

# 全方向視差高解像度 CGH の滑らかな アーチ形状化による水平方向視域の増大

Increase of horizontal viewing angle of full-parallax high-definition

CGH using curvature of surface

玉置翼

松島恭治

Tsubasa Tamaki

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, Electronic and Information Engineering, Kansai University

## ABSTRACT

A smooth arched full-parallax computer-generated hologram (CGH) is created to obtain a wider horizontal viewing angle than that of ordinary plate-type high-definition CGHs. The fringe pattern, based on a polygonal prism with 16 planes, is transferred to photopolymer and curved smoothly. The calculation and fabrication techniques are presented, and the optical and simulated reconstructions are demonstrated for verification of the proposed technique.

**Keywords:** 計算機合成ホログラム, 転写 CGH, アーチ型 CGH

## 1. はじめに

計算機技術とコンピュータホログラフィの進歩により、数 10~1000 億画素の規模を有する全方向視差高解像度計算機合成ホログラム(以下、CGH)の干渉縞を計算できるようになった [1]。このような全方向視差 CGH では、水平方向視差のみの CGH や他の 3D 技術とは異なり、知覚矛盾が全く生じないため驚くほど奥行き深い像を再生できる。その干渉縞を描画する有力な方法の一つはレーザーリソグラフィ微細加工技術であり、それによって高品質のプレート型高解像度 CGH が製作されている。このようなプレート型 CGH の水平垂直方向視域は干渉縞の画素ピッチで決定される。例えば、画素ピッチ  $0.8\mu\text{m}$  では緑色波長で両側視域が約  $40^\circ$  となる。これ以上画素ピッチを減少して視域を拡大することは簡単ではないため、本研究では干渉縞面をアーチ形状化することによる水平方向視域の増大を試みた。このような曲面を用い

た CGH としては、フリンジプリンタでフィルムに干渉縞を描画した円筒形 CGH が報告されている [2]。一方、我々はレーザーリソグラフィで作製した高精度のプレート型振幅マスクから非干渉マスク転写法により可塑性のあるフォトポリマーで位相型 CGH を形成する手法を用い、4 枚の平面で構成した全方向視差多面アーチ型 CGH を報告している [3]。本論文ではこの手法を進化させ、16 平面で干渉縞を計算し、滑らかなアーチ形状 CGH を作製することにより、水平方向の視域をプレート型の約 2.9 倍に増大し、自然な再生像が得られるアーチ型全方向視差 CGH を報告する。

## 2. 振幅マスクの作製

### 2.1. マスクパターンの計算

本研究では、全方向視差高解像度 CGH の物体光波計算にポリゴン法を用いている [4]。この計算法には、ポリゴンモデルの物体から全方向視差で大規模な物体光波を高速に計算できる利点があるが、物体光波は平面上の複素振幅分布となる。そこで、本研究では、Fig.1(a)のように複数の傾いた要素平面  $(x_n, y_n, z_n)$  上の物体光波  $g_n(x_n, y_n)$  を計算する。ここで、 $(x_n, y_n, z_n)$  は要素平面毎に定義する傾いたロー

---

玉置翼

<tamaki@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)

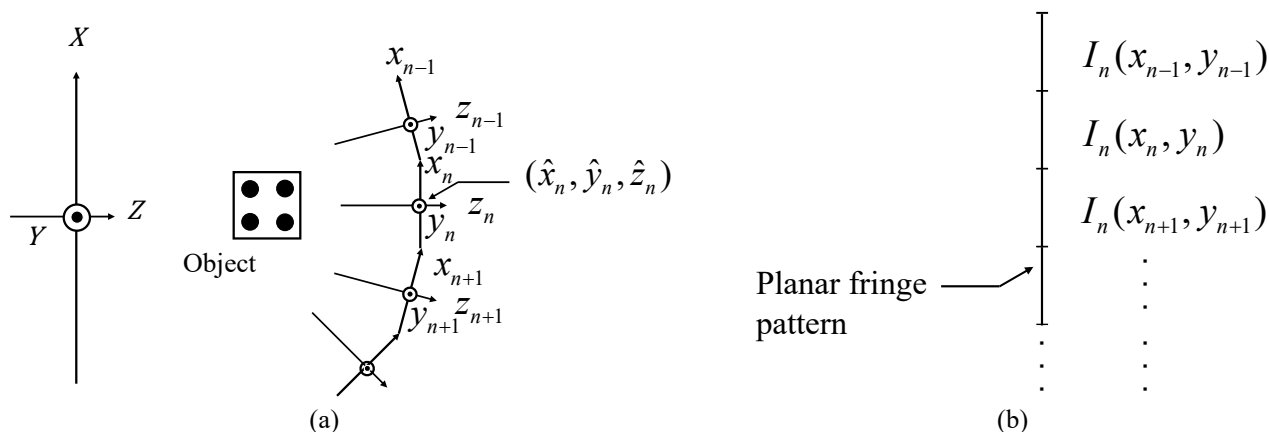


Fig. 1 Calculation of (a) the object field based on coordinates rotation in elementary planes, and (b) the fringe pattern based on expansion of cylindrical facets.

カル座標系である。次に、同様に、要素平面上での参照光波  $r_n(x_n, y_n)$  を求め、干渉縞強度分布

$$I_n(x_n, y_n) = |g_n(x_n, y_n) + r_n(x_n, y_n)|^2$$

を求める。なお、実際には、レーザーリソグラフィで描画する干渉縞はバイナリ干渉縞であるため、

$\text{Re}\{g_n(x_n, y_n)r_n^*(x_n, y_n)\}$  をゼロ閾値で2値化すること

とで要素干渉縞  $I_n(x_n, y_n)$  を求めている。この要素干渉縞を Fig.1(b)に示すように、一つの平面上に展開することにより、レーザーリソグラフィで描画する振幅マスクのパターンを求めている。

ここで、要素平面上における物体光波  $g_n(x_n, y_n)$  は、グローバル座標  $(X, Y, Z)$  で与えた物体モデルの頂点座標を座標変換

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & 0 & -\sin \theta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_n & 0 & \cos \theta_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - \hat{x}_n \\ Y - \hat{y}_n \\ Z - \hat{z}_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

を用いて要素平面毎に変換し、ローカル座標系毎に異なった向きの物体モデルとして求めている[4]。ここで、 $(\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n)$  は要素平面  $n$  のローカル座標系の原点をグローバル座標で表した座標であり、 $\theta_n$  はグローバル座標の  $(X, Y, 0)$  平面と要素平面  $(x_n, y_n, 0)$  のなす角である。同様に、グローバル座標で与えた参照光波  $r(X, Y, Z)$  をローカル座標に変換して  $r_n(x_n, y_n)$  を求めている。

このようにして作製した平面的な振幅マスクから、3節で述べるように、可塑性のあるフォトリソグラフィに干渉縞パターンを転写して曲げることでアーチ型ホログラムの作製が可能となる。

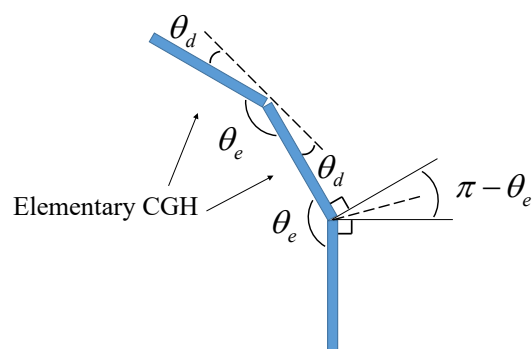


Fig. 2 Definition of the angle of neighboring elementary CGHs.

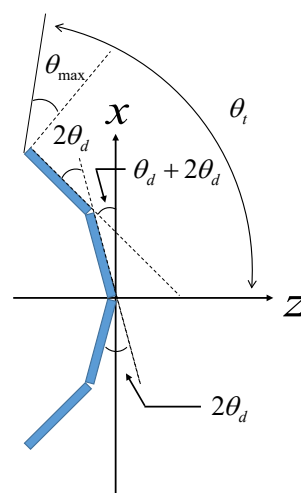


Fig. 3 Estimation of the viewing angle in arched CGHs

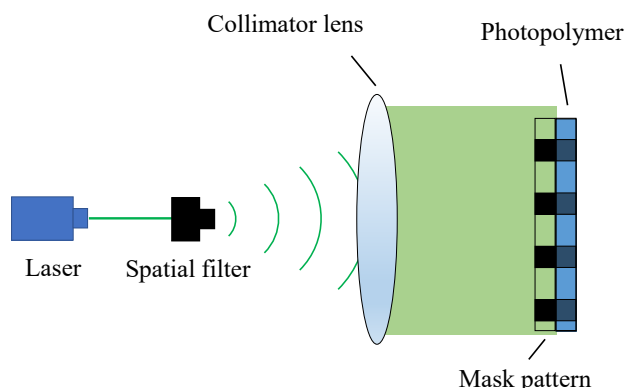


Fig. 4 Transfer of the mask pattern to photopolymer.

Table 1 Comparison between two arched CGHs.

	4-plane arched CGH [3]	16-plane arched CGH (this work)
$n$	2	8
$\theta_d$	7.5°	2.5°
$\theta_t$	42.5°	57.5°

### 2.2. 要素 CGH の角度

本研究では, Fig.2 に示すように隣り合った要素 CGH が為す角度を要素 CGH 角度  $\theta_e$  とする. この時, 隣り合った要素 CGH の法線が為す角度は, 図中に示したとおり,  $\pi - \theta_e$  となる. この角度が要素 CGH の最大回折角  $\theta_{max}$  の 2 倍を超えた場合, 隣り合ったどちらの要素 CGH を通しても像を見ることができない死角が発生する. そのため, 図中に示した角度を設計角度  $\theta_d$  とすると,  $\theta_d = (\pi - \theta_e) / 2 \leq \theta_{max}$  の関係があり, 要素 CGH 角度  $\theta_e$  は,

$$\pi - 2\theta_{max} < \theta_e \quad (2)$$

の条件を満たす必要がある.

### 2.3. アーチ型 CGH の視域角

アーチ型 CGH の片側視域角  $\theta_t$  は要素 CGH 自体の最大回折角  $\theta_{max}$  と設計角度  $\theta_d$  によって

$$\theta_t = \theta_{max} + 2(n-1)\theta_d \quad (3)$$

と表される. ここで  $2n$  は要素 CGH の枚数である. 干渉縞パターンの画素ピッチを  $0.8\mu\text{m}$  とすると, 波長  $532\text{nm}$  では,  $\theta_{max} = 19.4$  度となる. 前回報告した 4 面アーチ型 CGH と本研究の 16 面アーチ型 CGH の片側視域角を  $\theta_{max}$  から求めた結果を Table 1 に示す. 通常のプレート型 CGH の片側視域角は  $\theta_{max} = 19.4^\circ$  であるので, 16 面アーチ型 CGH の視域角はプレート型 CGH の 2.9 倍であることがわかる.

## 3 透過型位相ホログラムの作製

### 3.1 非干渉マスク転写法

背面から照明するために, Fig.4 に示す非干渉マスク転写法を用いて[5], フォトポリマーで透過型位相ホログラムを作製した. この手法では, レーザリソグラフィによって作製した振幅マスクとフォトポリマーを密着して平行光で照明することでマスクの振幅透過率分布と一致した 2 次元屈折率分布を形成するため, 透過型の位相 CGH が作製できる. この転

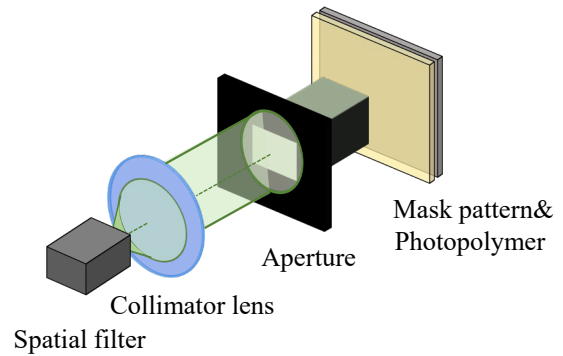


Fig. 5 Transfer of the mask pattern by tiling.

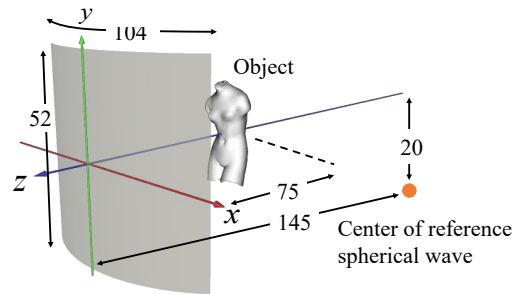
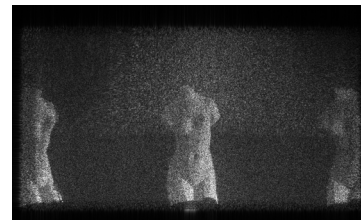


Fig. 6 The 3D scene of the test CGH.



(a) Center



(b) Left



(c) Right

Fig. 7 Simulated reconstruction of the 16-plane arched CGH.

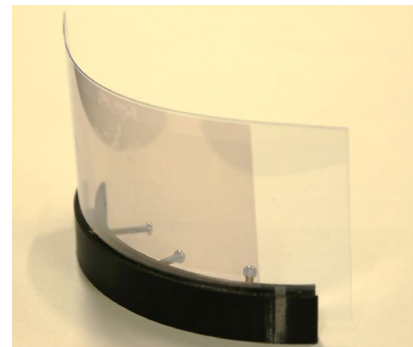


Fig. 8 A photograph of the fabricated smooth arched CGH.

写は光の干渉によるものではないため、極めて振動に強い特長がある[5].

### 3.2. タイリング転写による大型化

本研究では弧の長さが 10cm で高さ 5cm のアーチ型 CGH を作製するため、一度の露光で転写ができない. そこで, Fig.5 に示すタイリング転写を行った. この手法では, 従来のワンショットの転写のようにホログラムのサイズに合わせてビームを広げるのではなく, 開口を通した平行光で露光し, 2 軸ステージを用いてホログラム全体を数回に分けて非干渉マスク転写を行う. この手法では, タイリング数を増やすだけで転写面積を大型化できるため, 転写レーザー光源の出力が低くても大型の転写 CGH を作製することができる.

## 4. アーチ形 CGH の作製と再生

### 4.1. CGH の設計

本研究で作製した 16 枚の要素 CGH から構成されるアーチ型 CGH では, 1 枚の要素 CGH の大きさは縦が 52 mm で横が 6.5mm の長方形である. また, アーチ形状を半径が 75mm で外角  $5^\circ$  の 72 角柱の一部とし, 要素 CGH 角度を  $\theta_e = 175^\circ$  とした. 作製したアーチ型 CGH の 3D シーンを Fig.6 に, また振幅マスクの計算に用いたパラメータを Table 2 に示す

### 4.2. アーチ型 CGH の再生像

計算した振幅マスクを 16 面の角柱型アーチとしてシミュレーションした再生像を Fig.7 に示す. 再生像の左右には高次回折像と思われる像が確認できる. この振幅マスクを実際に作製し, COVESTRO 社のフォトポリマー Bayfol® HX200 に転写を行なった. 漂白したフォトポリマーを曲率半径 75mm の円筒面に貼りつけた状態で背面より照明して, 光学再生像を確認した. 実際に作製したアーチ形 CGH の外観を Fig.8 に示す. また, 照明光源として THORLABS 社製光ファイバー出力緑色 LED を用いた時の光学再生像を Fig.9 に示す. 計算を 16 平面で行って滑らかな曲面として再生したが, 再生像には全く違和感はなかった. しかし, 再生像の端にはシミュレーションと同様に高次回折像と思われる像が確認された.

## 5. まとめ

滑らかなアーチ形状を持った CGH を作製するた

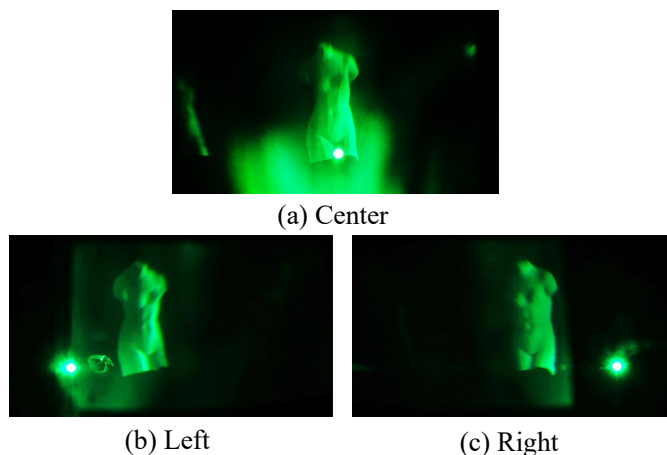


Fig. 9 Optical reconstruction of the smooth arched CGH made of photopolymer.

Table 2 Parameters used for calculating the amplitude mask.

No. of sample points of object field	131,072 × 65,536
Sampling interval of object field ( $\Delta x \times \Delta y$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	0.8 × 0.8
Size of mask ( $W \times H$ ) [cm]	10.4 × 5.2
Design wavelength [nm]	532
Curvature radius [mm]	75

めに, 16 面アーチ型として計算を行い, タイリングによる非干渉マスク転写したフォトポリマーで滑らかなアーチ型 CGH を作製した. その結果, 違和感のない再生像を確認することができた. 一方, 高次回折像と思われる多重像も確認された. 今後は, 多重像を軽減するために振幅マスクの画素ピッチの調整や曲率の調節を行う必要がある.

## 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*, (Springer, 2020).
- [2] T. Yamaguchi, T. Fujii, H. Yoshikawa: Fast calculation method for computer-generated cylindrical holograms, *Appl. Opt.* **47**, D63-D70(2008)
- [3] 玉置, 松島: プレート型高解像度計算機合成ホログラムの転写による多角柱型ホログラムの作製, 3次元画像コンファレンス 2020, 8-2(2020).
- [4] K. Matsushima, S. Nakahara: Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method, *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [5] 松島, 横山, 松尾, 雑賀: 位相変調型ホログラムの作製方法, 特許第 4535422 号.