

# レーザー直接描画装置で作製した 大規模で高品質な全方向視差計算機合成ホログラム

## Large-Scale and High-Quality Full-Parallax Computer-Generated Holograms Fabricated by a Direct Laser Lithography System

松島恭治<sup>1</sup> 中原住雄<sup>2,3</sup> 大島勇樹<sup>1</sup> 池元直<sup>2</sup> 中辻達也<sup>1</sup>  
Kyoji Matsushima<sup>1</sup> Sumio Nakahara<sup>2,3</sup> Yuki Oshima<sup>1</sup> Naoshi Ikemoto<sup>2</sup> Tatsuya Nakatsuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関西大学システム理工学部電気電子情報工学科

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronic Eng., Kansai Univ.

<sup>2</sup> 関西大学システム理工学部機械工学科

<sup>2</sup>Department of Mechanical Eng., Kansai Univ.

<sup>3</sup> 関西大学 HRC

<sup>3</sup>High-tech Research Center, Kansai Univ.

### ABSTRACT

Optical reconstructions of computer-generated holograms (CGH) fabricated by a direct laser lithography system are demonstrated. These CGHs have full-parallax and feature high resolution, i.e. wide viewing zone, and giga-pixel scale. For creation of light fields from virtual objects, various techniques reported up to the present are used, such as point source, polygon source, hidden surface removal by silhouette mask, polygon mask, etc. Furthermore, optical reconstructions of the hologram for an actual object, of which fields captured by using digital holography, are also demonstrated.

**Keywords:** CGH, 3次元ディスプレイ, レーザー直接描画装置, 隠面消去, デジタルホログラフィ

### 1. はじめに

MIT の Benton 教授らによるホロビデオ[1]の開発以降, 垂直方向視差を放棄した計算機合成ホログラムに関する研究開発が一時期の隆盛を極めた. しかしその後は, 他の立体ディスプレイ方式とは一線を画すホログラム本来の良さを有する全方向視差 CGH に関する様々な研究開発が漸次進んできた. それには, 例えば, 点光源球面波の高速計算法[2,3]やハードウェア支援計算[4,5], ポリゴン光源法[6,7], 種々の隠面消去手法[8-12], 質感の表現手法等のアルゴリズムに関するもの, また専用フリンジプリンタ等による CGH 製作技術[13-14]に関するものがある.

しかしながら, 残念なことに, これらの手法を駆使して計算・作製された CGH であっても, その光

学再生像の画質は, 技術的な困難さを理解できる一部の研究者を満足させる程度のものであり, 一般的な展示や鑑賞に堪え得るものではなかった. その第一の要因は, 高解像度(=広視域)で大規模・高品質な CGH を作製する微細加工機器[15]の利用が困難なことであり, また第二には, 仮にそのような機器が使えても, それを活かす計算能力やアルゴリズムの欠如があった.

そこで本研究では, レーザー直接描画装置 [16], 大規模メモリ搭載の PC, さらに現在までに蓄積された様々な CGH 計算技術を用い, 広視域でギガピクセル規模の, 鑑賞に堪えるレベルの全方向視差 CGH の合成と作製を目指した.

### 2. CGHの作製手法

本研究では, レーザー直接描画装置を用いて振幅型ホログラムの作製をおこなった[16]. レーザー直接描画装置はレーザービームスポットのラスタースキャンによってウェハやマスクなどのサブミクロンオーダーのフォトレジスト露光やフォトエマ

---

松島恭治

matsu@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 吹田市山手町 3-3-35

TEL/FAX 06-6368-0933

Table 1 Specification of direct laser lithography system.

Light source	He-Cd laser	
Wavelength	442 nm	
Power	20 mW	
Maximum substrate size	200 × 200 mm <sup>2</sup>	
Maximum exposure size	180 × 180 mm <sup>2</sup>	
Focal length of lens	4 mm	10 mm
N.A	0.55	0.25
Maximum spot diameter	0.8 μm	1.7 μm
Exposure speed	100 mm/s	200 mm/s

ルジョン露光を目的とした高精度の描画装置である。

本研究では、ハイデルベルグ社製の DWL66 レーザ直接描画装置を用いた。主な仕様を Table 1 に示す。本研究では、このレーザ直接描画装置を用いて、主に描画ピッチ 1μm で再生波長 633nm 用の CGH を作製した。従って、その視域角は縦横共に約 37 度となる。

### 3. CGHの数値合成手法

Fig.1 にレーザ直接描画装置に入力する描画パターンを数値合成する過程を示す。仮想物体の合成を行う場合には、立体物の形状データ作成には通常の CG 用モデリングソフトウェアを用いている。本研究では主に Shade 8 を用いた。モデラーからは VRML 形式で出力を得て、それを物体光波合成ソフトで解析することにより、仮想物体からの光波を複素振幅分布の形で求める。

VRML 形式で与えられた物体形状の光波を求めるために2種類の手法を用いている。一つ目は、良く知られた点光源法である。本研究ではワイヤフレームで物体形状を得る場合には、線密度 5000~10000 点/m, また表面モデルで物体形状を得る場合には、この2乗程度の面密度で点光源を配置し、漸化式を用いた球面波の加速計算法[2]により物体光波を得ている。しかし、この手法では物体光波の生成そのものに長時間を要する。そのため、表面モデルの場合のもう一つの手法として、ポリゴンを面光源として各ポリゴンからの光波を重畳するポリゴン光源法[7]を用いている。こちらの実装は複雑であるが、非常に高速な計算が可能になる。

表面モデルの仮想物体で2個以上の物体があ

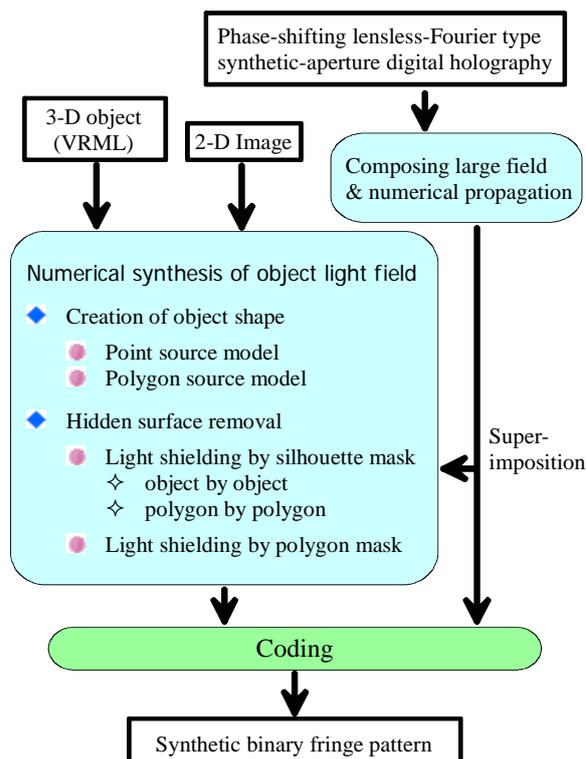


Fig. 1 Procedure for numerical synthesis of fringe pattern.

る場合や、凹物体形状では、隠面消去処理が不可避になる。本研究で作成した CGH では視域角が広い為、運動視差が得られない Z バッファ法に類する手法は適さず、また全方向視差を有するため、その計算量の巨大さから光線追跡による隠面消去[11]も不可能である。そこで本研究では波動光学的手法に基づく隠面消去をおこなっている。本研究で用いる3種類の隠面消去法の原理を Fig.2 に示す。

本研究では主にシルエットマスクを用いた光波遮蔽計算を行っている。これには、物体毎のシルエットにより物体間の遮蔽計算を行う場合[9]と、ポリゴン毎のシルエットにより遮蔽計算を行う場合[8]がある。前者は簡単であり高速に計算が進むが、凹物体の隠面消去はできない。物体毎の

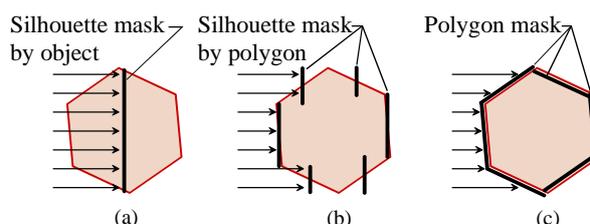


Fig. 2 Hidden surface removal based on wave optics.

Table 2 Common parameters for CGHs.

Number of pixels	30000 × 30000
Pixel size	1.0 × 1.0 μm <sup>2</sup>
Reconstruction wavelength	633 nm
Angle of viewing zone	36.9 deg

シルエットマスクによる隠面消去の原理を Fig.2 (a) に、またポリゴン毎の隠面消去を(b)に示す。後者では凹物体形状も扱えるが、計算時間が長くなる点、またポリゴン間に循環的な遮蔽関係がある場合などの処理が困難な点が問題となる。

シルエットマスクによる光波遮蔽は、ホログラムに対して垂直に近い角度を有するポリゴンでは原理的に有効に働かない。そのような場合には、Fig.2(c)に示す回転変換による傾いたマスクを用いた遮蔽[12]が必要となる。

本研究ではさらに、これらの仮想物体の合成ホログラムに加え、デジタルホログラフィとして撮影した実在物の光学再生も試みた。しかしながら、通常のデジタルホログラフィでは、用いられるイメージセンサの制約から、その解像度とサンプリング数がレーザー直接描画装置で描画する水準に遠く及ばない。そこで、本研究では、広い視野角が確保でき、共役像や非回折光の問題が生じず、センサ周辺部での空間周波数が増加しない位相シフトレンズレスフーリエホログラフィに合成開口の手法 [17] を用いて、等価センサピッチ 2μm×2μm 相当で 8192×8192 サンプリング程度の大規模な光波記録を行い、それを描画して再生を試みた。この場合、視域角は約 18 度となる。

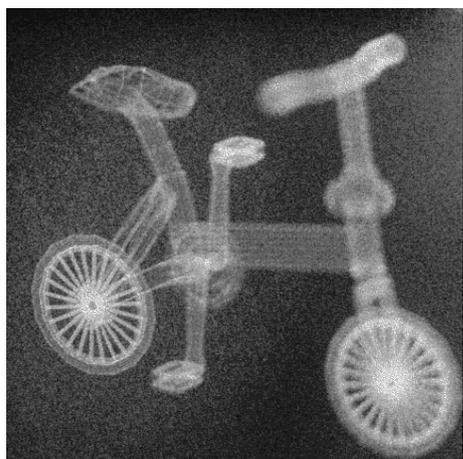


Fig. 3 Optical reconstruction of wire-frame object: "Bicycle."

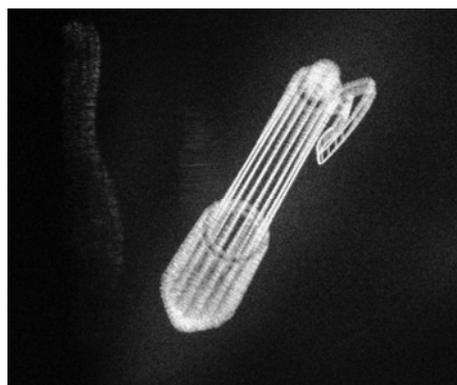


Fig. 4 Optical reconstruction of wire-frame object: "Pen."

#### 4. ホログラムとその再生像

作製したホログラムに共通のパラメータを Table 2 に示す。また点光源を用いて数値合成したワイヤーフレーム物体のホログラムを Fig.3~5 に示す。物体空間に奥行きがある場合には写真撮影が難しいため、Fig.5 ではピント位置を変えた撮影結果を示している。なお、CD 版の論文では視点を変えたアニメーションを収録している。

次にポリゴン毎のシルエット隠面消去を用いて数値合成した表面物体のホログラムを Fig.6 と 7 に示す。これらの CGH はいずれもメモリ 32GB を搭載した AMD Opteron 850 2.6GHz の 4CPU システムで計算を行った。長いものではその計算時間は 100 時間以上に及んだ。

一方、Fig.8 はデジタルホログラフィにより撮影した実在の物体を描画して作製したホログラムの光学再生像の写真である。運動視差を確認するため矢印の向きにカメラの位置をずらして撮影している。このホログラムについては、他と異なり、ピクセルサイズ 2.0μm<sup>2</sup>、再生波長 532nm である。約 18 度の視域角があるため、はっきりした運動視差

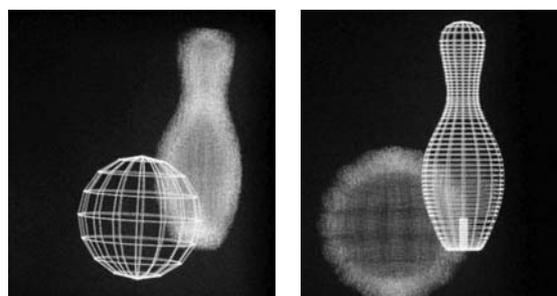


Fig. 5 Optical reconstruction of wire-frame object: "Ball and pin."

が観察できる。

## 5. まとめ

3次元画像というと動画に目を奪われがちであるが、こと CGH に関してはそのレベルは 1960～70年代のコンピュータグラフィックスの黎明期に近く、静止画ですらやっと鑑賞に堪えるかどうかという段階にあると言えよう。しかし、CG がそうであったように、まずは静止画において様々な技術を育て、それを持って将来の高解像度デバイスを用いた動画につなげて行くことが、迂遠ではあっても着実な道筋であると考えられる。

## 参考文献

- [1] P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, J. Underkoffler, H. Yoshikawa: "Electronic display system for computational holography", SPIE Proc. Practical Holography IV, **1212**, 174 (1990).
- [2] K. Matsushima, M. Takai: "Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms", Appl. Opt., **39**, 6587(2000).
- [3] H. Yoshikawa, S. Iwase, T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference", SPIE Proc. #3956, 48 (2000).
- [4] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, T. Sugie: "Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography", Opt. Express, **13**, 1923 (2005).
- [5] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, T. Sugie: "Computer generated holography using a graphics processing unit", Opt. Express, **14**, 603 (2006).
- [6] K. Matsushima, H. Schimmel, F. Wyrowski: "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves", J. Opt. Soc. Am., **A20**, 1755(2003).
- [7] K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture", Appl. Opt., **44**, 4607(2005).
- [8] 近藤, 松島: "シルエット近似を用いた全方向視差 CGH の隠面消去", 信学論 D-II, **J87-D-II**, 1487 (2004).
- [9] 近藤, 松島: "全方向視差 CGH における Babinet の原理による隠面消去", 3次元画像コンファレンス 2002, 113(2002).
- [10] 高瀬, 坂本, 青木: "光線の到来方向を考慮した z バッファによる計算機合成ホログラムの高速隠面消去", 映情学誌, **57**, 483(2003).
- [11] T. Hamano, M. Kitamura: "Computer-generated holograms for reconstructing multi-3-D images by space-division recording method", SPIE Proc. #3956, 23(2000).
- [12] 松島: "全方向視差デジタル合成ホログラムにおける完全かつ高速な隠面消去法", 3次元画像コンファレンス 2005, 73 (2005).
- [13] H. Yoshikawa, M. Tachinami: "Development

compact direct fringe printer for computer-generated holograms", SPIE Proc. #5742, 259(2005).

- [14] 山中, 松島: "デジタル合成ホログラム用高解像度プリンタの高精度化", 映情学誌, **58**, 1665(2004).
- [15] M. Kitamura, T. Hamano: "Computer-generated holograms for multilevel 3D images with complex amplitude modulation", SPIE Proc. #4659, 196(2002).
- [16] 土谷, 中原, 鳥取, 金沢, 藤田: "ホログラムによる大規模再生像の形成 ～カラー化～", Optics & Photonics Japan 2006, 9pP45(2006).
- [17] 中辻, 南, 松島: "合成開口デジタルホログラフィによる広視域 3次元画像情報の取得と数値再生 一視点移動・斜面再生・カラー再生一", 3次元画像コンファレンス 2007, (2007).

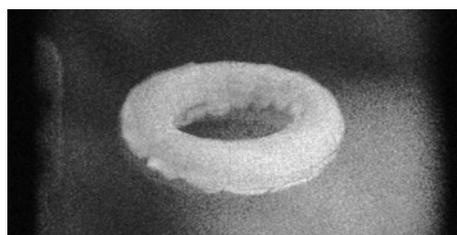


Fig. 6 Optical reconstruction of surface object: "Torus." Hidden surfaces are removed by silhouette mask by polygon.

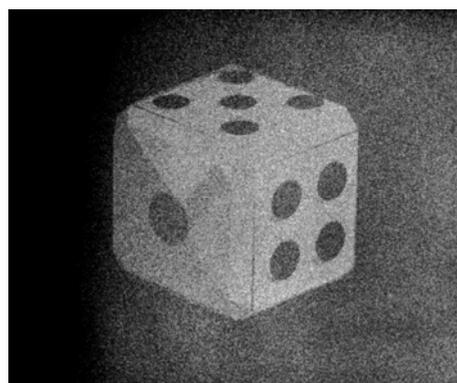


Fig. 7 Optical reconstruction of surface object: "Dice." Hidden surfaces are removed by silhouette mask by polygon.

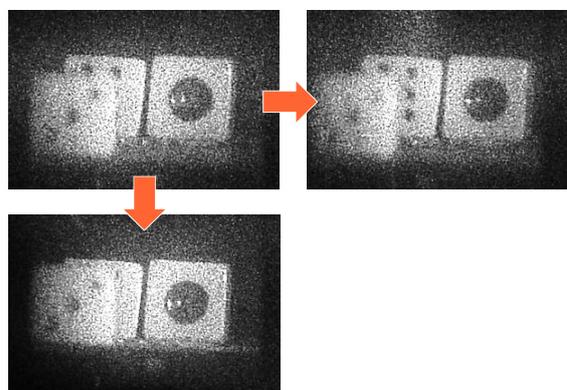


Fig. 8 Optical reconstruction of actual object captured by digital holography.