

# 計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション —再生照明光波面の再生像への影響のシミュレーション—

村上 和也<sup>†</sup> 松島 恭治<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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: murakami@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

**あらまし** CGH を作製せずに再生像を確認するシミュレーションとして従来提案されている手法は、眼のレンズを通して波動光学的に結像した網膜像ではなく、また非回折光や共役像のシミュレーションも報告されていない。そこで本研究では、近年提案されているシフトフレネル回折計算法と回転変換を用いた純粋な波動光学的手法により、CGH を観察したときの網膜像をシミュレーションする手法を提案している。この手法には非回折光や共役像も正確に再現できる特徴がある。今回の発表では特に、再生照明光の波面が CGH 計算時の参照光と異なる場合の再現性について報告する。

**キーワード** 計算機合成ホログラム, シミュレータ, 波動光学

## Full Wave-Optical Simulation of Reconstruction of Full Parallax Computer-Generated Holograms —Simulation of the Effect of Illuminated Wave Fronts on Reconstruction—

Kazuya MURAKAMI<sup>†</sup> and Kyoji MATSUSHIMA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering Science, Kansai University

3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka 565-8680, Japan

E-mail: murakami@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

**Abstract** Techniques for numerical simulation of CGH-reconstruction have been reported in some literatures. However, the reported image is not the retinal image formed by lens of human eyes, and it is not presented to confirm the influence of non-diffraction light and the conjugate image. Recently, we proposed a novel technique for simulated reconstruction. This new method simulates the retinal image of reconstruction of CGHs by using methods of the shifted Fresnel diffraction and rotational transformation. We report the influence in reconstruction in cases that the illumination wave used in reconstruction is different from the reference wave used in CGH calculation.

**Keyword** CGH, Simulator, Wave-optics

### 1. はじめに

計算機合成ホログラム(以下, CGH)は数値的に合成した干渉縞を空間光変調器(SLM)やフリンジプリンタ,あるいは微細加工技術等により表示/描画し,立体画像を得る技術である。しかしながら,SLMを除き,これらの機器でのCGH描画には非常に長時間を要するのが一般的であり,長い場合には数日を要することもある。しかも,実際にCGHの光学再生像を観察するまでは,CGH計算時の参照光と再生照明光が異なる場合の影響や,両眼の視点位置が異なることにより観察者が受け取る再生像の印象等を確認できない。そのため,実際の描画を行わずに再生像を確認する方法が強く求められている。

CGH を作製せずに再生像を確認するシミュレーション手法として,我々は波動光学的手法を用いて人間

の網膜像をシミュレートする手法を既に提案している[1]。この手法は,近年提案されているシフトフレネル回折計算法[2]と回転変換[3]を用いた純粋な波動光学的手法であり,全方向視差CGHを観察したときの網膜像のシミュレーションを行うものである。

今回は,CGH計算時の参照光と再生時の照明光が異なる場合を中心に,本シミュレータによる再生シミュレーションの正確さについて報告する。

### 2. シミュレーションの方法

#### 2.1. シミュレーションの手順

Fig.1 に本シミュレーションで用いる座標系とCGH再生と観察のモデルを示す。物体上の注視点Pはホログラムから距離 $d$ 離れた光学軸上にある。また視点Wはホログラムから距離 $z_{eye}$ 離れた平面上にあるとする。この座標系を用いて,以下のような手順でシミュレー

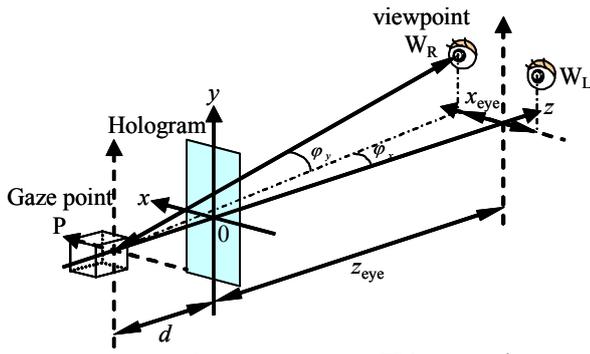


Fig.1 シミュレーション再生のモデル

シミュレーションを行う。

- i) 干渉縞に再生照明光の複素振幅分布を乗算
- ii) 乗算した光波をシフトフレネル回折計算法で視平面へ伝搬計算
- iii) 光波の回転変換
- iv) 眼球のレンズによる網膜への結像

このうち iii) は視点方向を注視物体方向に向けるために用いる。

## 2.2. CGHの参照光と照明光の関係

ホログラムの再生では、参照光と照明光が同一ならば、再生像は元の物体の位置に再生される。しかし、再生照明光の波長や光学系が変わった場合、再生像の位置も変化する。Fig.2 (a)に示す参照光源で記録した物体を(b)の照明光源で再生した時の結像点は

$$1/R_i = 1/R_c \pm \mu(1/R_o - 1/R_r) \quad (1)$$

$$\sin \theta_i = \sin \theta_c \pm \mu(\sin \theta_o - \sin \theta_r) \quad (2)$$

から求めることができることが知られている[4]。Rはホログラムの中心から各点までの距離、θはそれぞれの角度であり、添字 r, o, c, i はそれぞれ参照光、物体光、再生照明光、再生光を表す。また、 $\mu = \lambda_c / \lambda_o$  は記録時の波長  $\lambda_o$  と再生時の波長  $\lambda_c$  の比である。複合の+は真の像、-は共役像に対応する。

## 3. シミュレーション対象CGHと視点位置

今回シミュレーション対象としたCGHである「モ

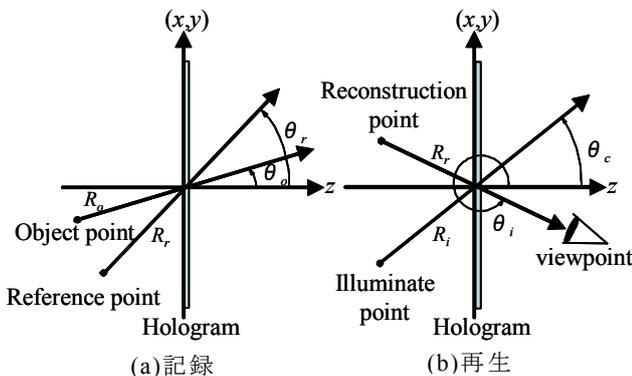


Fig.2 CGHの記録・再生モデル

アイ」の3DシーンをFig.3に、また主要なパラメータをTable1に示す。このCGHでは奥行き15cmと30cmにモアイ像を、また55cmの位置には背景画像を配置している。このシーンの物体光波を計算し、球面波参照光でコーディングしたCGHと平面波参照光でコーディングしたCGHの二つのCGHを製作した。1枚のCGHの製作には、レーザーソグラフィシステムを用い、およそ3日間が必要である[5]。しかし、これらのCGHを光学再生して観察したところ、CGHのサイズに比べてシーンの奥行きが深すぎ、シーンの最深部を両眼視することが困難な場合があることがわかった。

そこで今回、特に左右の眼で観察される像をシミュレートするため、Fig.1で示したように、ホログラムから  $z_{eye}$  離れた位置で  $x$  軸方向に  $\pm x_{eye}/2$  離れた2点をそれぞれ左眼、右眼の視点とした。すなわち、視点は  $W_L(-x_{eye}/2, 0, z_{eye})$ ,  $W_R(x_{eye}/2, 0, z_{eye})$  である。なお、両眼とも同じ注視点に向いているとし、それぞれの視点に対して対称な回転変換を行う。

## 4. シミュレーション再生実験結果

Table2にシミュレーション再生に用いたパラメータを示す。なお今回のシミュレーションでは、 $8 \times 2$ のセグメントに分割されたCGHの干渉縞をさらに  $y$  軸方向に4分割して  $8 \times 8$ のセグメントとし、その1つ分のセグメントに相当する  $8192 \times 8192$  を網膜面のサンプリング数としている。また解像度を上げるため、シフトフレネル法による伝搬では伝搬先のサンプリング間隔をホログラムのピクセルピッチよりも小さくしている。

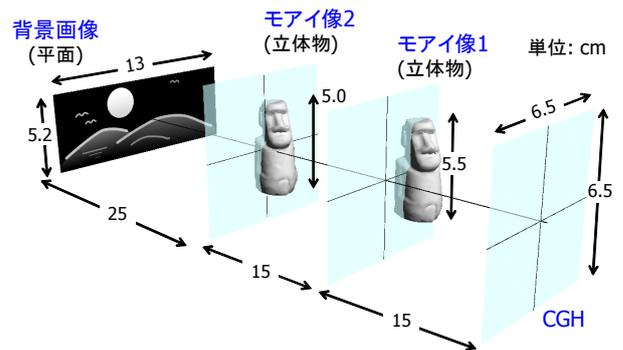


Fig.3 大規模CGH「モアイ」の3Dシーン

Table 1. 「モアイ」CGHのパラメータ

Number of pixels	65,536 × 65,536
Pixel pitches	1 μm × 1 μm
Dimensions	6.55 × 6.55 cm <sup>2</sup>
Reconstruction wavelength	632 nm
Position of point source (Spherical wave coding)	(0, -32.8, 300) mm
Incident angle (Plane wave coding)	9.1°

Table 2. 再生シミュレーションのパラメータ

Sampling distance in retina	0.5 $\mu$ m $\times$ 0.5 $\mu$ m
Diameter of pupil	4 mm (*)
Distance between retina and lens	24 mm (*)
Distance between eyes ( $x_{eye}$ )	60 mm
View-point distance ( $z_{eye}$ )	400 mm
Position of point source	(0, -32.8, 250)
(Spherical wave reconstruction)	mm
Incident angle	9.1 $^{\circ}$
(Plane wave reconstruction)	

(\*) Ref.[6]

#### 4.1. 左右の眼で観察される再生像

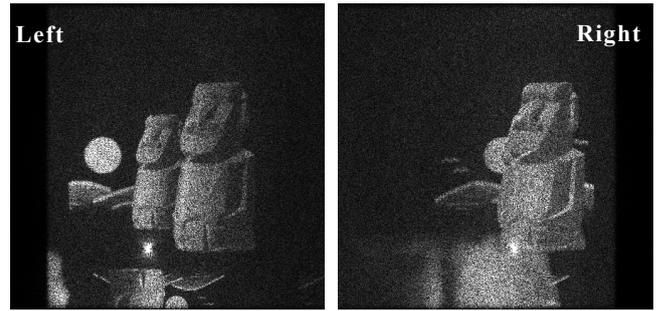
Fig.4 と 5 に本シミュレータにより再生した像と光学再生像を示す. ここで, 実際の CGH の展示と一致させるために, いずれの CGH もホログラム面から 25cm 離れた点光源を照明光源として再生を行っている. なお, 光学再生像の写真は, He-Ne レーザを再生照明光源として再生し, デジタルカメラで撮影したものである. Fig.4 は球面波参照光の場合であり, 位置は異なるものの同じ球面波を用いて再生しているため, わずかに再生位置がずれるだけで, ほぼ制作意図通りのシーンが再生されている. しかし, 左右の像が大きく異なり, 両眼視した際に融像が困難であることがわかる. 一方, Fig.5 の平面波参照光 CGH の球面波再生では, 奥の物体は縮小されシーンの奥行きが縮んでいることがわかる. しかし, 左右の再生像の変化が小さく, 結果的にはこちらの方が両眼視しやすい再生像になっていることがわかる.

#### 4.2. 眼の調節変化の再現性

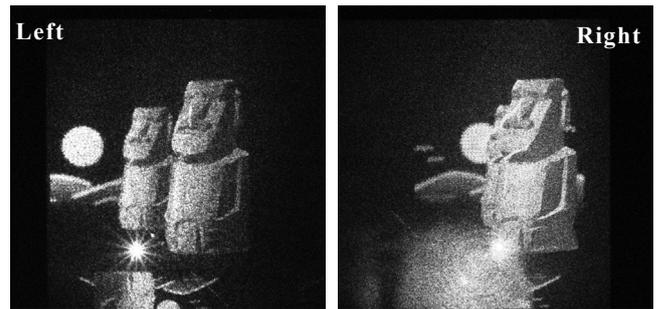
次に, 記録参照光と再生照明光の違いに伴う再生像の奥行き方向の再生位置の変化を正しくシミュレートできているかについて検証した.

Fig.6 と 7 にモアイ像 1 と背景画像に焦点を合わせたシミュレーション再生像と光学再生像を示す. なお, 前節と同じ再生照明光源を用い, 視点位置はホログラムから 40cm 離れた正面の 1 点としている. Fig.6 は球面波参照光の場合で, モアイ像 1 を注視する場合, (1) 式より  $d=13.7$ cm, 背景画像の場合  $d=40.5$ cm で再生を行うことにより, それぞれの注視物体にピントの合った良好なシミュレーション再生像が得られた. このことから, 記録参照光と再生照明光の違いによる再生位置の変化が正しくシミュレートできていることが確認できる. また, Fig.7 の平面波参照光 CGH の球面波再生においては, 奥行き方向の再生位置変化が大きい, (1) 式から計算される距離で良好な再生像が得られた.

平面波参照光 CGH を計算時と同じ条件の平面波で再生し, モアイ像 1 と背景画像に焦点を合わせたときのシミュレーション再生像と光学再生像を Fig.8 に示す. この場合の再生位置は, Fig.3 で示した元の物体位置と同じ位置に再生される. そのためホログラムから

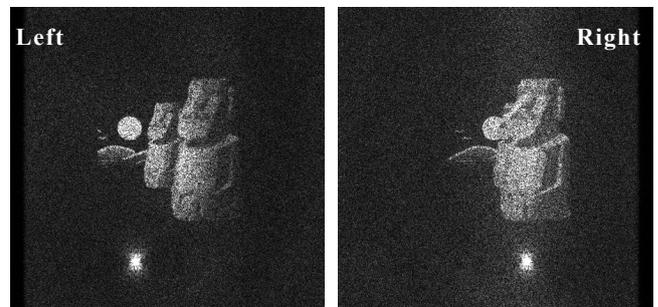


(a)シミュレーション再生像

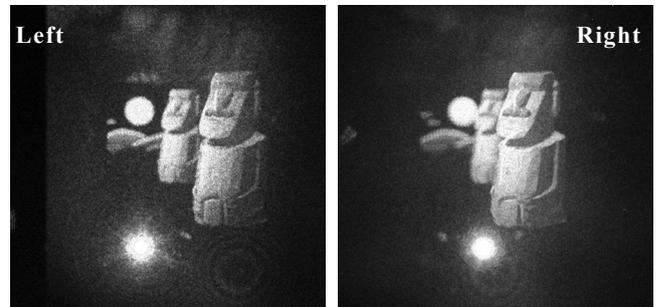


(b)光学再生像

Fig.4 球面波参照光 CGH を球面波で再生した両眼の再生像

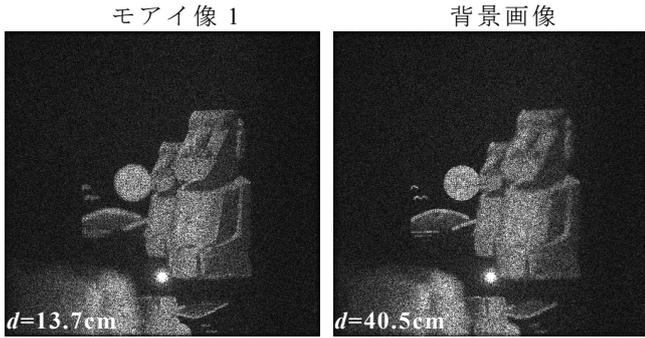


(a)シミュレーション再生像

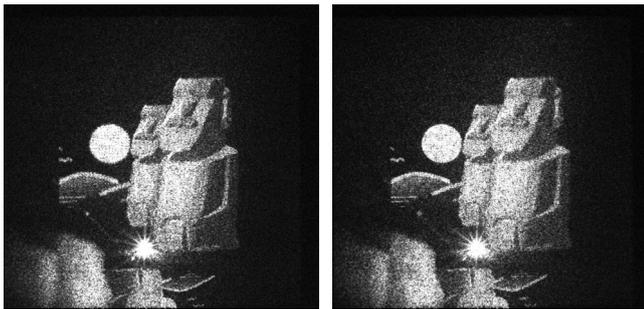


(b)光学再生像

Fig.5 平面波参照光 CGH を球面波で再生した両眼の再生像

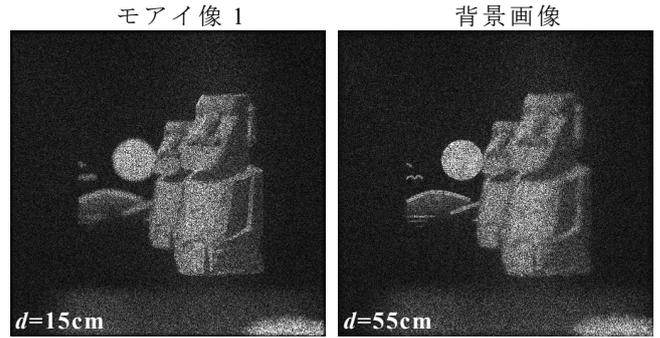


(a)シミュレーション再生像

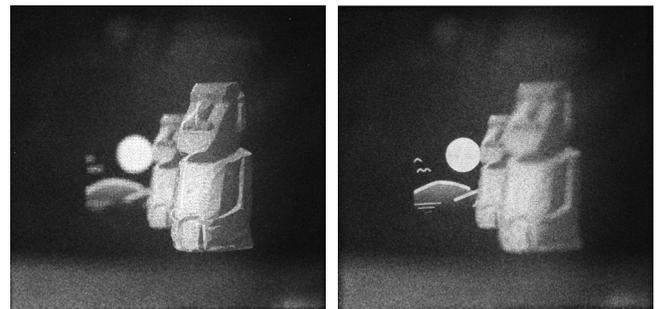


(b)光学再生像

Fig.6 球面波参照光 CGH を球面波で再生した再生像



(a)シミュレーション再生像



(b)光学再生像

Fig.8 平面波参照光 CGH を平面波で再生した再生像

モアイ像 1 と背景画像までの距離をそのまま注視点の奥行き距離とすることで正しい再生像が得られている。

### 5. シミュレーション計算時間

AMD Opteron 850 (2.4GHz), メモリ 16Gbytes を搭載した計算機でコア数 4 で本シミュレーションを実行した結果, 総計算時間は 61.2 分であった. Table 3 に計算時間の内訳を示す. また同じ計算を Intel E7330 (2.4GHz) の 16 コアで行うと 32.5 分が必要であった.

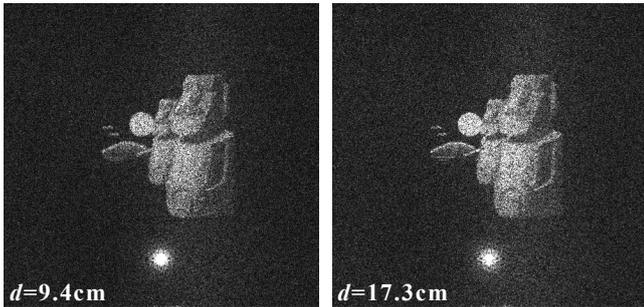
### 6. まとめ

本論文では再生照明光の波面が CGH 計算時の参照光と異なる場合の影響を正しくシミュレートできているかについて述べた. その結果, 参照光と異なる再生照明光を用いた CGH のシミュレーションも正しく行えていることが確認できた.

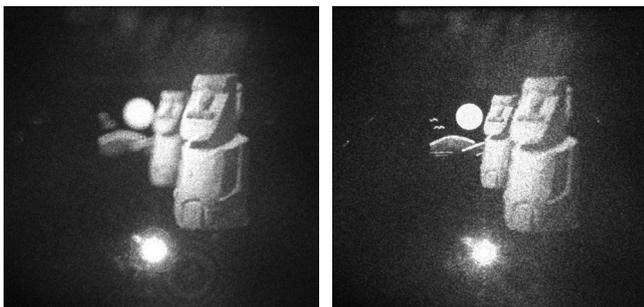
### 文 献

- [1] 村上和也, 圓山泰助, 松島恭治: “全方向視差 CGH の波動光学的再生シミュレーション”, 3D コンファレンス 2009, pp.105-108(Jul.2009)
- [2] R. P. Muffoletto, J. M. Tohline: “Shifted Fresnel diffraction for computational holography”, Opt. Express, **15**, 5631(2007)
- [3] K. Matsushima: “Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography”, Appl. Opt., **47**, D110(2008)
- [4] 久保田敏弘: “ホログラフィ入門: 原理と実際”, 朝倉書店, pp.29-34(1995)
- [5] 松島恭治, 中原住雄: “ポリゴン法による大規模な全方向視差 CGH 作成のための分割計算法”, 3D コンファレンス 2009, pp.61-64(Jul.2009)
- [6] 村田和美: “光学”, サイエンス社, pp.208-210(2004)

モアイ像 1 背景画像



(a)シミュレーション再生像



(b)光学再生像

Fig.7 平面波参照光 CGH を球面波で再生した再生像

Table 3. シミュレーション計算時間の内訳

光波伝搬	55.4 min
回転変換	4.0 min
結像	1.8 min
総計算時間	61.2 min