

全方向視差 CGH の波動光学的再生シミュレーション

Full Wave-Optical Simulation of Reconstruction of Full Parallax Computer-Generated Holograms

村上和也 圓山泰佑 松島恭治

Kazuya Murakami Taisuke Maruyama 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

We propose a novel method to simulate optical reconstruction of full-parallax computer-generated holograms (CGH). In the method, the wave field emitted from the CGH is numerically propagated into an eye lens, and then image formation based on wave optics is simulated in retinal screen. Two techniques for free space propagation, shifted Fresnel method and rotational transformation, are used for numerical calculation and make it possible to move the viewpoint and change the angle of observation. As a result, this simulator allows us to confirm the influence of non-diffraction light and the conjugate image of large-scale CGHs without the fabrication.

Keywords: 計算機合成ホログラム, シミュレータ, 波動光学, 全方向視差

1. はじめに

計算機合成ホログラム(以下, CGH)は数值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. 特に, 微細加工機器の一つであるレーザー直接描画装置を用いて描画した CGH では非常に美しい再生像が得られる[1]. しかしながら, SLM を除いて, 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. 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, 再生時の照明角度と観察者の位置およびホログラムの空間周波数から, 幾何光学的手法により観察者の方向に向かう回折光を求める方法が提案されている[2]. しかしこれは眼のレンズを通して結像した網膜像ではないため, 全方向視差 CGH の非回折光や共役像の影響を確認することができなかった.

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[3]と回転変換[4]を用いた純粹な波動光学的手法により, 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手法を提案する.

村上和也

murakami@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

〒565-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

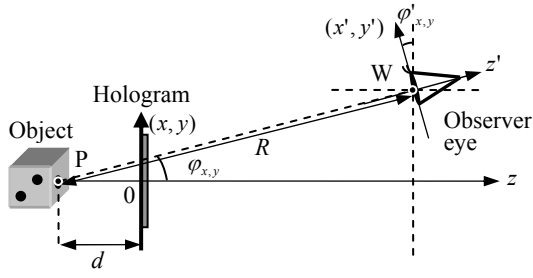


Fig.1. Coordinate system and the model used for simulation.

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 に本シミュレータで用いる座標系と 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 離れた位置にあり, その座標は $P = (0, 0, -d)$ である. また視点 W は P から距離 R 離れた位置にあるとする. このモデルを用いて, 次の3段階で網膜像をシミュレートしている.

(i) ホログラム回折光波の視点位置への並進的伝搬計算

(ii) 光波の回転変換

(iii) 眼球のレンズによる網膜への結像

このうち, (ii)は視線の方向を注視点に向けるために用いている.

2.2. 眼球への入射光波の計算

本シミュレータの入力である干渉縞強度分布 $I(x, y)$ の背面より参照光 $u_{\text{ref}}(x, y)$ が入射したとき, 透過光は

$$u(x, y) = I(x, y)u_{\text{ref}}(x, y) \quad (1)$$

となる. この光波を観測者の瞳位置 W まで並進伝搬し眼球へ入射する光波

$$u_{\text{eye}}(x, y) = P_W \{u(x, y)\} \quad (2)$$

を求める. ここで $P_W \{ \}$ はシフトフレネル回折計算[3]により原点から $W = (x_0, y_0, z_0)$ まで伝搬する演算を表す. これにより視点移動が行われるが, 単純に視点を移動した場合, そのままでは視点と注視点を結んだ線が視線に一致しない. このため回転変換を用いることにより, 視線上に注視点が来るように $u_{\text{eye}}(x, y)$ を傾ける処理を行う必要がある. 従って, 眼球への入射光は,

$$u'_{\text{eye}}(x', y') = \mathcal{R}_{\phi_x, \phi_y} \{u_{\text{eye}}(x, y)\} \quad (3)$$

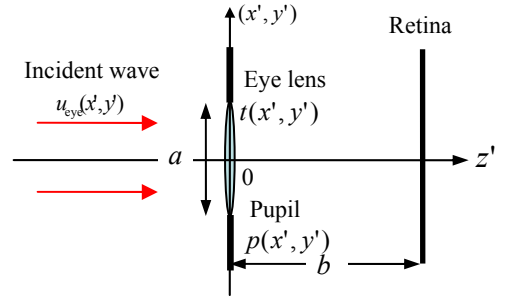


Fig.2. The optical model of human eyes.

となる. ここで, $\mathcal{R}_{\phi_x, \phi_y} \{ \}$ は x 軸と y 軸周りの角度 ϕ_x と ϕ_y の回転変換[4]を表す.

2.3. 眼球内での結像計算

Fig.2 に眼の光学モデルを示す. 本研究では角膜と水晶体を区別せず, 一つのレンズの作用のみで光波が網膜上で結像するとした. このレンズの透過率分布を

$$t(x', y') = \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda f} (x'^2 + y'^2) \right] p(x', y') \quad (4)$$

とした. ここで, λ は波長, f は焦点距離である. この焦点距離は, 網膜-レンズ間の距離 b と視点と注視点の距離 R を用いて結像公式 $1/f = 1/R + 1/b$ により求まる. また $p(x', y')$ は瞳関数であり, ここでは虹彩の大きさ a を直径とする円形とした.

レンズ透過後の光波が網膜面までの距離 b 伝搬すると結像して網膜像

$$I_{\text{eye}}(x', y') = \left| \tilde{P}_b \{u'_{\text{eye}}(x', y')t(x', y')\} \right|^2 \quad (5)$$

が得られる. ここで, $\tilde{P}_b \{ \}$ は角スペクトル法により距離 b 伝搬する演算を表す.

3. 視点位置

Fig.3 に視点位置と回転角の関係を示す. Fig.1 に示した通り, 視点 W は常に注視点 P から一定距離 R だけ離れた位置にあり, 視点移動は半径 R の球面上で行うものとする. 従って, Fig.3 に示すホログラムの観察角度 ϕ_x と ϕ_y が(3)式の回転角度なる.

また, 共役像を観察する場合は, 共役像上に注視点 $P' = (x, y, z)$ を定め, 視点位置 (x_0, y_0, z_0) から観察すると考える. そのため, 回転角度は

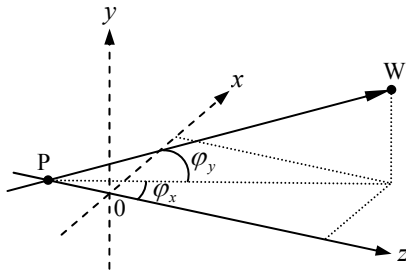


Fig.3. Definitions of observation angles of the CGH.

$$\begin{aligned}\varphi_x &= \tan^{-1} \frac{x_0 - x}{z_0 - z} \\ \varphi_y &= \tan^{-1} \frac{y_0 - y}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - z)^2}}\end{aligned}\quad (6)$$

となる.

4. CGH の光学再生像とそのシミュレーション

Table 1 にシミュレーションの対象とした CGH のパラメータを示す. この CGH は総ピクセル数 40 億ピクセルに達する大規模な物であり, レーザリソグラフィシステムを用いておよそ 3 日間かけて製作される. また, この CGH はポリゴン法とシルエット法により計算された全方向視差 CGH であり, 相互オクルージョンが生じるシーンを再生することができる[1].

Table 2 にシミュレーション再生に用いたパラメータを示す. また今回シミュレーションを行った CGH の干渉縞データは 8×4 のセグメントに分割されているため, シミュレーションにおいても (2) 式の $u_{\text{eye}}(x, y)$ の計算範囲を 1 つ分のセグメントと同じサイズに設定し, サンプル間隔も同一にしている. 従って, 網膜上のサンプル間隔はホログラムのピクセルピッチと同じ値になっている.

Fig.4 の(a)に観察角度を $(\varphi_x, \varphi_y) = (0, 0)$ として, 本シミュレータにより再生したシミュレーション再生像を, また(b)に光学再生像の写真を示す. この結果より, 本シミュレータで光学再生像と良く一致するシミュレーション再生像が得られていることがわかる. なお, 光学再生像の写真は He-Ne レーザー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.5 にホロ

グラム観察位置を水平方向に移動させたときの結果を示す. この時の観察角度は(a)では $(\varphi_x, \varphi_y) = (2^\circ, 0)$, (b)では $(\varphi_x, \varphi_y) = (-5^\circ, 0)$ である. 図からわかるように, 水平方向の視点移動による物体の位置関係が正しくシミュレーションできていることが確認できる. 同様に, Fig.6 では観測位置を垂直方向に移動させたときの結果を示した. この時の視点位置は, (a)は $(\varphi_x, \varphi_y) = (0, 3^\circ)$, (b)は $(\varphi_x, \varphi_y) = (0, -3^\circ)$ である. この場合も視点移動に対するシミュレーションが正しく行えていることがわかる. これらの結果より, 本シミュレータでは CGH が有する全方向の視差を再現していることがわかる. さらに Fig.7 に共役像が重なる観察角度である $(\varphi_x, \varphi_y) = (9.1^\circ, 0)$ におけるシミュレーション再生像を(a)に, 対応する光学再生像を(b)に示す. この結果から, 再生時における非回折光や共役像の影響が正しくシミュレート出来ていることが確認できる.

5. 議論

シミュレーション再生像はいずれも, 光学再生像の写真に比べると粒子の粗い再生像となって

Table 1. Parameters of a large-scale hologram named “The Venus”[1].

Number of pixels	65,536×65,536
Pixel pitches	1μm×1μm
Dimension	6.55×6.55cm ²
Reconstruction wavelength	1μm×1μm
Angle of reference wave	9.1°

Table 2. Parameters used for simulations.

Sampling distance in retina	1μm×1μm
Diameter of pupil (a)	4mm (*)
Distance between retina and lens (b)	24mm (*)
Reconstruction distance (R)	400mm
Angle of reference wave	9.1°

(*) Ref.[5]

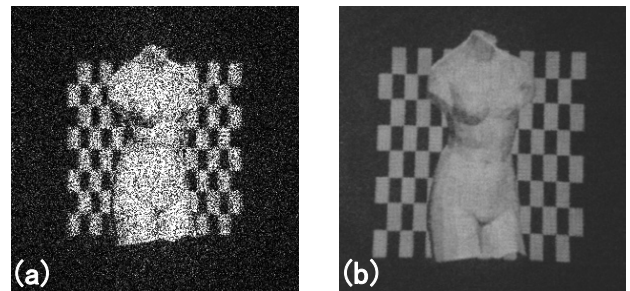


Fig.4. Simulated (a) and optical (b) reconstruction of the large-scale hologram.

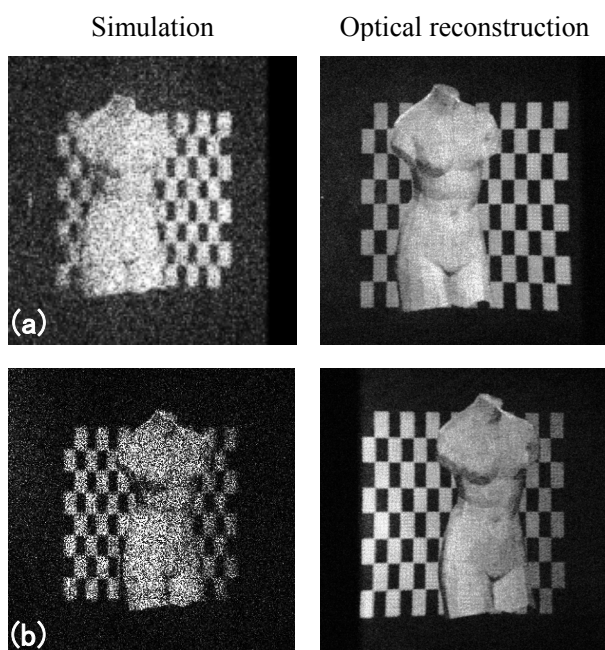


Fig.5. Simulated and optical reconstruction of the large-scale hologram.

(a) $(\varphi_x, \varphi_y) = (2^\circ, 0)$, (b) $(\varphi_x, \varphi_y) = (-5^\circ, 0)$.

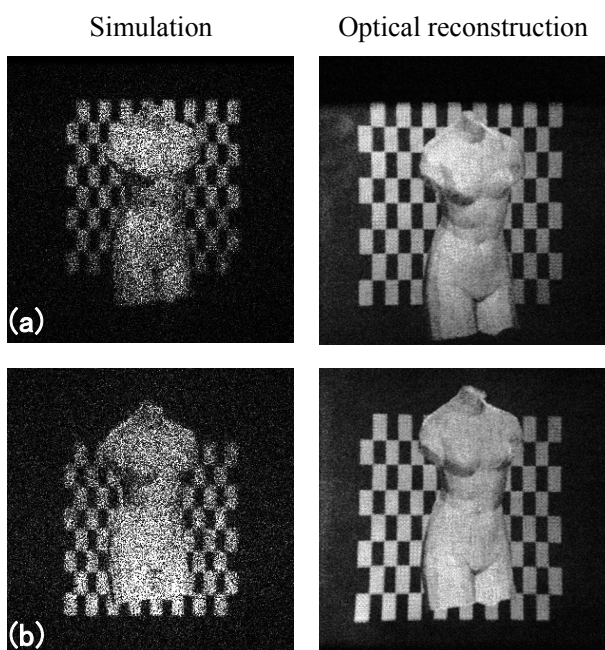


Fig.6. Simulated and optical reconstruction of the large-scale hologram.

(a) $(\varphi_x, \varphi_y) = (0, 3^\circ)$, (b) $(\varphi_x, \varphi_y) = (0, -3^\circ)$.

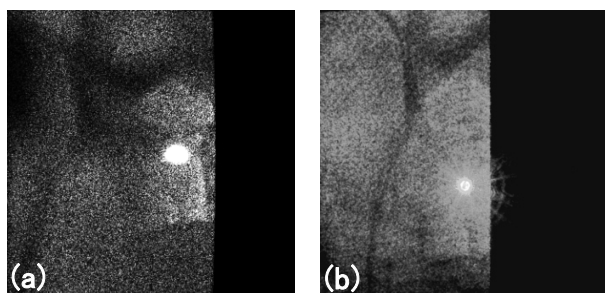


Fig.7. Simulated (a) and optical (b) reconstruction of the large-scale hologram. $(\varphi_x, \varphi_y) = (9.1^\circ, 0)$.

いることがわかる. この理由の一つとして, シミュレーションでは完全にコヒーレントな単一波長で結像を行っているため, スペックルが発生していることが考えられる. またもう一つの理由として, 今回は網膜のサンプリング間隔をホログラムのそれと同じに取ったため, 小さな網膜像に対して十分なサンプリング数が得られなかったことが考えられる.

6. まとめ

本論文ではホログラムからの光波を数値的に伝搬させて, 眼球のレンズにより結像させる波動光学的手法を用いた再生シミュレーションを行った. 従来用いられていたフレネル回折計算法に代わってシフトフレネル回折計算法を用いたことで, 長距離の伝搬計算が可能となり, また視点移動が可能となった. さらに, 回転変換の手法を用いることで, 視点移動したときも常に視線を注視点の方向に向けることができた. その結果, 眼やカメラでの結像をシミュレートでき, 共役像や非回折光の影響も確認できる再生シミュレーションが可能となった.

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)の助成を受けたものである.

7. 参考文献

- [1] 松島, 中原: 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手法, 3次元画像コンファレンス 2009 講演論文集, (2009)
- [2] 藤田, 山口, 吉川: ホログラムの白色光再生シミュレーション, 映像情報メディア学会誌, **61**, 1481(2007).
- [3] R. P. Muffoletto, J. M. Tohline: Shifted Fresnel diffraction for computational holography, Opt. Express, **15**, 5631(2007)
- [4] K. Matsushima: Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography, Appl. Opt., **47**, D110(2008)
- [5] 村田和美: 光学, pp.208-210(サイエンス社, 2004)