

非干渉マスク転写を用いた全方向視差高解像度 CGH のアーチ形状化

玉置 翼[†] 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: [†] k884262@kansai-u.ac.jp, [‡] matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし レーザリソグラフィで高品質なプレート型全方向視差高解像度 CGH を作製することができるが、その視域角は描画した干渉縞の画素ピッチによって制限される。そこで本研究では、レーザリソグラフィの解像度の限界を超えて視域を広げるため、干渉縞を振幅マスクパターンとして描画し、それを非干渉転写法によってフォトリマーにコピーしてアーチ形状化することにより水平方向視域の増大を試みた。

キーワード 計算機合成ホログラム, 非干渉マスク転写法

Arch shaping of full-parallax high-definition CGH using noninterference mask-transfer method

Tsubasa Tamaki[†] Kyoji Matsushima[‡]

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

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

E-mail: [†] k884262@kansai-u.ac.jp, [‡] matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract High-quality plate-type full-parallax high-definition CGH can be printed by laser lithography, but its viewing angle is limited by the pixel pitch of the printed interference fringes. In this study, to enhance the viewing angle beyond the value determined by the spatial resolution of the laser lithography, arching the CGH is attempted to increase the horizontal viewing angle. To curve the CGH, the planar hard amplitude mask, fabricated by laser lithography, is transferred to photopolymer using the noninterference mask-transfer method.

Keyword Computer-generated hologram, Noninterference mask-transfer method

1. はじめに

近年、計算機技術とコンピュータホログラフィの進歩により、“Sailing Warship II” や“Toy Train”などの数100~1000億画素規模の全方向視差高解像度 CGH が作製されるようになった[1]。このような全方向視差高解像度 CGH では、水平方向のみならず垂直方向の視差も再生されるため、知覚矛盾が全く生じない。そのため、これらの CGH は驚くほど奥行き深い像を再生できる。この干渉縞を描画する手法として、計算機上で数値合成した干渉縞パターンをクロム等の金属膜による二値振幅画像として描画するレーザリソグラフィ技術がある。この技術で作製した干渉縞はコントラストが非常に高いため、高品質なプレート型 CGH となる。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によって決定される。例えば、“Toy Train”の水平方向画素ピッチは0.8 μm であり赤色波長で再生した場合、両側視域は約45度となる。しか

し、画素ピッチの縮小による大幅な視域拡大はレーザリソグラフィ装置の性能上困難である。

そこで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型 CGH が報告されている[2]。一方我々は、曲面を16平面で近似計算し、レーザリソグラフィで作製した高精度の振幅マスクパターンを可塑性のあるフォトリマーに転写して作製した滑らかなアーチ形状 CGH を報告している[3]。このアーチ型 CGH の大きさは10.4 \times 5.2 cm²で、水平方向視域115度の自然な像を再生できたが、高次回折像と思われる多重像が確認された。本論文では同様の手法を用いて、さらに大きな15.7 \times 5.2cm²のアーチ型 CGH を作製し、多重像が映らない自然な再生像が得られるアーチ型 CGH を報告する。

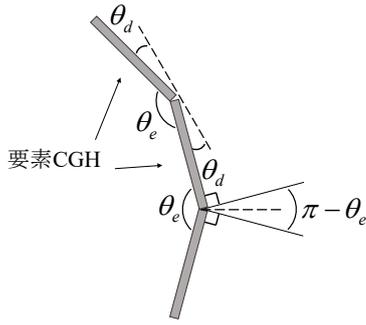


Fig.1 要素 CGH の角度

Table 1 アーチ型 CGH の視域角

	16 面近似 CGH[3]	32 面近似 CGH(本研究)
n	16	32
θ_d [°]	2.5	1.6
θ_t [°]	57.5	80.0

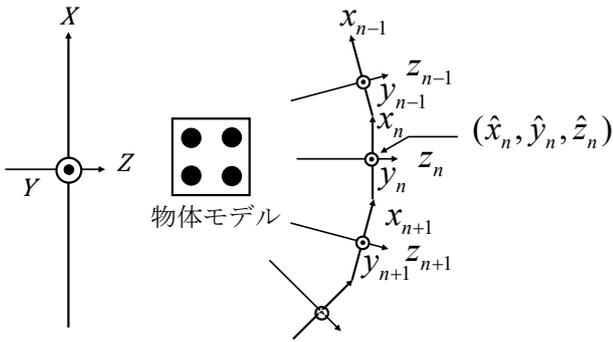


Fig.2 要素平面の定義

2. アーチ型 CGH

2.1. アーチ型 CGH の作製手順

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]。この計算法では、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計算することができる。しかし、計算された物体光波は平面上の複素振幅分布となる。そのため、物体光波を求める曲面を要素平面と呼ぶ多数の平面で近似する。要素平面上で求めた物体光波から求めた干渉縞パターンを単一平面上に展開し、レーザリソグラフィを用いて、ガラス基板上で金属膜として振幅マスクを作製する。

さらに、本研究では、この振幅マスクのパターンを非干渉マスク転写法によりフォトリソグラフィによりフォトポリマーに転写して 2 次元的な屈折率分布を形成し、この位相ホログラムを曲げることでアーチ型 CGH を作製した。

2.2. 要素 CGH の角度

各要素平面から作成する CGH を要素 CGH とし、Fig.1 に示すように、隣接する要素 CGH が為す角度を

θ_e とする。この時、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 θ_{\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、図中に示した設計角度 θ_d には、 $\theta_d = (\pi - \theta_e) / 2 \leq \theta_{\max}$ の条件があり、 θ_e は

$$\pi - 2\theta_{\max} < \theta_e \quad (1)$$

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 θ_t は要素 CGH 自体の最大回折角 θ_{\max} と設計角度 θ_d によって

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

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 532nm では、 $\theta_{\max} = 19.4^\circ$ となる。前回報告した 16 面近似のアーチ型 CGH と本研究の 32 面近似 CGH の片側視域角 θ_t を θ_{\max} から求めた結果を Table 1 に示す。

3. 振幅マスクの作製

3.1. マスクパターンの計算

本研究では、Fig.2 に示すように、要素平面 n のローカル座標系 (x_n, y_n, z_n) 上で物体光波 $g_n(x_n, y_n)$ を計算した。同様に、参照光波 $r_n(x_n, y_n)$ も要素平面毎に求めた。

干渉縞強度分布 $I_n(x_n, y_n)$ を物体光波と参照光波の数値的干渉で求めるが、この時、レーザリソグラフィで描画するのはバイナリパターンであるため、双極性干渉縞強度として求めた $I_n(x_n, y_n)$ をゼロ閾値で 2 値化して単一の平面上に展開することで、描画する振幅パターンのデータを求めている。

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

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_n & 0 & -\sin\theta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_n & 0 & \cos\theta_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - \hat{x}_n \\ Y - \hat{y}_n \\ Z - \hat{z}_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

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。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、 θ_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。

3.2. 物体位置の制約と不要像の抑制

Fig.3(a) に示すように、曲面を平面に近似した場合、一つの要素 CGH の幅は小さくなる。そのため、物体モデルのサイズが要素 CGH より大きくなるケースがある。このような場合、物体光波の計算範囲を拡大し

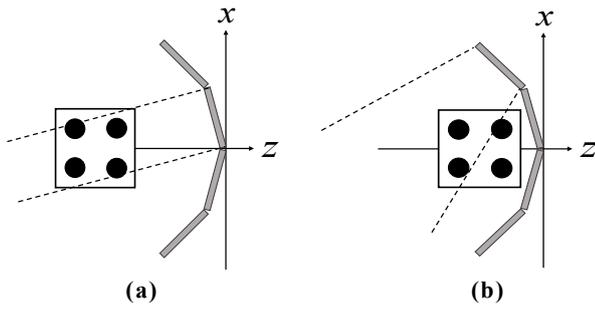


Fig.3 物体位置の制約

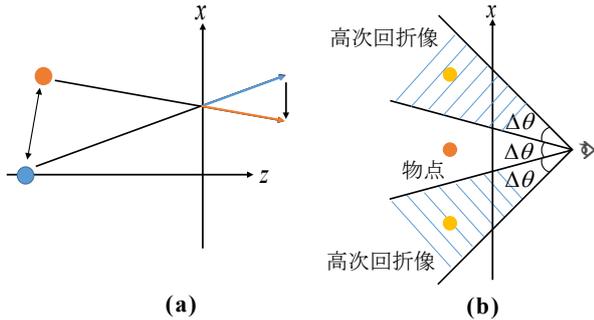


Fig.4 干渉縞の空間周波数(a)と高次回折像(b)

て干渉縞を計算し、その後干渉縞を適正な大きさにトリミングする必要がある。

しかし、Fig.4(a)に示すように、要素 CGH の干渉縞ベクトルは $\mathbf{K} = \mathbf{k}_O - \mathbf{k}_R$ として、物体光の波動ベクトル \mathbf{k}_O と参照光の波動ベクトル \mathbf{k}_R の差分で与えられ、 $\mathbf{K} / (2\pi)$ の要素 CGH 面方向成分の大きさが干渉縞周波数となる。従って、物点と参照光の中心との距離 d が大きくなると干渉縞周波数が増大する。また、Fig.4(b)に示す通り、矩形の干渉縞画素では、その空間スペクトルは画素ピッチ Δx で決まる周期性を有するため([1], Sec.8.9.1), 概ね

$$\Delta\theta \approx \sin^{-1}(\lambda / \Delta x) \quad (4)$$

の外側を見込むと高次回折像が見える。

そのため、アーチ型ホログラムでは、エイリアシングや高次回折による不要像を避けるためには、Fig.3(b)のような配置を避け、アーチの中心に物体を配置することが必要である。本研究では、さらに水平方向画素ピッチを従来より小さな $\Delta x = 0.6 [\mu\text{m}]$ とすることで、不要像の発生を防いでいる。

4. 透過型位相ホログラムの作製

4.1. 非干渉マスク転写法の原理

透過照明で再生するために、Fig.5 に示す非干渉マスク転写法を用いて、透過型位相ホログラムを作製した[5]。この手法では、レーザー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露光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。

4.2. タイリングによる大型化

本研究では弧の長さが 15.7cm で高さ 5.2cm 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.6 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径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。実際に転写した際のパラメータを Table 2 に示す。

5. アーチ型 CGH の作製結果

5.1. CGH の設計

本研究で作製した 32 平面近似のアーチ型 CGH では、1 枚の要素 CGH の大きさを $4.9 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$ とした。また、アーチ形状の曲率半径を 75mm として外角 3.2° の 96 角柱で近似し、 $\theta_e = 176.8^\circ$ とした。作製したアーチ型 CGH の 3D シーンを Fig.7 に、また振幅マスク計算に用いたパラメータを Table 3 に示す。

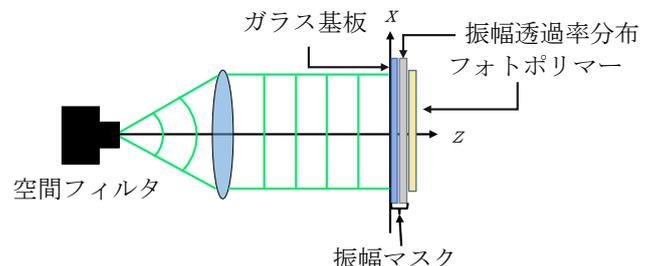


Fig.5 非干渉マスク転写法

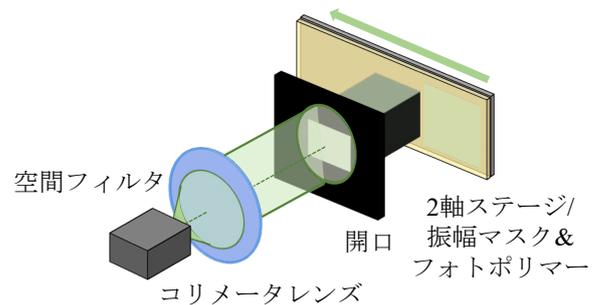


Fig.6 タイリング転写

Table 2 非干渉マスク転写のパラメータ

露光強度 [mW/cm^2]	0.6
1 タイルの露光時間 [s]	50
露光量 [mJ/cm^2]	30
開口サイズ [cm^2]	5.5×5.5
タイル数	3×1

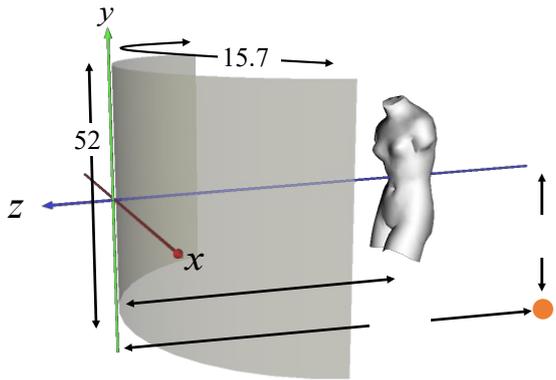


Fig.7 アーチ型 CGH の 3D シーン

Table 3 アーチ型 CGH のパラメータ

画素数	262,144×65,536
画素ピッチ [μm]	0.6×0.8
干渉縞面積 [cm^2]	15.7×5.2
両側視域角(水平×垂直) [$^\circ$]	160.0×45.0
設計波長 [nm]	630
曲率半径 [mm]	75

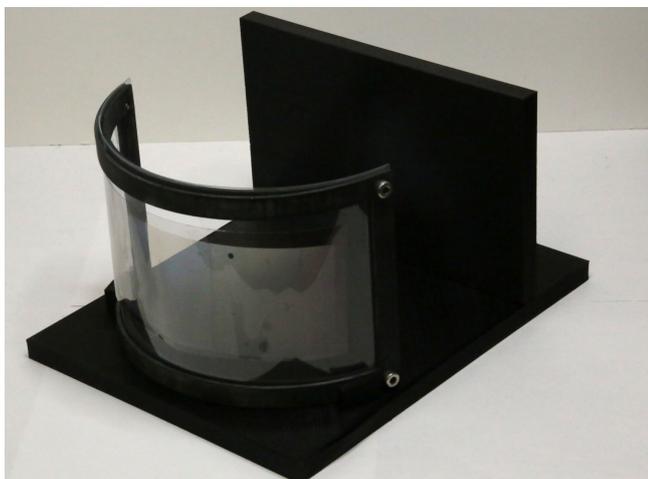


Fig.8 アーチ型 CGH の外観

5.2. アーチ型 CGH の再生像

振幅マスクを 32 面の角柱型アーチとして実際に作製し、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。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赤色 LED を用いた時の光学再生像を Fig.9 に示す。32 平面で近似計算し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。また、多重像が生じない再生像を得ることができた。



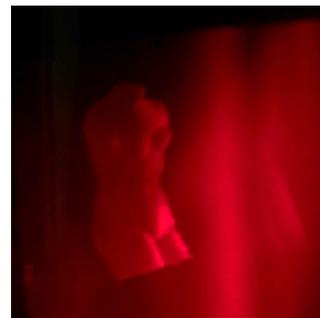
(a)正面視点



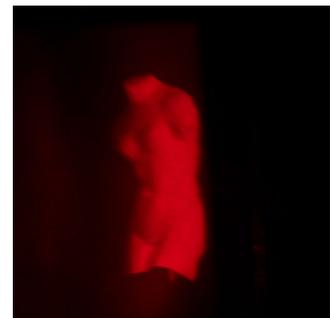
(b)左視点(-20°)



(c)右視点(20°)



(d)左視点(-50°)



(e)右視点(50°)

Fig.9 アーチ型 CGH の光学再生像

6. まとめ

滑らかなアーチ形状を持った CGH を作製するために、32 面で近似計算し、非干渉マスク転写法でタイリング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。今後の展望としては、半円筒型 CGH の作製を試みる予定である。

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: 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差の増大, 3 次元画像コンファレンス 2021, 5-4(2021).
- [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.