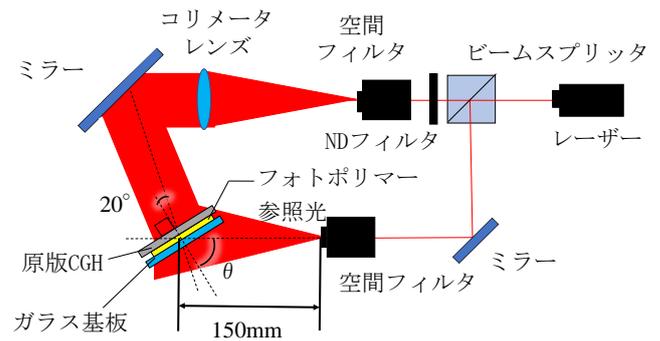


図6 二光束コンタクトコピーの光学系

表2 転写パラメータ

波長[nm]	640
定格レーザー出力[mW]	100
光強度[mJ/cm <sup>2</sup> ]	1.4
露光時間[s]	10
フォトポリマー	Bayfol®HX200

るためである。

### 4.2. 二光束コンタクトコピーによるCGVH作製

実験に用いた光学系を図6に、転写パラメータを表2に示す。図中の参照光入射角 $\theta$ が大きいほど、CGVHの照明光入射角度を大きくすることができる。しかし、参照光強度は入射角度を増加すると減少するため、回折効率が低下する恐れがある。そこで、参照光入射角度を40~70度で変化させて転写し、再生像の明るさがどのように変化するか確認を行った。

この光学系では、原版CGHの設計に合わせて入射角20度の平面波を原版CGHに入射している。前述のように、表面レリーフ位相変調型CGHでは照明光が斜入射すると問題が生じると考えられるが、今回の入射角度とアスペクト比においては大きな問題は見られなかった。

また、作製したCGVHは砲弾型LEDで照明して再生することを想定しているため、参照光を球面波としている。歪の無い再生像を得るには、再生照明光源の位置を転写時の球面波の中心と一致させる必要がある。今回の実験では記録材料の中心から参照光側空間フィルタのピンホールまでの距離を150mmとした。これは、用いた光学系で球面波が記録材料の全体を照射できる最小の距離である。そのため、再生照明光源もホログラムから150mmの位置に設置する。これは従来の高解像度CGHのおよそ半分の距離であり、展示照明等がコンパクトになることを期待できる。

### 4.3. CGVHの再生像

転写に用いたレーザー、ファイバ出力赤色LED、ファイバ出力白色LEDの3種類の光源で作製したCGVHを照明した時の光学再生像を図7に示す。照明光入射

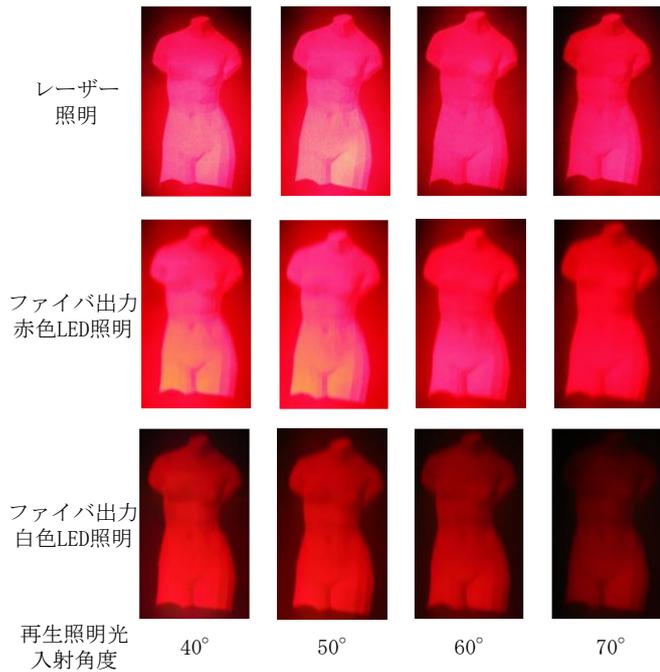


図7 CGVHの光学再生像

角度が大きくなるに従って、再生像の明るさは減少するが、照明光入射角 60 度までは明るい室内環境環境において白色 LED 光で鑑賞可能な再生像を確認できた。しかし、図 7 からわかるように、照明光入射角 70 度では、白色 LED 照明による再生像の明るさが極端に下がってしまっている。そのため、この角度では明るい室内照明環境下での展示は困難と判断した。

以上の結果、明るい室内環境下で十分に鑑賞可能かつ照明光入射角度が最大である 60 度照明の CGVH を展示用 CGVH として選出した。この CGVH を 150mm の距離に設置した砲弾型赤色 LED を用いて入射角 60 度で照明した時の光学再生像を図 8 に示す。これより、従来比べてはるかにコンパクトな照明系でも明るい再生像が得られることがわかる。実際、壁面での展示も

可能であることを確認している。

## 5. まとめ

表面レリーフ位相変調型 CGH を二光束コンタクトコピーにより転写し、照明光入射角度が最大 60 度でも光学再生可能 CGVH を作製した。これは、鑑賞時や展示時に光源が妨げにならず、壁面での展示も可能なホログラムとなっている。今回作製した CGVH は 5cm 角と小型で単色のみでの再生像となっているため、今後はタイリング転写による大型化や積層化によるフルカラー化を目指す予定である。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 および国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究 (JPJ012368C06801) の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] H. Yoshikawa and T. Yamaguchi, "Review of Holographic Printers for Computer-Generated Holograms," *IEEE T. Ind. Inform.* 12, 4, pp.1584-1589 (2016).
- [2] 松島恭治, 齋藤智崇, 五十嵐勇祐, 國枝織絵, 橋村直柔, 小西涼太: "関大デジタルホロスタジオにおける大規模 CGH 描画・作成技術", *Hodic Circular*, 38, 1, pp.2-9(2018).
- [3] 小西涼太, 松島恭治: "多値位相型計算機合成ホログラムによるフローティング型立体画像", 第 24 回関西大学先端科学技術シンポジウム, パネル No.22(2020).
- [4] K. Matsushima, "Introduction to Computer Holography," Sect. 15.3, Springer, (2020).
- [5] K. Matsushima, "Introduction to Computer Holography," Sect. 8.8, Springer, (2020).
- [6] O. Kunieda and K. Matsushima: "High-quality full-parallax full-color three-dimensional image reconstructed by stacking large-scale computer-generated volume holograms," *Appl. Opt.* 58, 34, pp. G104-G111(2019).



(c) 右視点

(b) 中央視点

(a) 左視点

図 8 赤色砲弾型 LED を用いて入射角度 60 度で照明した CGVH の光学再生像