

関大デジタルホロスタジオにおける大規模 CGH 描画・作成技術

松島恭治* 斎藤智崇 五十嵐勇祐 國枝織絵 橋村直柔 小西涼太

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

*関大デジタルホロスタジオ代表

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし 関大デジタルホロスタジオでは、数 10 億ピクセルを超える大規模な計算機合成ホログラム描画用のレーザー直接描画装置を運用としている。本稿では、この装置を中心に著者らが研究開発している多様な大規模ホログラム描画・作成技術を紹介している。

キーワード 高解像度 CGH, 転写 CGH, 体積 CGH, レーザー直接描画装置, レーザーリソグラフィ

Print and fabrication techniques of large-scale CGH in Kan-Dai Digital Holo-Studio

Kyoji Matsushima, Tomotaka Saito, Yuki Igarashi, Orié Kunieda

Naonari Hashimura, Ryota Konishi

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

*Representative of Kan-Dai Digital Holo-Studio

E-mail: matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract Kan-Dai Digital Holo-Studio established in Kansai University operates a laser direct plotter to print and fabricate large-scale CGHs composed of more than billion pixels. In this paper, various fabrication and print techniques, being developed in Kan-Dai Digital Holo-Studio, are reported with a central focus on the laser direct plotter.

Keyword high-definition CGH, transferred CGH, volume CGH, laser direct plotter, laser lithography

1. はじめに

レーザー直接描画装置を用いて、40 億ピクセルを超える最初の大規模 CGH として The Venus を作成したのは 2009 年であった[1]。この CGH がきっかけとなり、大規模 CGH(高解像度 CGH と呼ぶこともある)を MIT ミュージアムで展示することができ、それによる宣伝効果もあって、文部科学省の助成を得て最新のレーザー直接描画装置を導入し、関大デジタルホロスタジオを設立することができた。

本稿では、このレーザー直接描画装置で作成した 675 億ピクセルに達する最新の CGH, 体積ホログラムへの転写によるフルカラー CGH 作製技術, フローティング型 CGH の作成が期待される多値位相変調型 CGH の技術, さらに 1 ステップで体積ホログラムが作成できる波面プリンタなど, 多種多様な描画・作成技術を紹介する。

2. レーザー直接描画装置

2.1. 描画装置と素材

関大デジタルホロスタジオで運用し、その中枢とも言える描画機器が、「DWL 66+」レーザー直接描

画装置である。ドイツのハイデルベルグ・インストルメンツ社製のこの装置は、微細加工の世界では非常に有名な装置であり、電子線描画装置における電子ビームの代わりに紫外線レーザー¹を用いてドット単位のパターン描画を行う装置である。その意味ではフリンジプリンタと基本的な構造は変わらない。

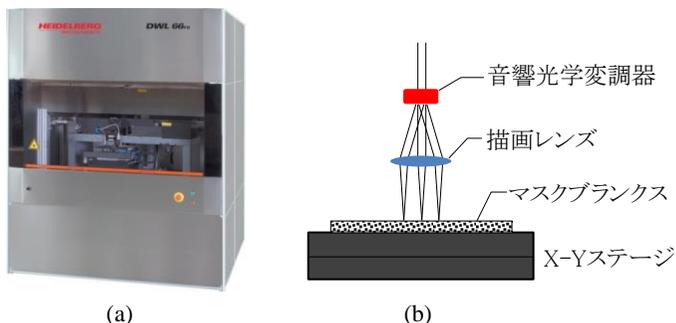


図1 レーザー直接描画装置。(a)外観, (b)描画方法

図1(a)に装置の外観を示す。

レーザー直接描画装置は基本的にフォトマスクを描画するための装置であるが、電子ビームを用いないため内部を真空にする必要がない。また、従来の同種の機器がステージによるスキヤンによってのみパターン描画していたのに対して、DWL 66+では図1(b)

表1 レーザー直接描画装置の仕様[2]

Model	Heidelberg Instruments DWL 66+	
最大描画サイズ [mm ²]	200 × 200	
最小位置決め単位 [nm]	10	
モード(描画レンズ)	Mode I	Mode II
アライメント精度 [nm]	100	120
最小描画ピクセル [μm]	0.6	0.8
描画速度 [mm ² /min]	4.0	16

に示すように AOM によるビーム偏向を用いて副スキヤンを行っており、大きな面積を高速で描画できる特徴がある。そのため、ホログラムの描画に向けた装置となっている。メーカーが保証している仕様を表1に示す。これによれば、最小描画ピクセルは0.6 μm であるが、実際にはもっと小さなピクセルを指定しても動作し、後述のように仕様以上の高精細なホログラム干渉縞を実際に描画することができる。なお、位置合わせ精度の方は、内蔵されたレーザー干渉計によって保持されている。

レーザー直接描画装置は基本的にフォトマスクを作成する装置であるため、描画する素材はマスクブランクスという名称で販売されているフォトマスク素材である。これはガラス基板上にクロム膜とフォトレジストを成膜したものであり、それぞれの膜厚は発注時に指定する。透過型のCGHを描画する際にはクロム膜無しでフォトレジストのみを塗布したマスクブランクスを用いる。なお、剥離防止等の目的でクロムとフォトレジスト以外の層を成膜している場合もある。

2.2. バイナリ振幅/位相変調型 CGH

数値的に合成したCGH干渉縞パターンを描画した後、化学的な現像処理を行うことにより、不要な部分のレジストが除去されレジストのパターンとして干渉縞が描画される。我々はポジ型のレジストを用いているため、レーザーを照射した部分のレジストが除去される。振幅変調型を描画する際には、さらに、エッチング液を用いてクロム膜をウェットエッチングすることにより、レジストのパターンがクロム膜に転写される。この様に、クロム膜の有無による干渉縞パターンとなるため、本装置で描画したCGHはバ

¹ 設置当初は355 nmの正に紫外線であったが、その後システムを改修し、現行では405 nmのレーザーダイオードを光源として用いているため、正確には可視と紫外の境界ぐらいである。



図2 大規模なバイナリ振幅型CGH「Sailing Warship II」

イナリ振幅変調型となる。また、ガラス基板上に成膜されたクロム膜は高い反射率を持つため、このようにして作成したCGHは2次元干渉縞のいわゆる「薄い」ホログラムであるにも関わらず、反射型のホログラムとして再生できる。また、当然ながら透過照明でも再生できる。

バイナリ位相型CGHを作成する場合は、クロム膜除去のエッチング工程を行わない。この場合は、レジストの厚さで生じる表面レリーフ構造によって位相変調が生じる。初めからクロム膜を成膜していないマスクブランクを用いると、バイナリ位相変調型の透過再生CGHを作成することもでき

る。なお、このバイナリ位相型の場合、レジスト膜厚によって位相変調深度が変わるが、特に特定の膜厚にせずとも十分な位相変調がかかりCGHが再生する。

図2にこの手法で作成した最新の大規模CGHであるSailing Warship IIの光学再生像を示し、その3Dシーンを図3に、またパラメータを表2に示す。このCGHでは、垂直方向のピクセルピッチを波長以下の400 nmとしている。これはレーザー直接描画装置のスペックを超えた値であるが、十分に明るい再生像が得られている。なお、水平方向ではなく垂直方向のピクセルピッチを細かくしている理由は、再生照明光の入射角を大きくとるためである。従来作成していた800 nm程度の画素ピッチの

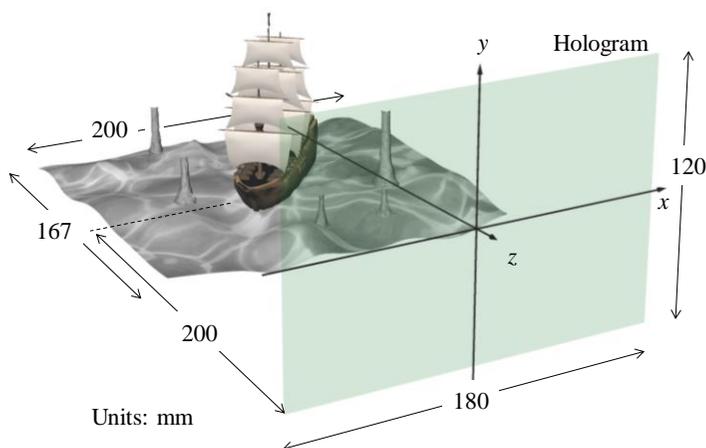


図3 Sailing Warship IIの3Dシーン

表2 Sailing Warship IIのパラメータ

ピクセル数	675億画素 (225,000 × 300,000)
ピクセルピッチ [μm]	0.8 × 0.4
サイズ [cm]	18 × 12
設計波長 [nm]	633
物体光波サンプリング間隔[μm]	0.8 × 0.8

CGH では、再生照明光の中心入射角を 8 度程度にしかできず、ホログラムの正面に光源を配置する必要があった。またその結果、0 次非回折光が視野に入るためどうしても見づらい再生像となっていた。それに対して、この CGH では 30 度以上の中心入射角で再生

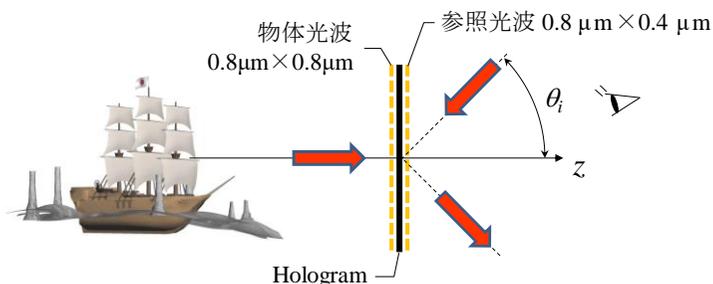


図 4 Sailing Warship II における干渉縞の合成方法

生できるため、図 1 からわかるように、ほとんど壁掛けの光学ホログラム(アナログホログラム)のように見ることができる。また、非回折光は全く視野に入らず、共役像もほぼ見えない CGH となっている。

一般に干渉縞のピクセルピッチと物体光波のサンプリング間隔は同じであり、これを小さくすると計算時間が極端に長くなる。そのため、Sailing Warship II では、実は、物体光波の計算は従来と同じ $0.8 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ で行っている。これは、上述の再生照明光入射角の問題が干渉縞の問題であるためである。高い干渉縞周波数は、参照光との干渉時に発生する。そこで、この CGH では、図 4 に示す通り、 $0.8 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ で計算したホログラム面上の物体光波を数値干渉前にオーバーサンプリングし、 $0.8 \mu\text{m} \times 0.4 \mu\text{m}$ に変換している。この時、補間方法としてバイキュービック法を用いている。この物体光波と参照球面波をサンプリング間隔 $0.8 \mu\text{m} \times 0.4 \mu\text{m}$ で数値干渉することにより干渉縞を発生している。

なお、この手法で作成した CGH は、従来の画素ピッチの CGH に比べて色収差の影響を強く受ける。そのため、再生照明光源として従来の LED を用いると鑑賞に堪えないほどのボケが生じる。これは、ピクセルピッチが波長以下となっているためではないかと考えられる。ボケを防ぐためには光源としてレーザー光源が必要である。そのため、図 1 の再生像では、LD 光源を内蔵したソニー製の超短焦点プロジェクタを再生照明光源として用いている。

2.3. カラーフィルタ方式フルカラーCGH

図 5(a)にカラーフィルタ方式フルカラーCGHの原理を、また(b)にその再生像例を示す。すでに報告しているとおり[3,4]、カラー液晶パネルと基本的に同じ構造のカラーフィルタをレーザー直接描画装置で描画した干渉縞と貼り合わせることで、フルカラーCGHを作成することができる。この時の干渉縞の作成方法は、RGB カラーフィルタに合わせてブロック分割して対応する波長で計算することと、位置



図 5 カラーフィルタ方式フルカラーCGH [3]. (a) 原理, (b)再生像

合わせ許容度を上げるためにガードギャップ[3]を設けること以外、基本的にモノクロの場合と同じである。

この手法では、顕微鏡を見ながら手作業で RGB カラーフィルタを位置合わせしているため、慣れた作業者でも貼り合わせに数十分程度の作業時間が必要である。また、RGB カラーフィルタの透過特性が広帯域であるため、像にボケが生じる問題がある。さらに、干渉縞を空間分割しているため、それによる像の劣化も生じる。

2.4. 多値位相変調型 CGH

位相変調型 CGH には、光の回折効率が高い特長がある。しかし、それを上回る長所として、共役像が生じない点がある。ホログラム面より像が飛び出すフローティング型 CGH を作成する際に最も大きな問題になるのが共役像である。大きく飛び出させれば共役像は目立たないが、そのような CGH を実際に作ってみると、像に焦点を合わせるのが難しく、見づらいものとなる。そのため、像がわずかに飛び出しホログラムの前後に物体が存在するかのような CGH が好ましい。しかし、振幅変調型でこのような CGH を作成すると、共役像が発生してそれが真の像と重なるため非常に見づらいホログラムとなる。位相変調型ではこのような問題は生じない。

この様に位相変調型 CGH はフローティング型 CGH を作成するために有効な手法と考えられるが、残念なことに、2.2 節で述べたバイナリの位相変調型 CGH はその光学的性質がほぼ振幅型と同じであるため、共役像の発生を防ぐことができない。共役像の発生を防ぐためには、多値の位相変調が必要となる。ここで、レーザー直接描画装置では、露光量を変化することにより、現像後に残るレジスト膜厚を変えることができる。これは、描画しながらレーザー光源をパワー変調することにより実現できる。レジストによる表面レリーフを用いた多値位相変調型 CGH の概念を図 6(b)に示す。

レジストによる多値の表面レリーフを作成するための改修をすでにレーザー直接描画装置に施している。しかし、正確な位相変調のためには、描画・現像のパラメータをかなり調整する必要があり、現在それに取り組んでいる。

3. フルカラー転写 CGH

カラーフィルタ方式のフルカラー CGH では、RGB カラーフィルタを貼り合わせる手間はかかるものの、比較的簡単にフルカラー再生像を得ることができる。しかし、2.3 節で述べたとおり、RGB カラーフィルタの特性が広帯域であるため、像がボケる問題がある。特に深い位置にある像ではボケが顕著になる。また、干渉縞を空間分割することによる劣化も生じる。

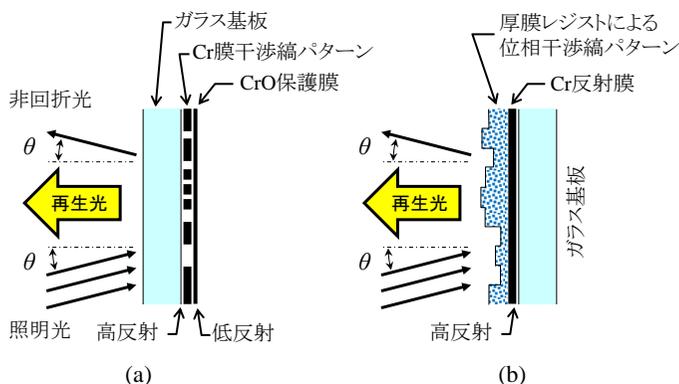


図 6 レーザー直接描画装置で作成する(a)バイナリ振幅変調型 CGH と(b)多値位相変調型 CGH

フィルタのスペクトル帯域の問題は、レーザー直接描画装置で作成した原版CGHをコンタクトコピーにより体積ホログラムに転写することにより大幅に改善することができる。図7にRGBカラーフィ

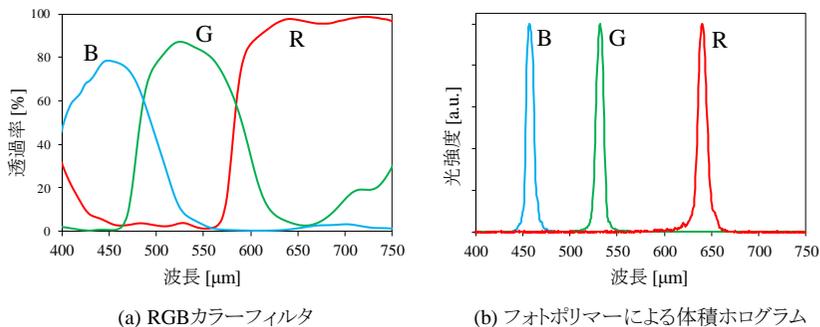


図7 RGB カラーフィルタと体積ホログラムの波長特性の比較

ルタと体積ホログラム(反射型ホログラム)のスペクトルの比較を示す。ここで、体積ホログラムの反射光強度はコベストロ社のフォトポリマーBayfol® HXで作成した体積ホログラムを実測したものである。この結果からわかるとおり、体積ホログラムはRGBカラーフィルタに比べてはるかに狭帯域であり、像品質の大幅な改善が期待できる。

そこで、実際には図8に示すような2種類の方式を研究している。(a)はRGBの原版CGHを3枚用意し、それを個別に転写して重ねる方式である[5,6]。これを積層体積型CGHと呼んでいる。この手法では、位置合わせの手間が必要であるが、カラーフィルタ方式のように干渉縞を分割しないため、高品質な再生像が得られる。実際には、転写の際の用いるガラス基板の厚さや屈折率の違いによりRGBの像にずれが生じるが、これについては原版CGHの計算時に補正する手法をすでに考案している。一方、(b)の方式では、RGBカラーフィルタを用いて転写を行う[7]。そのため、干渉縞の空間分割の問題は解消しないが、転写時には位置合わせの必要がなく、狭帯域化による像の改善とCGHの量産性の大幅な向上が期待できる。

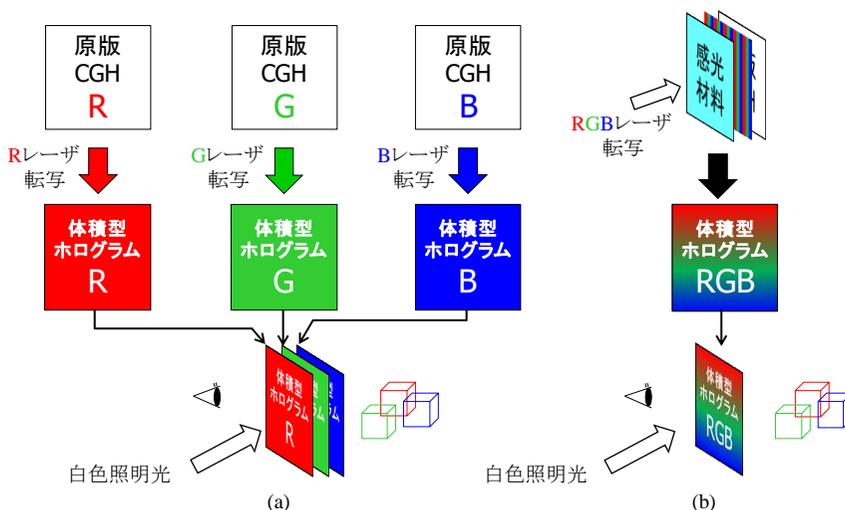


図8 フルカラー転写CGHの2種類の方式[5-7]

4. 波面プリンタ

前節で述べた手法は、レーザー直接描画装置で作成した CGH を体積ホログラムに転写するという 2 ステップの手法である。これに対して、電子的に発生した波面を体積ホログラムに記録する 1 ステップの方式を研究している[8]。我々はこれを波面プリンタと呼んでいる。特に、参照光として記録材料を透過した光で物体光波を発生する方式を考案し、その研究を進めている[9]。我々はこれをデニシュク型光学系と呼んで

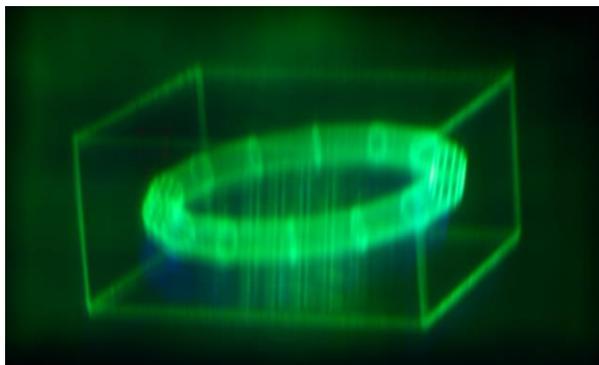


図9 軸外れデニシュク光学系を用いた波面プリンタで描画した体積 CGH の白色光源による光学再生像

いる。この方式では、比較的簡素な光学系で光を分岐することなく描画が行えるため、振動に強く光の利用効率が高い利点がある。デニシュク型光学系の中でも特に軸外れデニシュク型と呼ぶ光学系による波面プリンタを用いて描画した体積 CGH の光学再生像を図9に示す。用いた再生照明光源は白色 LED である。従来の波面プリンタでは展示可能な品質なものは作成できなかったが、この新しい軸外れ光学系を用いたプリンタでは展示可能なレベル CGH が描画できている。

5. まとめ

レーザー直接描画装置を中心に、カラーフィルタを用いる手法やコンタクトコピーを用いる手法、波面プリンタ等、関大デジタルホロスタジオで CGH 作成に用いる複数の手法を紹介した。これらは、すでに展示可能なレベルになっているものから、間もなく展示可能になると期待されているものまで様々な発達段階にある。今後も複数の方法で高解像度 CGH を作成し、その技術を CGH 研究者やアーティストに提供するだけでなく、商業化に向けて企業等と協力していきたいと考えている。

謝辞

SONY の超短焦点プロジェクタがコヒーレント光源として使えることを示唆していただいた東京工業大学後期博士課程の五十嵐俊亮氏に深謝いたします。本研究は、JSPS 科研費 15K00512, 文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成 25 年～平成 29 年), および科学技術振興機構産学連携バリュープログラム VP29117941340 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Matsushima, S. Nakahara, “Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method,” *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [2] 松島恭治, “コンピュータホログラフィ研究と作品制作のためのソフトウェア環境,” *HODIC Circular* **34**, No. 4, 31-38(2014).
- [3] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, “Full-color large-scaled computer-generated holograms using

- RGB color filters,” *Opt. Express* **25**, 2016-2030 (2017).
- [4] 土山泰裕, 松島恭治, “カラーフィルタ方式フルカラー高解像度 CGH とその光学再生像,” *HODIC Circular* **36**, No. 3, pp.11-14 (2016).
- [5] 中尾弘希, 松島恭治, “フルカラー高解像度体積型 CGH の作成,” 3次元画像コンファレンス 2017, P-10, (2017).
- [6] 中尾弘希, 松島恭治, “反射型高解像度 CGH のコンタクトコピーによるフルカラー体積型転写 CGH の作成,” *HODIC Circular* **36**, No. 3, 19-22 (2016).
- [7] 五十嵐勇祐, 松島恭治, “カラーフィルタを用いたフルカラー体積型転写 CGH の作製,” *HODIC Circular* **37**, No. 3, 10-13 (2017).
- [8] W. Nishii, K. Matsushima, “A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms,” *SPIE Proc.* **9006**, 90061F (2014).
- [9] 齋藤智崇, 松島恭治, “デニシユク型光学系を用いた波面プリンタの基礎研究,” 3次元画像コンファレンス 2017, P-3, (2017).