

フルカラー積層体積型 CGH における基板収差の補正

國枝 織絵[†] 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: [†] kunieda@laser.ee.kansai-u.ac.jp, [‡] matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし 計算機合成ホログラム(CGH)をフルカラー再生する手法として、積層体積型 CGH がある。この手法では、再生時に記録材料や原版 CGH のガラス基板の厚みによる収差が生じ、再生像に色ずれが発生してしまうことが大きな問題となっている。そこで本研究では、原版 CGH の計算においてガラス基板の厚みと屈折率を補正する手法の開発を行った。また、この手法を用いて、実際にフルカラー積層体積型 CGH の作製を行った。

キーワード 計算機合成ホログラム(CGH), フルカラーCGH, 体積ホログラム

Compensation for substrate aberration in creating stacked-volume CGHs

Ori KUNIEDA[†] Kyoji MATSUSHIMA[‡]

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

E-mail: [†] kunieda@laser.ee.kansai-u.ac.jp, [‡] matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract The technique of stacked-volume CGHs allow us to create full-color computer-generated holograms (CGH). But this technique has a severe problem of color smear. The CGHs created by this method simultaneously reconstruct three images in RGB colors. However, these images have a little position shift due to aberration caused by the thick glass substrates. To get over the problem, we present techniques to compensate thickness and refractive index of the glass substrate. Several full-color CGHs fabricated by the proposed technique are demonstrated to verify validity of the technique.

Keyword Computer-generated hologram(CGH), Full-color CGH, Volume hologram

1. はじめに

近年、コンピュータホログラフィ技術の進歩により、数10～数100億ピクセルの高解像度計算機合成ホログラム(以下CGH)が作製されるようになった[1]。このような高解像度CGHを作製する手法の一つは、計算機上で数値的に合成した干渉縞パターンをレーザーリソグラフィによりクロム等の金属膜の二値振幅画像として描画することである。

しかし、このように干渉縞パターンを二次元画像として描画する方法では、作製されるホログラムは薄いホログラムとなってしまう、波長選択性を持たない。そのため白色光源で再生すると色にじみを生じるだけでなく、フルカラー像を再生することも困難である。

CGHをフルカラー再生するために、ダイクロイックミラーを用いる手法や[2], RGBカラーフィルタ方式が提案されてきた[3]。ダイクロイックミラーを用いる手法では非常に鮮明なフルカラー再生像が得られるが、大型で複雑な再生光学系を必要とするため展示には不向きである。RGBカラーフィルタ方式では再生光学系が単純で持ち運びが容易であるが、作製時に干渉縞パ

ターンを短冊状に分割するため、鮮明な再生像が得られない。また、RGBカラーフィルタが広帯域であるため、特に奥行の深い像ではボケが生じる問題がある。

このようなCGHのフルカラー再生の問題を解決するため、積層体積型CGHを作製する手法が提案されている[4]。この手法では、三枚の原版CGHをコンタクトコピーして三枚のRGB体積ホログラムを作製し、それらを正確に重ね合わせることで一枚のホログラムとする。これによって作製されたホログラムは、持ち運びが容易でかつ鮮明な像を再生することができる。また波長選択性を有するため、白色光源による再生が可能である。しかしこの手法では、原版CGHや転写CGHのガラス基板の厚みにより収差が生じ、再生像に色ずれが発生してしまうことが問題となっている。

そこで本研究では、原版CGHの干渉縞パターンを計算する際にガラス基板の厚みと屈折率を補正する手法の開発を行った[5]。また、補正を行った原版CGHを用いて実際にフルカラー積層体積型CGHを作製し、補正を行わずに作製したフルカラー積層体積型転写CGHと再生像の比較を行った。

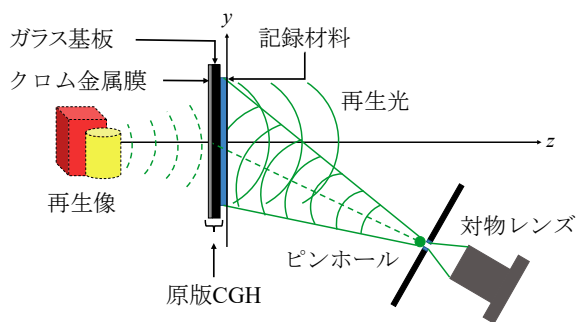


Fig.1 原版 CGH の転写方法

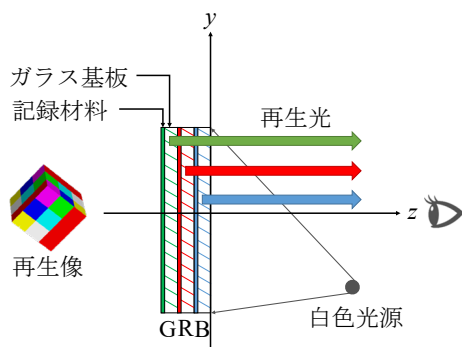


Fig.2 積層体積型 CGH の原理

2. 積層体積型 CGH の作製法

2.1. CGH の転写

レーザーリソグラフィで描画した金属膜干渉縞は高い反射率を有する．そのため作製された CGH は反射再生が可能であり，これを利用して，記録材料を透過して CGH を再生するデニシユーク型のコンタクトコピーが行える．Fig.1 にその原理を示す．記録材料を原版 CGH に密着させ，コヒーレント光源と空間フィルタによって球面波を発生し，記録材料面側に照射する．この光は記録材料を通過して背面の原版 CGH に照明し，原版 CGH を反射再生する．この再生光が物体光として記録材料の背面から入射し，前面から入射する参照光と記録材料内で干渉する．このように物体光と参照光が記録材料を挟み込むように入射することにより，原版 CGH の再生光を体積ホログラムとして記録材料に記録することができる．

コンタクトコピーによって転写した CGH は波長選択性を有する体積ホログラムとなる．そのため，白色光源による再生が可能となる．

2.2. 転写 CGH の重ね合わせ

積層体積型 CGH では，RGB 三色に相当する原版 CGH をそれぞれ転写し，これらの転写 CGH を重ね合わせることでフルカラー再生を行う．以下ではその原理について述べる．Fig.2 に示すように，三枚の転写 CGH を B, R, G の順に重ね合わせる．これに白色

光を入射すると，それぞれの転写 CGH が RGB 各色の単色像が再生し，それらが重なり合うことでフルカラー像が得られる．転写 CGH の重ね合わせの際，位置調整が不十分だと単色像が完全に重ならず最終的な再生像に色ずれが生じてしまうため，位置合わせは精密に行う必要がある．

3. 基板収差の補正

転写 CGH の干渉縞はガラス基板の背面側の記録材料面に記録されており，原版 CGH の干渉縞パターンもガラス基板背面のクロム金属膜に記録されている．転写時にも再生時にもガラス基板内で収差が生じるため，単純に RGB 三色の原版 CGH を転写し，重ね合わせるだけでは再生像が完全に重ならない．そこで本研究では，ガラス基板の厚みや屈折率を補正する手法を開発した．以下にその手順を示す．

まず，Fig.3 に示すように仮想物体から積層体積型 CGH 前面までの物体光波 $O(x,y,\lambda_p)$ を計算する．この物体光波は色ずれのない理想的な光波である．ここで， $\lambda_p(p=R,G,B)$ は RGB 各色に相当する波長を表す．

次に，Fig.4 に示すように転写 CGH が BRG の順に重なっている状態を仮定し， $O(x,y,\lambda_p)$ を記録材料面まで後方伝搬させる．この伝搬距離は BRG の順に長くなり，例えば G の場合は Fig.4 に示すように $3d$ となる．またこの時，再生時にはガラス基板内を通過することから，後方伝搬計算における波長をガラスの屈折率に応じた値に変化させる．このように後方伝搬させた光波を $O'(x,y,\lambda_p)$ とする．

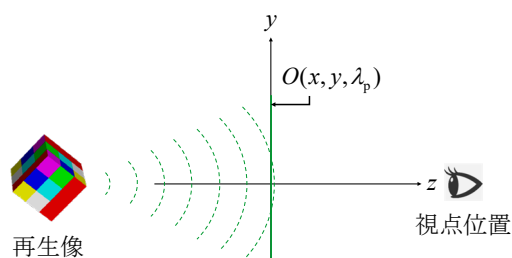


Fig.3 理想光波の計算

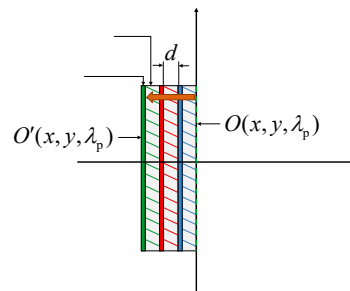


Fig.4 再生時における収差の補正

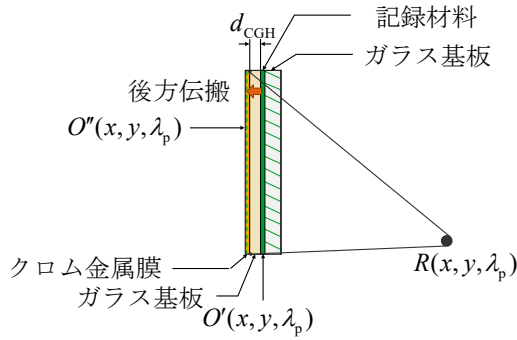


Fig.5 転写時における収差の補正

原版 CGH を転写するとき、干涉縞を形成しているクロム金属膜で反射された光もガラス基板を通過して記録材料に到達し記録される。ここでも収差が生じていると考えられるため、この基板収差も補正する必要がある。Fig.5 に示すように、転写時は原版 CGH の前面に記録材料が密着し背面にクロム膜干涉縞がある。そこで、 $O'(x,y,\lambda_p)$ を原版 CGH のガラス基板の厚み分だけさらに後方伝搬させる。ここでも同様に、後方伝搬計算の波長を原版 CGH のガラスの屈折率に応じた値に変化させる。光波の伝搬距離は RGB どの場合でも d_{CGH} で一定である。ここでさらに後方伝搬させた光波を $O''(x,y,\lambda_p)$ とする。

干涉縞パターン $I(x,y,\lambda_p)$ は、物体光 $O''(x,y,\lambda_p)$ と参照光 $R(x,y,\lambda_p)$ から数値的に求められる。レーザーリソグラフィで描画するパターンはバイナリデータでなければならないため、求めた $I(x,y,\lambda_p)$ を二値化して最終的な干涉縞パターンとする。

4. フルカラー積層体積型 CGH の作製

4.1. 基板収差を補正した原版 CGH の作製

本研究で転写元として用いた原版 CGH の 3D シーンを Fig.6 に、そのパラメータを Table 1 に示す。物体光波はポリゴン法を用いて計算し[6]、スイッチバック法を用いたポリゴン単位の隠面消去処理を行った[7]。

本研究で用いた記録材料と原版 CGH のパラメータを Table 2 に示す。記録材料には COVESTRO 社製のフォトポリマー Bayfol HX200 を用いた。

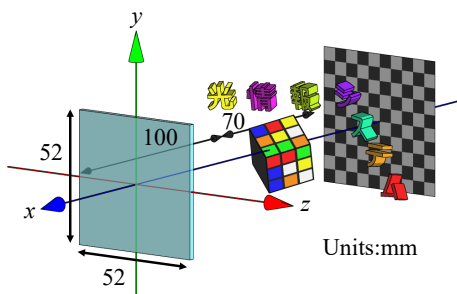


Fig.6 原版 CGH の 3D シーン

Table 1 原版 CGH のパラメータ

ピクセル数	65,536×65,536
ピクセル間隔[μm]	0.8 × 0.8
サイズ[cm ²]	5.2 × 5.2
両側視域角(@532 nm) [°]	38.8 × 38.8
設計波長 (R, G, B)[nm]	(640, 532, 488)

Table 2 記録材料と原版 CGH のパラメータ

	記録材料	原版 CGH
厚さ[mm]	1.0	1.5
屈折率	1.51	1.51

4.2. 原版 CGH の転写

本研究では、三枚の原版 CGH の転写において Fig.7 に示すような三波長同軸転写光学系を用いた。この光学系ではミラーやダイクロイックミラーを用いて三つのレーザー光を同軸に重ね、そのレーザー光を空間フィルタに入射して球面波を発生している。空間フィルタのピンホール位置は、原版 CGH の干涉縞を作製する時に設定した点光源位置に厳密に合わせる必要がある。また実際の光学系では、青色レーザーのみ他のレーザーと比べてビーム径が細いため、ビームエキスパンダーを用いてビーム径を拡大している。さらに、記録材料は波長によって感度が変わるため、露光時間やレーザーの光強度は波長ごとに調節する必要がある。

5. 転写結果

5.1. 転写 CGH の単色再生像

三枚の原版 CGH をそれぞれ転写した結果を Fig.8 に、また実験パラメータを Table 3 に示す。Fig.8 に示す再生像は全て白色 LED を用いて再生したものであり、記録時に用いたレーザーの波長と等しい単色の再生像が得られていることから、転写 CGH が波長選択性を有していることが確認できる。

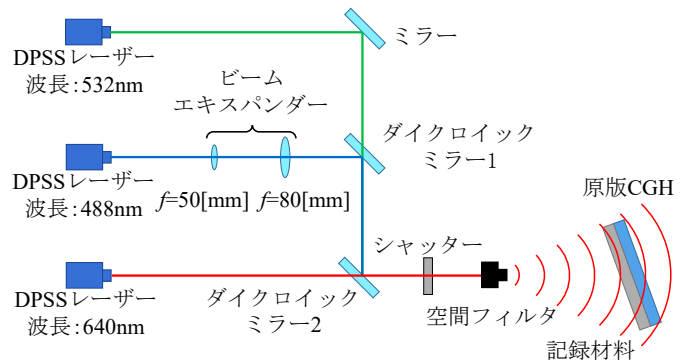
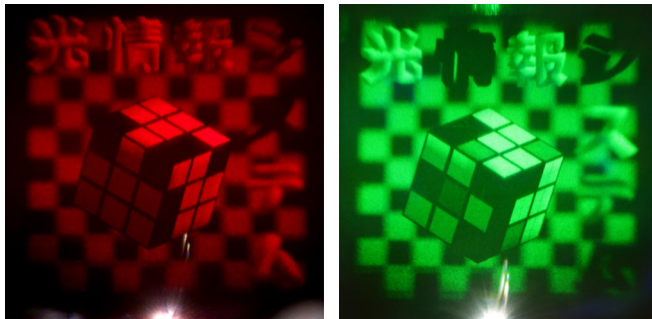


Fig.7 三波長同軸転写光学系

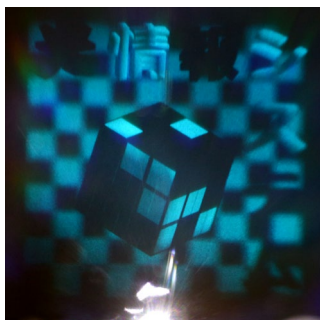
Table 3 記録材料と原版 CGH のパラメータ

波長 [nm]	露光強度 [mW/cm ²]	露光時間 [s]	露光量 [mJ/cm ²]
640	2.0	30	60
532	1.0	30	30
488	1.5	30	45



(a)640 nm

(b)532 nm



(c)488 nm

Fig.8 転写 CGH の再生像

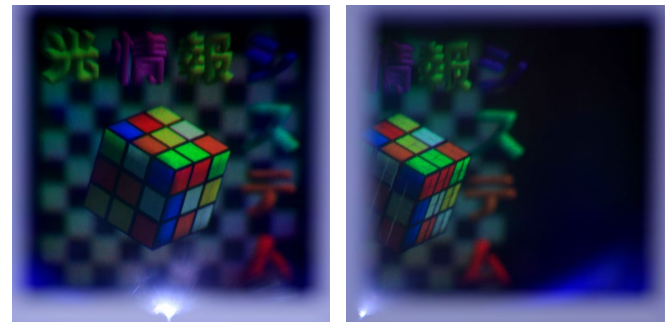
5.2. フルカラー積層体積型 CGH の再生像

三枚の転写 CGH を重ね合わせて一枚のフルカラー積層体積型 CGH とした. Fig.9 にその再生像を示す.

また, 基板収差補正を行わなかった場合のフルカラー積層体積型 CGH の再生像を比較のために Fig.10 に示す. Fig.9 と Fig.10 を比べると, 補正をかけなかった場合に見られる色ずれが, 補正をかけることにより大きく減少していることが確認できる.

6. まとめ

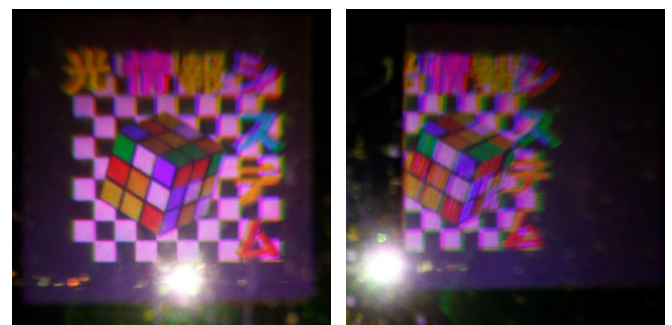
積層体積型 CGH の作製による高解像度 CGH のフルカラー再生手法と, 再生像に生じる色にじみを軽減するために基板収差の補正方法を提案した. また, 実際に補正を行った原版 CGH を用いてフルカラー積層体積型 CGH の作製を行った. その結果, 基板収差の補正を行うことで再生像の色ずれが大きく減少していることが確認できた.



(a)中央視点

(b)左視点

Fig.9 積層体積型 CGH の再生像
(基板収差補正あり)



(a)中央視点

(b)左視点

Fig.10 積層体積型 CGH の再生像
(基板収差補正なし)

文献

- [1] K.Matsushima, S.Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," *Appl. Opt.* **48**, H54-H63(2009).
- [2] T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara: "Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography," *SPIE Proc.* **9386**, 9386N(2015).
- [3] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: "Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters," *Opt. Express* **25**, 2016-2030(2017).
- [4] 中尾弘希,松島恭治: "反射型高解像度CGHのコンタクトコピーによるフルカラー体積型転写CGHの作成", *HODIC Circular* **36**, No. 3, 19-22(2016).
- [5] O. Kunieda, H. Nakao, K. Matsushima: "Full-color CGHs created by stacking monochromatically-transferred volume CGHs," *International Symposium on Display Holography 2018 (ISDH2018)*, Aveiro (Portugal), (2018).
- [6] K.Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," *Appl. Opt.* **44**, 4607-4614(2005).
- [7] K.Matsushima, M.Nakamura, S.Nakahara: "Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique," *Opt. Express* **22**, 24450-24465 (2014).