

ビームスキャンによる転写を用いたフルカラー積層体積型 CGH の大型化

Increase in size of full-color stacked-volume CGH using beam-scan techniques

國枝織絵

松島恭治

Orie Kunieda

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

A novel technique is presented for full-color reconstruction of large-scale computer-generated holograms (CGHs). In this method, three printed CGHs are transferred to three volume CGHs with the wavelength corresponding to RGB colors, and then stacked to superimpose the RGB images. This CGH is not only portable but also the image is sharp and vivid as compared with that by RGB color-filters. A little position shift, caused in the reconstructed color images because of aberration by the thick glass substrate, can be compensated in calculation of the original CGHs. However, it is difficult to create large CGHs in this technique, because a larger CGH requires a stronger laser source. In this paper, we attempt to create large stacked full-color volume CGHs by using the technique of scanning-copy. The fabricated full-color CGHs are demonstrated to verify the techniques.

Keywords: フルカラーホログラム, 計算機合成ホログラム, 転写 CGH

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]. しかし, レーザリソグラフィ装置等で二次元画像として干渉縞パターンを描画して作製されたホログラムは薄いホログラムとなり, 波長選択性を持たない. そのため, 白色光源で再生できず, 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し, さらに広帯域 RGB カラーフィルタを用いるため, 鮮明な再生像が得られない.

このような CGH のフルカラー再生の問題を解決するため, 積層体積方式による高解像度フルカラー CGH を提案している[4,5]. この手法では, R, G, B 各色に相当する波長で設計し事前に収差補正した原版 CGH をコンタクトコピーすることによって体積ホログラムとし, これらを重ね合わせることで一枚のフルカラー積層体積型 CGH とする. この手法で作製されるフルカラーホログラムは明るく鮮明な像を再生することができるが, そのまま大型化すると転写光強度が不足して正しく転写されない問題がある. 一方, 波面プリンタを用いたモノクロ CGH ではビームスキャンによるコピーが提案されている[6].

そこで本研究では, RGB に相当する波長の転写光

國枝織絵

<kunieda@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)

を3回ビームスキャンすることで3枚の原版CGHをコンタクトコピーし、フルカラー積層体積型CGHの大型化を試みた。

2. フルカラー積層体積型CGH

2.1. コンタクトコピーによる原版CGHの転写

本研究で用いたコンタクトコピーによる転写の原理をFig.1に示す。この手法では、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、記録材料面側から原版CGHを反射再生することで、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。体積ホログラムは転写時の波長のみを選択して再生する性質を有するため、白色光源による再生が可能となる。

2.2. 転写CGHの積層

積層体積型CGHの再生原理をFig.2に示す。RGB三色に相当する転写CGHを、Fig.2のようにB, R, Gの順に重ね合わせる。各転写CGHは上述のように転写波長のみを反射再生し残りを透過するため、これに白色光を入射すると、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。

2.3. 収差補正

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、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。これ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 $O(x, y; \lambda_p)$ を記録材料面まで後方伝搬させる。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。これによって求めた物体光波から、収差を補正した干渉縞を数値的に発生しプリントする。

3. ビームスキャンによる転写方法

3.1. 原理

本研究で用いたビームスキャンによる転写方法を

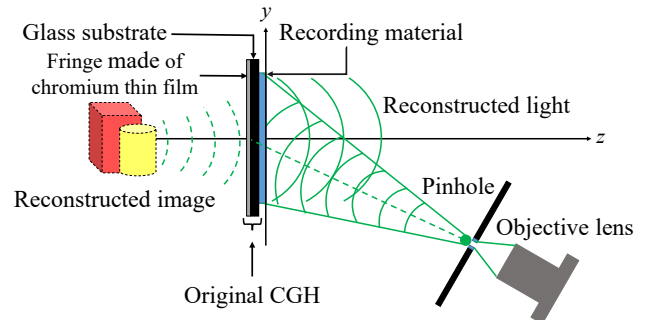


Fig. 1 Contact-copy of the original CGH.

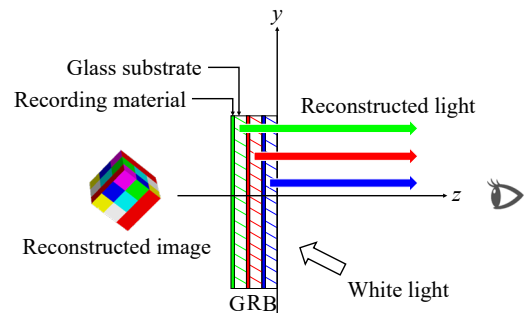


Fig. 2 Reconstruction of a full-color image from the stack of transferred volume CGHs.

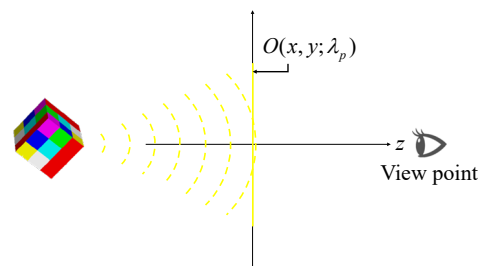


Fig. 3 Calculation of the ideal object field.

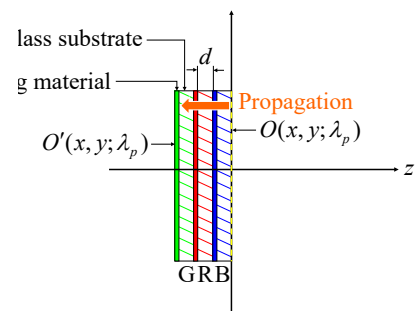


Fig. 4 Numerical backward-propagation of the ideal object field through the glass substrate.

Fig.5に示す。この手法では、従来の転写方式のように原版CGHのサイズに合わせてビームを広げるのではなく、コリメータレンズを用いてある程度の大きさに広げた平面波を生成し、2軸ステージを用いてホログラム全体をスキャンすることで原版CGHのコンタクトコピーを行う[6]。この手法では、スキャンの範囲を拡大するだけで転写面積を大型化でき、ビームを大きく広げる必要がないため、レーザー光源の性能によらず大型の転写CGHを作製する

ことができる。

3.2. 転写光強度

ビームスキャンを用いた転写では、ビーム径やスキャン間隔、スキャン速度、ビーム強度などのパラメータが転写結果に大きく影響するため、これらのパラメータを最適化する必要がある。転写光ビームが中心 (x_0, y_0) のガウシアンビームであるとする、その強度分布は

$$I(x, y; x_0, y_0) = I_0 \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}\right] \quad (1)$$

と表される。ここで、 I_0 と r はそれぞれビームのピーク強度とビーム半径である。本研究では、Fig.5に示したように y 軸方向に主スキャンを行うため、式(1)中の y_0 をスキャン速度 v を用いて $y_0 = vt$ と表す。いま、十分に長い時間と y 軸方向範囲に渡ってスキャンすると仮定すると、一本のスキャンラインの露光量は、 y 座標に依存せず、

$$g(x; x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y; x_0, vt) dt = \frac{I_0 r \sqrt{\pi}}{v} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{r^2}\right] \quad (2)$$

となる。ここで、ビームパワー P_0 とピーク強度の関係は

$$P_0 = \iint I(x, y; 0, 0) dx dy = \frac{I_0 \pi}{r^2} \quad (3)$$

となることから、式(2)は

$$g(x; x_0) = \frac{P_0}{vr\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{r^2}\right] \quad (4)$$

と変形できる。いま、 x 方向のスキャン間隔を Δx としスキャンライン数を N とすると、総露光量は、

$$G(x) = \sum_{n=0}^{N-1} g(x; n\Delta x) = \frac{P_0}{vr\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[-\frac{(x-n\Delta x)^2}{r^2}\right] \quad (5)$$

と表せる。このように、 y 軸方向にビームスキャンを行う場合の露光量は x 軸方向に変動する。そのため、転写干渉縞にも x 軸方向の周期的変動が生じると考えられる。

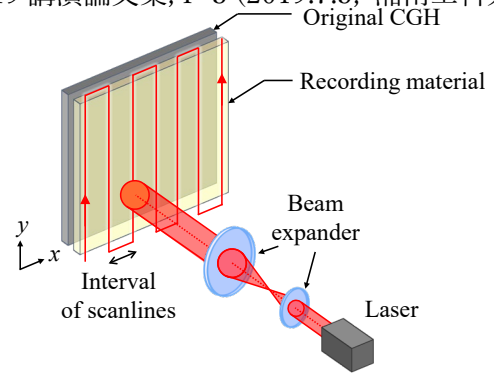


Fig. 5 Schematics of scanning contact-copy.

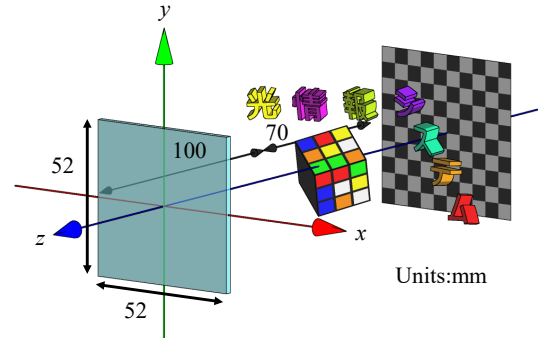


Fig. 6 The 3D scene of the CGH.

Table 1 Parameters used for creating the CGH.

Number of sample points of object field	65,536 × 65,536
Sampling interval of object field [μm]	0.8 × 0.8
Sizes of CGH [cm ²]	5.2 × 5.2
Viewing angles [°]	19.4 × 19.4
Design wavelength (R, G, B) [nm]	(640, 532, 488)

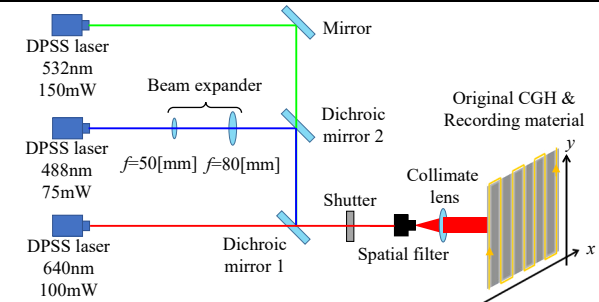


Fig. 8 Optical system used for scanning contact-copy to transfer the original CGHs.

4. フルカラー積層体積型 CGH の作製

本研究で用いた原版 CGH の 3D シーンを Fig.6 に、そのパラメータを Table 1 に示す。本研究では、記録材料に COVESTRO 社のフォトポリマー Bayfol®HX を用いた。

本研究では、Fig.7 に示す三波長同軸転写光学系を用いて転写を行った。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。この球面波をコリメータレ

ンズで平行光に変換し、2軸ステージに固定した原版 CGH 及び記録材料に照射している。なお、青色レーザーの光路上にある二つのレンズはビームエキスパンダーである。

5. 転写結果

従来の転写方式で作製した場合と、ビームスキャンを用いた転写方式で作製した場合のフルカラー積層体積型 CGH の再生像をそれぞれ Fig.8 と Fig.9 に、転写時のパラメータを Table 3 に示す。どちらのホログラムも白色 LED を用いて再生している。この結果より、ビームスキャンを用いた転写によりフルカラー積層体積型 CGH が作製できたが、ホログラム全体に主スキャン方向に沿った暗い筋が生じ、その結果、従来のものと比較して再生像が暗く、品質も低下していることが確認できた。

Fig.10 に、Table 3 と式(5)から推定した総露光量の水平方向の変動を示す。このように、露光量は変動するものの、その変動幅はどの波長においてもピーク露光量の 10%程度である。また、スキャン間隔を狭めて露光量の変動を減らしても暗い筋が表れることから、露光の不均一性のみが原因とは考えにくい。記録材料の同じ場所が複数回露光されることの影響も考えられ、その原因究明は今後の課題である。

6. まとめ

ビームスキャンによる転写を用いた積層体積型 CGH の作製を試みた。その結果、本方式でフルカラー積層体積型 CGH が作製でき、これにより大型 CGH の作製が可能であることが確認できた。しかし、ビームスキャンを行うことでホログラム全体に暗い筋が表れ、従来の積層体積型 CGH と比較して再生像の品質が低下してしまった。今後、積層体積型 CGH を大型化するにあたり、転写時のパラメータの再検討などによりホログラム全体の干渉縞の均一性を改善する必要があると考えられる。

7. 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, S. Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated



(a)Left (b)Center (c)Right

Fig. 8 Optical reconstruction of the stacked-volume



(a)Left (b)Center (c)Right

Fig. 9 Optical reconstruction of the stacked-volume CGH fabricated by using scanning contact-copy.

Table 3 Parameters used for scanning contact-copy.

	R	G	B
Radius of beam spot [mm]		7.0	
Interval between scanlines[mm]		9.0	
Scan speed [mm/s]	10.0	10.0	8.0
Peak intensity [mW/cm ²]	70	44	49
Estimated average of total exposure [mJ/cm ²]	60.0	37.7	52.5

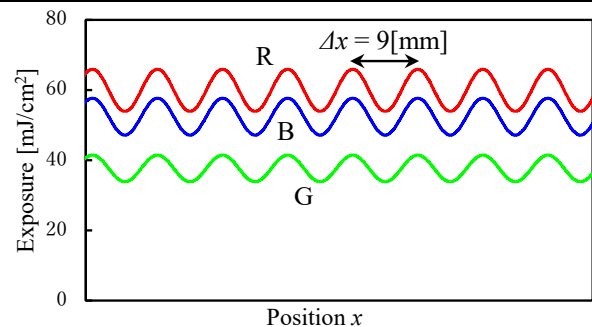


Fig. 10 Estimated deviation of total exposure.

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," Proc. SPIE **9386**, 93860N (2015).
- [3] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: "Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters," Opt. Express **25**, 2016-2030 (2017).
- [4] O. Kunieda, H. Nakao, K. Matsushima: "Full-color CGHs created by stacking monochromatically-transferred volume CGHs," ISDH2018, (2018).
- [5] O. Kunieda, K. Matsushima: "Stacked-volume CGH: A novel technique to create full-color CGHs," HODIC in Taiwan5, (2018).

- [6] M. Okui, K. Wakunami, R. Oi, Y. Ishihashi, B. J. Jackin, K. Yamamoto: "Copying of holograms by spot scanning approach," *Appl. Opt.* **57**, 4117-4122(2018).