

ホログラフィにおける情報処理技術の活用

金沢大学 理工研究域 助教 遠藤 優

金沢大学の遠藤優と申します。私は千葉大学の伊藤智義教授、下馬場朋禄准教授、角江崇助教の下で学位を取得し、その後、金沢大学に助教として着任いたしました。学生の頃から現在までホログラフィによる映像表示・計測技術に関する研究をしており、特にそこで用いられる情報処理・計算技術に注力しています。

私がホログラフィという技術を知ったのは、研究室配属の際に伊藤研究室へ見学に行つたときです。当時私は電子回路や計算技術に興味があり、伊藤研究室へ見学に行ったのも FPGA を触ってみたいと思っていたからでした。そのためホログラフィによる 3D 映像や顕微鏡を見てもマイチピンと来ず、その周辺に積まれた回路基盤にばかり目がいっていたような気がします。研究室配属後にホログラフィを徐々に学び始めましたが、ホログラフィそのものよりも周辺の計算技術や画像処理に興味がありました。現在もホログラフィ関連の情報処理技術に注力しており、振り返ると興味の根幹はあまり変わっていないように思います。

(1 ページにつづく)

目 次

1. 卷頭言：ホログラフィにおける情報処理技術の活用	遠藤 優 表紙
2. 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, 他 2
3. ホログラフィーとライトフィールドの融合 — 3D ユーザ体験の 高度化に向けたプリント技術からのアプローチ —	山口雅浩 10
4. 電子線描画装置による計算機合成ホログラム	北村 満 18
5. セキュリティ印刷市場におけるホログラムの現状	鎌田康昌 24
6. 2 種類の CGH 用プリンタの開発と種々の CGH の出力例	山口 健, 他 28
7. ホログラムプリンタとスクリーンへの応用	大井隆太朗, 他 35
8. 次回研究会のお知らせ	巻末

ホログラフィによる映像表示の研究に取り組む中で直面するのが、表示デバイス(空間光変調器)の性能の問題です。ホログラフィックディスプレイ(電子ホログラフィ)に要求される表示デバイスの性能は非常に高く、現行の製品ではその要求を満たせていない部分があります。そのため、他の映像表示技術と比べたとき、再生像の品質、大きさ、視野などの点で不十分さを感じることが少なからずあります。映像技術の成果は視覚的にわかりやすいものが多く、素人目にもインパクトのある絵は訴求力が非常に大きいです。またインターネットメディアの普及により、研究成果としてクオリティの高い再生像を発信することは、今後より重要になっていくと感じています。しかし、市場のニーズの観点からも、理想的な表示デバイスの流通はまだ先の話になると予想されます。

このような状況の中で、私は情報処理技術が果たす役割が大きくなってきていると感じています。近年、イメージング関連分野で、光学技術と情報処理の一体設計により、システム全体の性能向上を目指す研究が盛んに行われています。またディスプレイにも同様の考え方方が応用されており、*Computational Display* と呼ばれるような研究成果が報告されています。このようなアプローチはデバイスの性能が限られているホログラフィックディスプレイにも有効だと思っています。またホログラフィの波面変調はそのような情報処理の活用と非常に相性が良いと感じています。例えば、最近注目された研究に、Microsoft Research の “Holographic Near-Eye Displays for Virtual and Augmented Reality” があります。この研究では、市販の表示デバイスによるホログラフィックプロジェクションと、ホログラフィック光学素子を組み合わせて、仮想/拡張現実(VR/AR)用のメガネ型 3D ディスプレイを開発しています。ホログラフィックプロジェクションは 3D 表示だけでなく、波面変調による収差補正・視力補正が可能です。これを活用し、レンズの収差と装着者の視力を計算により補正することで、ホログラフィック光学素子ベースのシンプルな光学系で綺麗な像を映し出すことに成功しています。さらに GPU によるリアルタイム再生も実装しています。このように情報処理技術をフル活用することで、現行の表示デバイスでもインパクトのある絵を作り出せるのではと考えています。

ホログラフィックディスプレイの実用化にはもう少し時間がかかると思います。そのため今後も継続した研究開発が必要です。その際に重要なのが、その将来性を期待させるようなインパクトのある絵だと思います。私はそのような絵作りのために情報処理・計算技術の観点から微力ながら貢献できればと考えております。

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, Orie 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・インスツ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。その意味ではプリンジプリンタと基本的な構造は変わらない。

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ャンによってのみパターン描画していくのに対して、DWL 66+では図 1(b)

に示すように AOM によるビーム偏向を用いて副スキャンを行っており、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い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 $0.6 \mu\text{m}$ 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

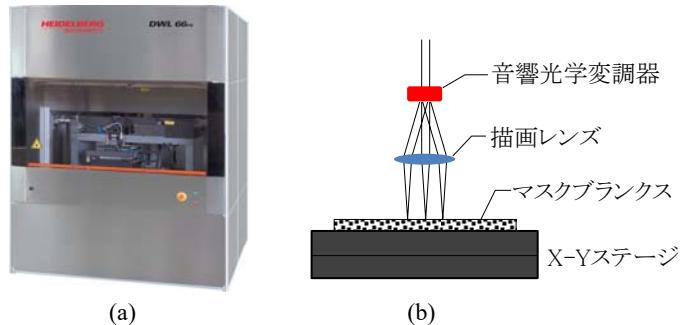


図 1 レーザー直接描画装置。(a)外観, (b)描画方法

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

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プランクを用いると、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と、特に特定の膜厚にせす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

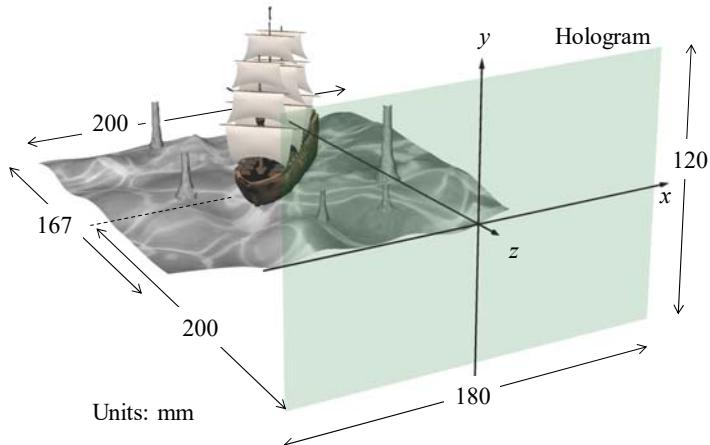


図 3 Sailing Warship II の 3D シーン

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。

それに対応して、この CGH では、30 度以上の中心入射角で再生できるため、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ピ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により、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

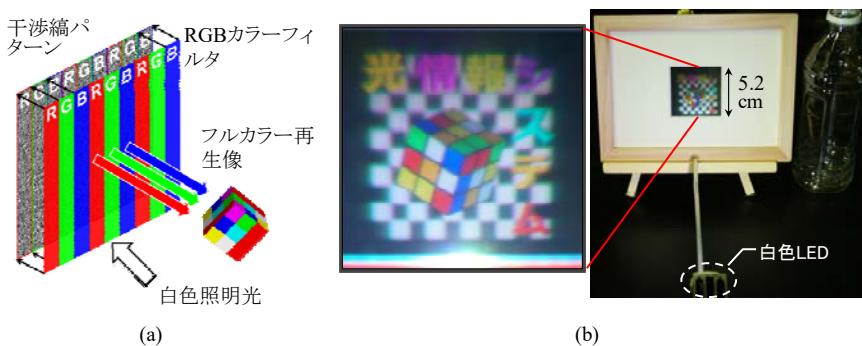


図 5 カラーフィルタ方式フルカラーCGH [3]. (a) 原理, (b) 再生像

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. 多值位相変調型 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。大きく飛び出され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。

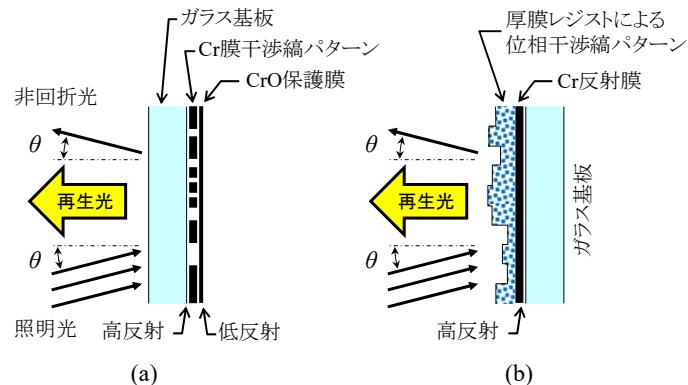


図 6 レーザー直接描画装置で作成する(a)バイナリ振幅変調型 CGH と(b)多値位相変調型 CGH

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 カラーフィルタ

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。

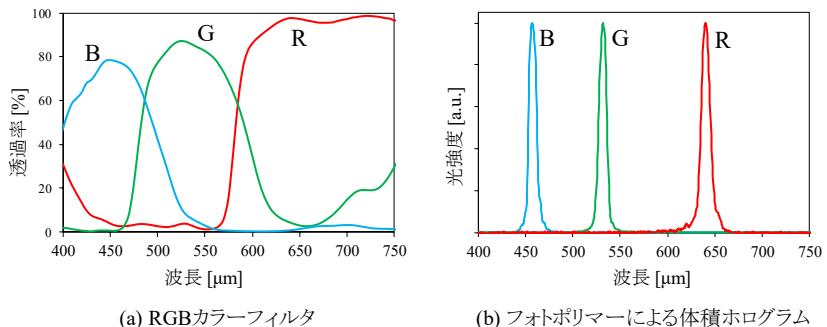


図 7 RGB カラーフィルタと体積ホログラムの波長特性の比較

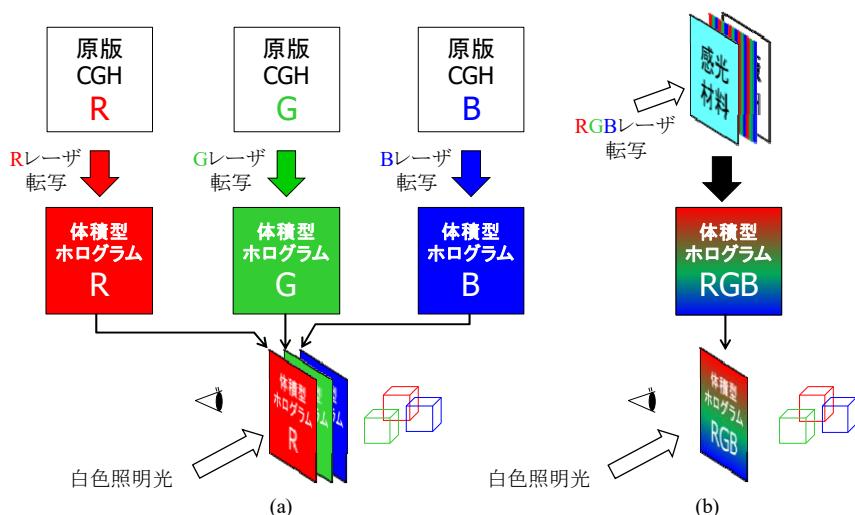


図 8 フルカラー転写 CGH の 2 種類の方式[5-7]

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。

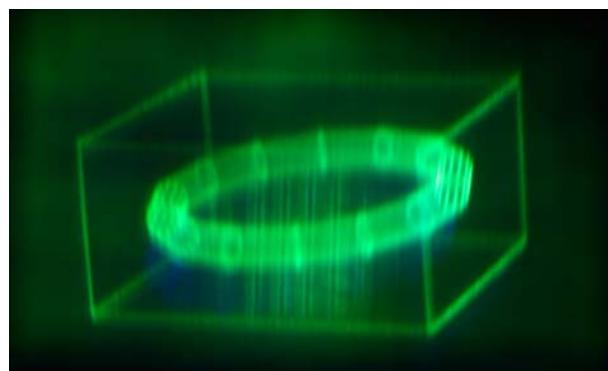


図 9 軸外れデニシュク光学系を用いた波面プリンタ
で描画した体積 CGH の白色光源による光学再
生像

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はなく、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一体積型転写 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一体積型転写 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] 斎藤智崇, 松島恭治, “デニシュク型光学系を用いた波面プリンタの基礎研究,” 3 次元画像コンフレンス 2017, P-3, (2017).

ホログラフィーとライトフィールドの融合

— 3D ユーザ体験の高度化に向けたプリント技術からのアプローチ —

Fusion of holography and light-field

- An approach from printing technology toward enhanced 3D user experience -

山口雅浩

東京工業大学 工学院

Masahiro Yamaguchi

*School of Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

近年、ライトフィールド (LF) ・カメラやライトフィールド・ディスプレイ (LFD) の技術が注目されている。一言でいえば、従来のカメラやディスプレイは2次元の面上での光の強度を記録し表示するのに対して、LF は強度に加えて光の進む方向も記録・再現する技術である。言い換えれば、LF は光線を記録・再現する。一方、ホログラフィーは光を波動として扱い、振幅と位相（もしくは波面）を記録・再現する技術であるが、波の進む方向を考えれば LF を再現する技術の一つと位置付けることもできる。図 1 に光線再生と波面再生の概念図を示す。いずれも 3 次元空間に像をつくり、観察者は眼鏡なしで空間に浮かぶ立体像を見ることができる。これを 3D 表示技術として考えた場合、光の位相情報は目で見ることができないため、光線を再現すれば十分ではないかという疑問が生じる。このような疑問に対し、光線を再現する方式の利点と限界、波面を再現することの意味についてよく考えてみると、これらを適切に組み合わせることで 3D 映像の新たなユーザ体験を生み出す可能性が見えてくる[1]。本稿では、光線再生と波面再生の共通点と相違点を整理するとともに、ホログラフィーの技術に基づいてこれらを融合して実現する 3D ユーザ体験の例を紹介したい。

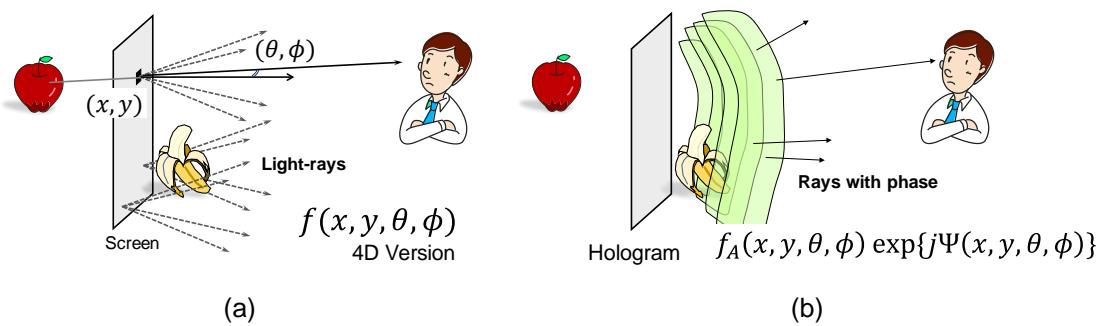


図 1 (a)光線再生と(b)波面再生によるライトフィールド・ディスプレイ。

2. ホログラフィック・3D プリンタとホログラフィック・ステレオグラム

筆者らは、図 1 (a) のように光線を再生するディスプレイをホログラムとして自動的にプリントする技術を 1990 年に発表した[2]。このホログラフィック 3D プリンタは、

- ① 水平・垂直方向に視差を持つ（全方向視差）立体像を、
- ② 白色光による照明で再生
- ③ 自動的に記録

を可能とするため考案された方式であり、反射体積型ホログラムによる波長選択性を利用し、液晶パネルなどの空間光変調器（SLM）を用いて光線情報をホログラムに記録する。ホログラム面（図 2 (a) のスクリーン面）上に小さなホログラム（これを要素ホログラムと呼ぶ）を多数並べて記録するので、要素ホログラムの間隔でスクリーン面での解像度が決まる。SLM に表示する画像は、ホログラム面上の 1 点を通過する光線情報であり [図 2 (a)]、この光線の角度方向の光線数が視差の方向数に対応する。図 3 に記録光学系、図 4 に再生像の例を示す。

この原理はインテグラルフォトグラフィー (IP) と同じであり、筆者らはこれを全方向視差ホログラフィック・ステレオグラム (Full-parallax holographic stereogram: FPHS) と呼んできたが、誤解を招く側面もある。HS は基本的に図 2 (b) のような考え方に基づいていて、視点位置にカメラを置いて撮影した多数の 2 次元画像を記録、再生する[3]。これにより左右の目で異なる 2 次元画像を観察し、立体像が知覚できる。スクリーン面をホログラム面と一致させるため、2 段階の記録方式が用いられていた。この方式では、視点位置でのサンプリングが粗くても、スクリーン上で高精細な画像を観察できるという特徴がある。サンプリングが細かければ両者の違いは無くなる。なお、図 2 (b) で視点位置を無限遠に設定すれば (a) に一致する。

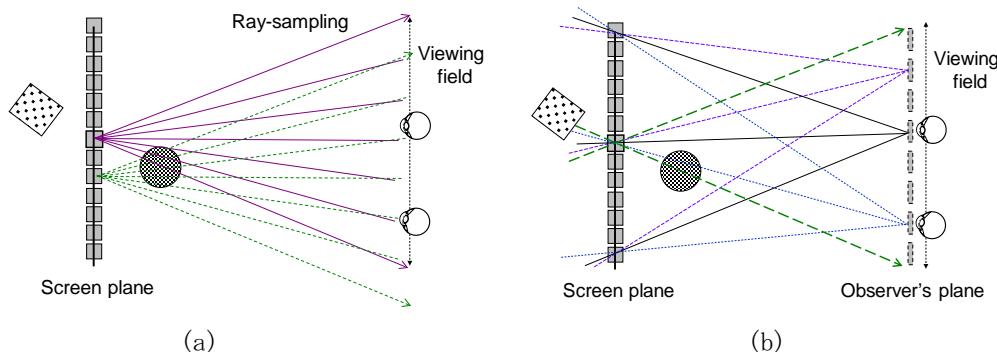


図 2 (a) ホログラフィック・3D プリンタ（スクリーン面と光線方向に対するサンプリング）と (b) 2 ステップ HS（スクリーンと視点位置に対するサンプリング）

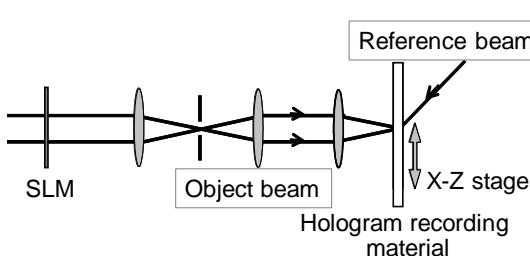


図 3 ホログラフィック・3D プリンタ記録光学系

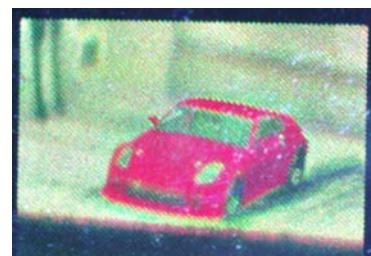


図 4 ホログラフィック・3D プリンタにより記録したホログラムの例

ホログラフィック 3D プリンタでは、光線情報のコンピュータ処理により、1段階の記録でホログラム面を任意の位置に配置できる。視点位置の概念は無く、空間に実像または虚像が再現され、視域内の任意の位置で歪みのない立体像を観察できる。言い換えれば、図 2 (a) は光線に基づく像再生による立体像表示、(b) は多視点の立体視による立体像表示といえる。

3. 計算機合成ホログラム (CGH) への応用

CGH はホログラムの干渉縞をコンピュータで計算し、出力（表示）する方式であるが、その計算に HS の原理を用いることが 1974 年に提案された[4]。これは水平方向の視差のみ (Horizontal-parallax-only: HPO) を表示する方式で、また図 2 (b) に示すような多視点による立体像表示である。これに対して、図 2 (a) の方式は光線を再現するので、サンプリングを細かくしていくば限りなく波面再生方式に近づくのではないかとも考えられる。

これに対する考察と、その考察に基づいて提案した CGH 計算方法を 4. 3 節に述べる。また、光線に基づく計算で、波面再生によるホログラムの利点を生かす方法として提案したもののが 5 章に述べる「光線サンプリング面 (RS 面)」を用いた CGH 計算技術である。

4. ライトフィールド表示とホログラフィーの関係についての諸問題

4. 1 結像位置に関する問題

筆者がホログラフィック・3D プリンタの研究を始める前には、液晶パネルを用いた円筒型マルチプレックス・ホログラム (MH) の記録を試みていた（それまでは映画カメラで撮影したフィルムが用いられていた）[5]。MH は HPO であるが、円筒の中央部に 360° 方向から観察可能な立体像を再生する。記録光学系では、SLM により表示される原画を円筒の中央付近に結像させ、垂直方向に長いスリット状の物体光をホログラムに記録する。観察者の目の焦点は再生像に合い、細いスリットから原画の数ミリの範囲を見ることができる。このとき目の焦点位置と原画の結像位置が概ね一致する。そして像面の解像度はスリット間隔より細かく、原画の解像度とほぼ等しい。再生像と原画の結像位置が異なる場合、回折の影響により分解能が低下する。

図 2 (a) のタイプの LFD の場合、スクリーン面の前後に像を再生させる場合が多いので、原画 (SLM) をスクリーン面に結像させればよいとも考えられるが、スクリーン面はレンズの焦点面に対応するため、SLM の結像面をスクリーン面と一致させることはできない。これについて回折理論を基に検討した結果、SLM の結像面とレンズの焦点面の 2か所で回折の影響による分解能低下が無くなることが分かった[6]。さらに、SLM を無限遠に結像すると焦点面から離れたときの回折の影響が少ない（すなわち被写界深度が広い）ことも示された。このことから、スクリーン面の前後に像を再生する場合

は、原画を無限遠に結像させるのがよい。再生像位置がスクリーン面から離れた一定範囲の場合には、再生像位置近傍に結像させるのが良い。なお同様の検討は IPにおいても行われており、それぞれ「奥行き優先」「解像度優先」のインテグラルイメージングともいわれている[7]。

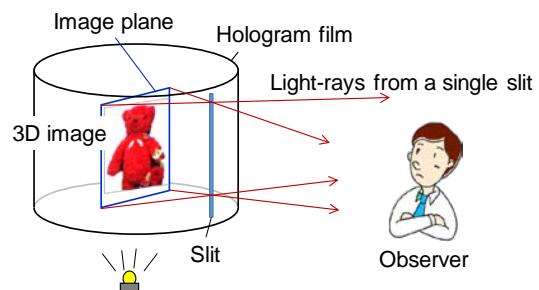


図 5 マルチプレックス・ホログラム

4. 2 白色光再生に関する問題について

ホログラムを用いた立体像表示では、再生に用いる光源のサイズとスペクトルの広がりが問題になる。ホロ・プリンターでは白色光での再生を可能とするため反射体積型（リップマンホログラム）として記録しているが、それでも再生光の波長には一定のスペクトル幅がある。スペクトルに幅があると、波長分散の影響により再生像にボケを生じる。ボケの大きさはホログラム面からの距離に比例して大きくなるので、奥行きの深い立体像を再生することはできない。奥行きの深い立体像再生のためには、レーザー光などスペクトル幅の狭い光源で再生する必要があるが、4. 5節に述べるようなスペックルの問題が生じる。なお、回折による波長分散を補正して照明する方式も提案されており、完全ではないがボケの低減には有効である[8]。

4. 3 位相情報の意味

光線再生と波面再生の違いは位相情報の有無である。しかし人間は位相情報を直接知覚することはできない。ではホログラムの位相情報にはどのような意味があるのだろうか。

筆者らは、波面を再生するホログラムと光線を再生する HS での再生波面の違いを考察した。その結果、ホログラムによって再生される波面の位相は、①光線の進む方向を決める 1 次の成分、②ホログラム面上の狭い領域での 2 次の位相成分、③ホログラム面上の離れた位置での相対的な 2 次の位相差成分、に分離して考えることができることを示した[6]。HS にはこのうち①のみが記録されている。②は光線の結像位置を制御する成分であり、③は FP-HS において異なる要素ホログラムから再生される光線の位相を像の位置において整合させる成分と考えることができる。実際には図 6 に示すように、再生像上のある点に注目するとき、目の瞳に入射する光線のみが再生像の分解能に寄与するので、ホログラム面上の数ミリの範囲の要素ホログラムから再生される光線の位相が整合していればよい。

筆者らは、光線に基づき計算できる①と③を記録する方式として位相を付加したステレオグラム (PAS) を提案した[9]。PAS はホログラムと HS の中間的な性質をもつもので、その後、これを改善した手法が提案され、特に CGH 計算に応用されている。

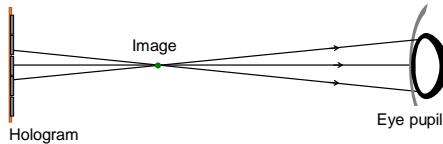


図 6 異なる要素ホログラムから瞳に入射する光線

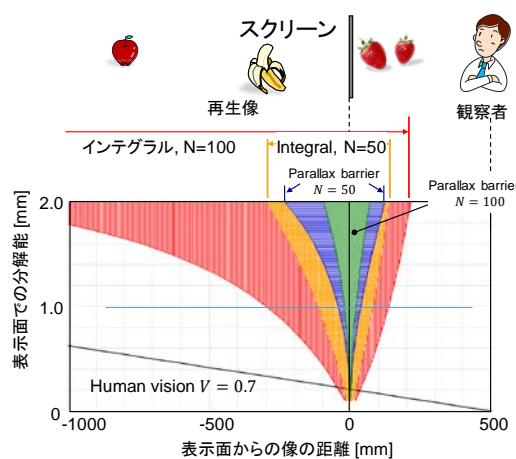


図 7 光線再生による LFD により表示可能な奥行き範囲

4. 4 回折による像のボケの問題

前述のように光線再生に基づく LFD では、立体像の再生位置と結像位置が異なると回折によるボケを生じる。ボケの程度は拡散板（計算ホログラフィーではランダム位相）を使うかどうかによって異なるが、基本的には図 2 (a) のタイプの LFD ではスクリーン面からの距離に比例して分解能が低下する。波面再生の場合にはそのようなボケは生じない。

回折による分解能の低下は光線のサンプリングとも密接に関係する。スクリーン面での交戦のサンプリングを密にすると、スクリーン面から離れた位置での回折の影響が大きくなる。このため、光線に基づく LFD では一定の分解能を保って表示できる奥行き範囲が制約される。

図 7 に立体像の奥行き範囲と再生像の分解能の関係を示す[3]。スクリーン面での分解能を例えば 0.2mm とすると、同等な分解能で表示可能な奥行きの範囲は±数 cm となってしまう。表示面での分解能を 1mm～2mm とすると数十 cm の奥行きの表示が可能である。したがって大画面で低解像度の LFD であれば光線再生でも十分であるが、高精細で奥行きの深い立体像を再生するには波面再生（すなわちホログラフィー）の技術を用いる必要があるといえる。

4. 5 干渉性とスペックルの問題

波面再生の方式は干渉現象を利用して分解能の高い立体像を再生する。また、スペクトル帯域幅の広い光源で証明すると波長分散の影響で奥行きの深い立体像を再現することが難しい。一方、レーザー光のような干渉性の高い光源を用いると、スペックルが発生し、再生像の品質に深刻な問題を生じる。電子ホログラフィーの場合には、時分割で表示することにより隣接する像の間での干渉性を排除することが提案されているが、ハードコピーの場合には時分割表示ができないため、他の方法を用いることが必要になる。筆者らは複数のレーザー光源を用い、再生像の分解能を少し犠牲にしつつスペックルを低減する手法を提案した[10]。再生像の分解能とスペックル低減はトレードオフの関係にあり、バランスをとる必要があるが、分解能低下を最小限にしつつスペックルを抑制する方法は今後の重要な課題の一つと言える。

5. 新たな 3D ユーザ体験に向けて

5. 1 深い空間のリアルな再現

ここまで考察から、ホログラフィーによる波面再生の意義は、奥行きの深い立体像を高い分解能で表示できる点にあるといえる。従来の 3D 表示は多くの場合、両眼視差により奥行き知覚の要因を満たすことを主に考えられているが、目の疲労の問題もある。LFD は右目と左目による立体視という概念を超えて、3 次元空間を再現する方式であり、波面再生は深い奥行きをもつ空間を再現可能な方式として他に例を見ない技術と言える。将来の（究極の）3D ディスプレイとして、従来の両眼視差をベースとした 3D とは全く異なる「空間再現」を考えることが一つの方向性として重要と考えられる。

では空間を再現するディスプレイは、ユーザにとってどのようなインパクトがあるのだろうか。電子的なディスプレイでホログラムを表示できれば、このような疑問に対する検討も可能であるが、現状の電子ディスプレイデバイスはホログラム表示に必要な解像度にはるかに及ばないため、ホログラフィック・ディスプレイの真のインパクトが明らかになっていないと思われる。そこで筆者らは、ハードコピーによるホログラムを用いて上記疑問に対しての検討を行っている。究極の 3D としてのインパクトが明らかになれば、デバイス開発に向けた投資が一層

進みやすくなると考え、ハードコピーによるホログラムの研究を行っている。

真にリアリティーの高い立体像（もしくは3次元空間）を再現するようなホログラムを計算によって生成するには、様々な課題があるが、一つは「リアリティーの高い立体像」であり、もう一つは「計算量」である。計算時間に関しては、計算ハードウェアの進歩により早晚解決されるという考え方もあるが、現時点ではリアリティーの高い立体像を再生するホログラムを計算するためには、計算時間が数か月以上になるという試算もあり、上記研究を進める上で計算量の削減は避けて通れない。またリアリティーの高い立体像を表示するためには、波面に基づく画像生成技術を確立する必要がある。一方、コンピュータグラフィックス（CG）の分野に目を向けると、実写と見分けがつかないようなリアリティーの高い映像生成が可能になっている。波面に基づいてリアリティーの高い映像生成を行う手法も提案されているが、CGの様々な技法には及ばない。

そこで筆者らは、光線再生によるLFDの考え方を応用し、CGの技法を用いて光線に基づく映像を生成し、これを波面に変換することでホログラムを計算する手法を提案している。このとき、光線に基づく方式ではスクリーン面から離れると分解能が低下するためホログラフィーのメリットである奥行きが深く分解能の高い立体像再生が行えない。提案するホログラム計算方式では、再生像の奥行きの近くに光線サンプリング面（Ray-sampling plane: RS面）を仮想的に定義し、光線をRS面でサンプリングする[11]。RS面とホログラム面が離れている場合には、RS面からホログラム面までは光の波面伝搬の計算を行う。奥行きの深い立体像を再生する場合には、それぞれの奥行きにRS面を定義し、それぞれ光線一波面変換を行うことで対応する。

さらに、提案したRS面によるホログラム計算法の計算量を削減するために、ホログラム生成に不必要的光線をあらかじめ排除して計算する方法を提案した[12]。この場合には、光線に基づいて様々な角度での平行投影像（Orthographic Projection）を生成するが、ホログラム面に入射する光線に限定することで無駄な計算を省略する。さらにこの方法は並列計算に適しており、平行投影像をあらかじめ分類して計算することで、並列計算の各プロセスが独立に動作してホログラム面での波面を求めることが可能である。この方式（Orthographic RS plane: ORS面）で計算することで、波面に基づく方式では難しい映像表現を可能とした[12]。例えば、ガラスやダイヤモンドのような光沢の表現、透明物体による光の屈折などが挙げられる。図8にORS面を用いて計算したホログラムの再生像の例を示す（ホログラムの出力は関大デジタルホロスタジオとの共同研究により行った）。現在は再生像の大きさが10～20cmであるが、今後は等身大の人間（の一部）の再生なども行いたいと考えている。

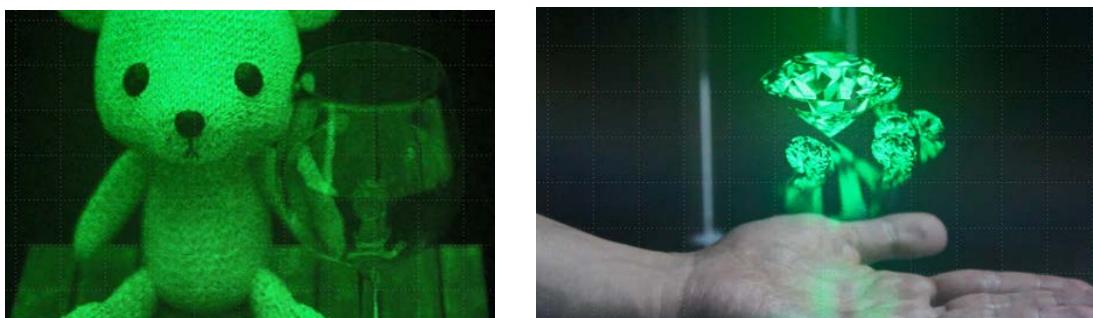


図8 ORS面を用いた方法によるCGH再生像の例。（右は石井勢津子博士の指導による図案）

5. 2 インタラクティブ3Dタッチ

前節の研究は究極の3Dを目指したものであるが、今ホログラムに期待されていることの一つは、空中に浮かぶ立体像に触れるようなインタラクティブな3Dユーザインターフェースではないかと考えられる。そこで、ホログラムは光線再生のための光学素子(Holographic Optical Element: HOE)として利用[14]し、映像自体はプロジェクターで投影する方式の検討も行っている。図9にそのような方式のホログラフィックLFDの概念図を示す。HOEは2章(図3)の方式でSLMを用いずに記録し、一つの要素ホログラムが小さな凸面鏡の役割を持つ。プロジェクターから投影された画像はHOEによるホログラフィックスクリーンで光線情報に変換される。

この方式ではプロジェクターによる投影像とスクリーンの位置合わせが重要である。位置合わせを簡易に行うために、テストパターンを投影してそれをカメラで撮影することで、スクリーン面上の座標とプロジェクター投影像の座標の相対関係を取得し、これによって投影画像を逆に歪ませることによって自動位置合わせを実現する[15]。

インタラクティブな3Dタッチには、いわゆるジェスチャー入力が必要である。ただし従来のジェスチャー認識に基づくユーザインターフェースでは、ジェスチャーの空間と映像の空間は独立である。3Dタッチの場合は立体像と直接的にインタラクションすることにより、直感的で容易に扱えるユーザインターフェースを実現できる。このとき、3D映像とジェスチャーの正確な位置合わせが重要になる。

筆者らは、3Dタッチに適した簡易的なジェスチャー入力的方式として、LFDで再生された実像に触ったときに指先に当たっている光の色を検出することでユーザの操作を識別する方法を提案している[16]。LFDでは実像の位置に光が集まっているので、実像にタッチすると指先で像の色の光が散乱される。図9に示すように、ホログラフィックスクリーン背面においてカラーカメラで指先の色を検出し、これをユーザインターフェースに用いる。

ホログラフィックスクリーンは透明であるため、従来の2次元のディスプレイの前面に貼り付けて、コンテンツ表示は2次元、ユーザインターフェースは3Dといったデジタルサイネージやキオスク端末などへの応用に適している。スクリーンにタッチする必要が無いため、手が汚れないまたはスクリーンが汚れない、また3D表示による誘目効果などの特徴を生かす応用が期待される。

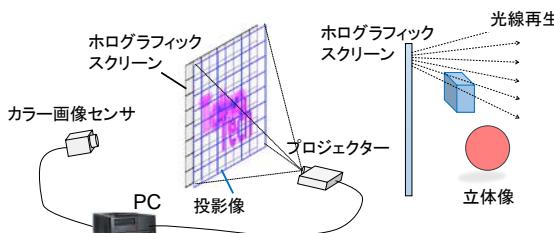


図9 ホログラフィックスクリーンを用いた3Dタッチディスプレイ

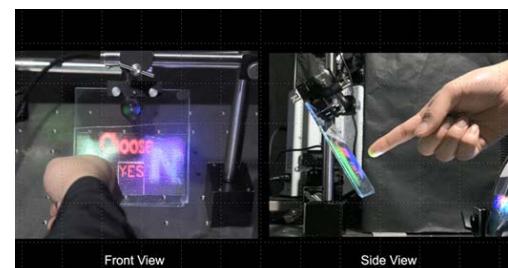


図10 3Dタッチの様子

6 おわりに

本稿では、LFDにおいて、光線再生による方式の限界と波面再生の特徴について述べ、光線再生は比較的大型のディスプレイに適しており、波面再生は奥行きの深い高分解能な表示に適

していることを示した。また、将来の3D映像では可能になる新たなユーザ体験の例として、CGHによる深い奥行きで極めて高いリアリティーのある立体像再生について紹介した。さらに空間に再現された3D映像とのインタラクションを可能とする簡易的な方式を紹介した。将来的立体像表示は、両眼視差をベースとした立体視から、3次元空間を再現する方に進展することが期待される。CGHではカラー化、再生像の大型化など、3Dタッチではリアルタイムでのライトフィールド計算を可能とする手法などが課題である。

謝辞

フォトポリマーの提供を頂いたCovestro Deutschland AGに謝意を表する。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(15K04691)の助成の下に行われた。CGHプリントに関して協力いただいた関西大学松島恭治教授、美術家石井勢津子博士に感謝する。本発表は、東京工業大学山口雅浩研究室の中村友哉助教、博士後期課程学生の五十嵐俊亮氏、元学生の東田涼氏、桜井爽馬氏との共同研究成果を含んでいる。

参考文献

- [1] M. Yamaguchi, "Full-Parallax Holographic Light-Field 3-D Displays and Interactive 3-D Touch," Proc. IEEE, Vol. 105, No.5, 947-959 (2017).
- [2] M. Yamaguchi, T. Honda, N. Ohyama, "Holographic 3-D printer," Proc. SPIE, Vol. 1212, 84-92 (1990).
- [3] M. Yamaguchi, "Light-field and holographic three-dimensional displays," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 33, No. 12, 2348-2364 (2016).
- [4] T. Yatagai, "Three-dimensional displays using computer-generated holograms," Opt. Commun. Vol. 12, 43-45 (1974).
- [5] T. Honda, M. Yamaguchi, D.-K. Kang, K. Shimura, J. Tsujuchi, N. Ohyama, "Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV," Proc. SPIE, Vol. 1051, 186-191 (1989).
- [6] 山口、本田、大山、"ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生特性に関する考察",光学, Vol. 22, No. 11, 714-720 (1993)
- [7] J. S. Jang, F. Jin, and B. Javidi, "Three-dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image fields," Opt. Lett. Vol. 28, 1421-1423 (2003).
- [8] A. Klein, "Dispersion compensation for reflection holography," M. Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, (1996).
- [9] M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda, N. Ohyama, "Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique," Proc. SPIE, Vol. 1914, 25-31 (1993).
- [10] T. Utsugi and M. Yamaguchi, "Speckle-suppression in hologram calculation using ray-sampling plane," Opt. Express, Vol. 22, No. 14, 17193-17206 (2014).
- [11] K. Wakunami and M. Yamaguchi, "Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane," Opt. Express, Vol. 19, No. 10, 9086-9101 (2011).
- [12] S. Igarashi, T. Nakamura, and M. Yamaguchi, "Fast method of calculating a photorealistic hologram based on orthographic ray-wavefront conversion," Opt. Lett. Vol. 41, No. 7, 1396-1399 (2016).
- [13] S. Igarashi, T. Nakamura, K. Matsushima, M. Yamaguchi, "Efficient calculation method for realistic deep 3D scene hologram using orthographic projection", Proc. SPIE, Vol. 9771, 97710O (2016).
- [14] M. Yamaguchi, T. Koyama, N. Ohyama, and T. Honda, "A stereographic display using reflection holographic screen," Optical Review, Vol. 1, No. 2, 191-194 (1994).
- [15] R. Higashida and M. Yamaguchi, "Automatic geometric calibration in full-parallax 3 display using holographic screen," Proc. IDW'14, 3Dp1-3 (2014)
- [16] M. Yamaguchi and R. Higashida, "3D touchable holographic light-field display," Appl. Opt. Vol. 55, No. 3, A178-A183 (2016).

電子線描画装置による計算機合成ホログラム

北村 満

大日本印刷株式会社 研究開発センター

〒277-0871 千葉県柏市若柴 250-1

E-mail: Kitamura-M@mail.dnp.co.jp

あらまし 高解像度の電子線描画装置を用い、日常の照明光下でも見やすく階調性の豊かな3次元像を再生する計算機合成ホログラムを作製した。イメージ型ホログラムとすることで視認性を高め、電子線描画装置により干渉縞を疑似階調記録することで階調性を高めた。

キーワード 計算機合成ホログラム、電子線描画装置、イメージ型ホログラム、階調

Computer-Generated Holograms with Electron Beam Lithography System

Mitsuru Kitamura

Research & Development Center, Dai Nippon Printing Co., Ltd.

250-1, Wakashiba, Kashiwa-shi, Chiba, 277-0871 Japan

E-mail: Kitamura-M@mail.dnp.co.jp

Abstract: A computer-generated hologram which reproduces a three-dimensional image rich in gradation under ordinary room light was fabricated with a high-resolution electron beam lithography system. The visibility of the reconstructed image was improved by using image type hologram method. The gradation of the reconstructed image was improved by recording the interference fringe with pseudo gradation recording method.

Keywords: Computer-Generated Holograms, Electron Beam Lithography System, Image Holograms, Gradation

1. はじめに

計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Holograms)は、レーザー光の干渉により光学的に作製するホログラムを、計算機シミュレーションによりデジタル的に作製したホログラムである。CGHで記録すべき干渉パターンは光の波長程度の細かさであり、通常の印刷方法での作製は難しい。CGHの作製方法としては、写真縮小による方法、印刷製版用のイメージセッターを用いる方法、LCoSやDMDなどの空

間光変調器に表示したパターンを縮小露光する方法^[1]、レーザー直接描画装置を用いる方法^[2]などがあるが、記録できるパターンの解像度という観点で、電子線(EB: Electron Beam)描画装置を用いる方法は最高峰に位置付けられている。

本稿では、EB描画装置を用いることで、細かな干渉パターンの記録ができるだけでなく、より見やすく、階調性の豊かなCGHの作製を試

みたため報告する。

2. 干渉パターンの記録解像度と回折角

CGH の作製に高解像度の記録装置が必要とされる主な理由は、観察に十分な視域を得るために考えられている。格子間隔 d [nm] の回折格子に対し、法線方向から波長 λ [nm] の光を入射した場合の 1 次回折光の回折角を θ [rad] とするとき、式(1)の関係がある。

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (1)$$

例えば、波長 633nm の光で 20 度の回折角を得たい場合、式(1)により格子間隔 d は 1850nm となる。この時、画素ピッチ 925nm の記録ができれば所望の回折角が得られる。レーザー直接描画装置による作製方法^[2]では画素ピッチ 800nm を用いているため、回折角 20 度を得るのに十分な解像度を有している。EB 描画装置を用いた場合、ハーフピッチ 20nm 程度のパターンを記録することができる。これは、回折格子の任意の方向から入射した可視光を任意の方向に回折させることで十分な解像度であり、回折角という観点ではオーバースペックな解像度である。

本稿では、EB 描画装置による高解像度記録を、単に広い観察角を得るためにではなく、より「見やすく」「階調性の豊かな」CGH を実現するために活用することを考える。

3. イメージ型ホログラムの階調再現性

ホログラムの再生照明光として、レーザー光や LED 光を用いれば、奥行きが深く、高解像度・高階調性の、実物と見紛うばかりの三次元像を再生可能である。一方、ホログラムを日常の環境で観察する場合、電球型や直管型の照明を再生照明光として用いることが多い。この場合、ホログラムに対して様々な角度から様々な波長の光が入射するため、奥行きが深い像はぼけて観察されることになる。電球型や直管型の照明を再生照明光として用いた場合にも再生像のぼけを低減するには、再生像がホログラム面の近傍に形成されるイメージ型ホログラムとすることが

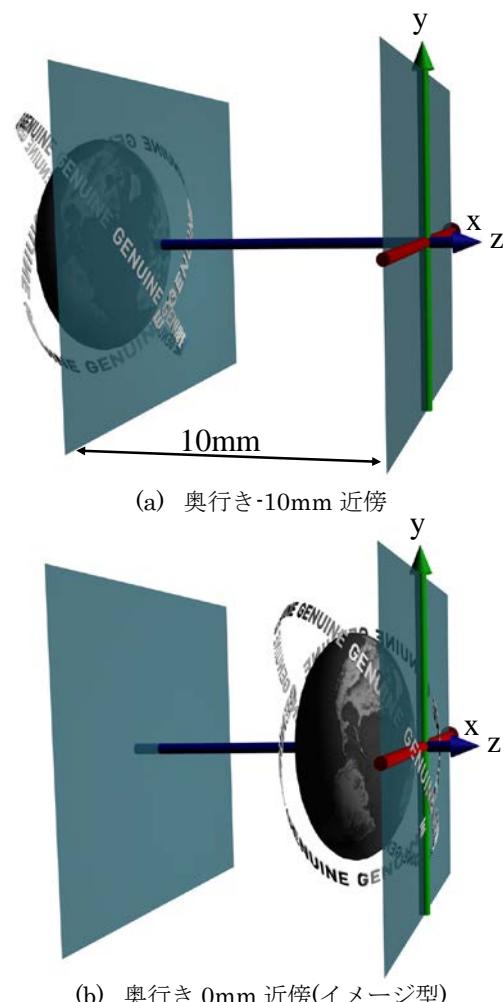


図 1 CGH の物体配置

表 1 CGH の計算パラメータ

CGH のサイズ	21mm x 18mm
CGH の画素数	52500 x 90000
CGH の画素ピッチ	400nm x 200nm
干渉縞の階調数	2 値
波長	555nm
参照光の入射角	33.71°
視差方向	水平のみ
視域	±15°

効果的である。

ここで、記録する物体をホログラム面から離して配置した場合(図 1(a) 奥行き $Z=-10\text{mm}$ 近傍)とホログラム面の近傍に配置しイメージ型ホログラムとした場合(図 1(b) 奥行き $Z=0\text{mm}$

近傍)の CGH の再生像を、再生シミュレーションにより比較した。

表 1 に CGH の計算パラメータを示す。物体は点光源の集合とし、物体光は水平方向にのみ広がる設定とした。再生シミュレーションは、干渉縞を多数の小領域に分割し、小領域ごとに 2 次元フーリエ変換することで、各小領域から視点に向かう光線の強度を波長ごとに求め合成する方法^[3]で行った。

図 2 に、原画となる三次元物体画像を、図 3 に再生シミュレーション画像を示す。図 3(a)に示す、物体を $Z=-10\text{mm}$ 近傍に配置した場合と比べ、図 3(b)に示す、物体を $Z=0\text{mm}$ 近傍に配置しイメージ型ホログラムとした場合には、特にリング状の文字部分で再生像のぼけが低減されていることがわかる。

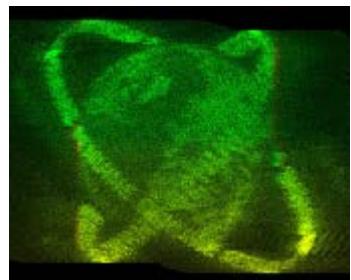
その一方で、イメージ型ホログラムとした場合に、再生像の階調再現性は低下している。物体を $Z=-10\text{mm}$ 近傍に配置した場合には、原画となる物体の階調をある程度再現しているのに対し、 $Z=0\text{mm}$ 近傍に配置した場合には、階調の再現性が低下し、海と陸の区別がわからないほどである。

イメージ型ホログラムとすることで階調の再現性が低下した原因是、干渉縞を 2 値化したためと考えられる。例えば、他の物体光と干渉しない、2 つの点光源によって形成される干渉縞を考える。2 つの点光源がホログラム面から同じ距離にある場合、それぞれの点光源の強度が異なっていたとしても、2 値化した干渉縞は同じパターンになるため、それぞれの干渉縞から再生される光の強度は同じになる。

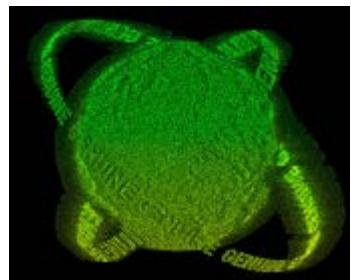
物体がホログラム面から十分に離れていれば、点光源どうしが複雑に干渉するため、干渉縞を 2 値化したとしても点光源の強度情報が干渉縞の広いエリアに分散して記録されるのに対し、物体がホログラム面に近い場合は、点光源どうしの干渉が少ないため、干渉縞の 2 値化により点光源の強度情報の多くが失われてしまうと考えられる。



図 2 三次元物体画像



(a) $z = -10\text{mm}$



(b) $z = 0\text{mm}$

図 3 再生シミュレーション画像

4. 干渉縞の階調数と再生像の階調再現性

干渉縞の 2 値化により再生像の階調再現性が低下することを確認するため、干渉縞の階調数と再生像の階調再現性の関係を、CGH の再生シミュレーションにより検証した。

図 4 に示すとおり、物体は、画素値 0~255 まで 17 段階の階調チャートをマッピングした、横 $10.8\text{mm} \times$ 縦 1.8mm の平板とし、ホログラムの

奥, $Z=-1\text{mm}$ に配置した。干渉縞の階調数を 2, 3, 5, 9, 21, 256 値とし, 再生シミュレーション画像を生成した。

図 5 を見ると, 干渉縞の階調数が 5 値以上であれば, 階調変化がなめらかな再生像が得られている。

図 6 に, 物体の各画素値に対応する領域の, 再生シミュレーション画像の画素値の平均を求め, 物体の画素値と再生シミュレーション画像の画素値の関係を, 干渉縞の階調数ごとに示した。再生シミュレーション画像の画素値の平均は, 物体の画素値 255 に対応する領域の, 再生シミュレーション画像の画素値の平均で正規化した。

図 6 から, 干渉縞の階調数が 256 値の場合, 物体の画素値と再生シミュレーション画像の画素値はほぼ比例関係にあることが分かる。一方, 干渉縞の階調数が 2 値の場合, 物体の画素値が 0 以外では, 再生シミュレーション画像の画素値はほぼ 1 となり, 階調再現性が極めて低いことがわかる。また, 干渉縞の階調数を 3 から増やすごとに, 再生像の階調再現性が徐々に改善することがわかる。

5. EB 描画装置による干渉縞の階調表現

半導体製品製造用の EB 描画装置は基本的に 2 値記録なので, 干渉縞の多値記録を行うためには, 擬似階調記録を行う必要がある。本稿では擬似階調記録方法として, 記録したい画素値に対応した幅の矩形を記録する方法を採用した。

CGH の演算間隔が左右 400nm の場合, 干渉縞の階調数が 2 値であれば, 画素値 0 に対して幅 0nm の矩形(つまり描画しない), 画素値 1 に対して幅 400nm の矩形を描画すればよい。干渉縞の階調数が 5 値であれば, 画素値 1 に対して幅 100nm, 画素値 2 に対して幅 200nm, 画素値 3 に対して幅 300nm, 画素値 4 に対して幅 400nm の矩形を描画することになる。この場合, 少なくとも 100nm の解像度が必要であり, レーザー直接描画装置よりも高解像度の記録ができる。



図 4 物体画像(階調チャート)



(a) 干渉縞の階調数が 2 値の場合



(b) 干渉縞の階調数が 3 值の場合



(c) 干渉縞の階調数が 5 値の場合



(d) 干渉縞の階調数が 9 值の場合



(e) 干渉縞の階調数が 21 値の場合



(f) 干渉縞の階調数が 256 値の場合

図 5 再生シミュレーション画像

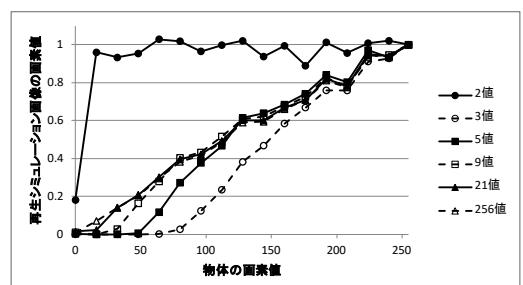
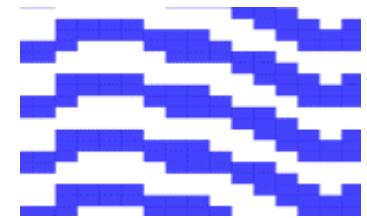
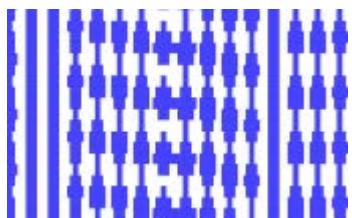


図 6 干渉縞の階調数による再生像の階調性
る電子線描画装置が必要となる。

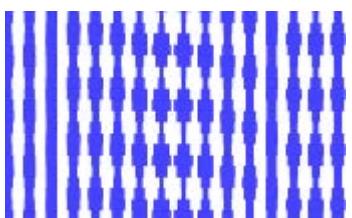
図 1(b)の三次元物体(地球+リング)に対し



(a) 干渉縞の階調数が 2 値の場合



(b) 干渉縞の階調数が 5 値の場合



(c) 干渉縞の階調数が 256 値の場合

図 7 EB 描画データの拡大図

て、干渉縞を 2 値化、5 值化および 256 値化した場合の、干渉縞の EB 描画データの拡大図(図 7)および再生シミュレーション画像(図 8)を示す。物体の配置は $Z=0\text{mm}$ 近傍のイメージ型ホログラムである。

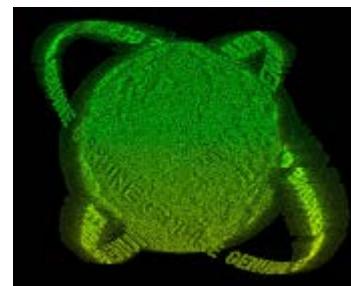
図 8 から、干渉縞の階調数が 5 値あれば、イメージ型ホログラムの場合にも十分な階調再現性の再生像が得られることが分かる。

最後に、干渉縞の階調数を 5 値として作製したイメージ型ホログラムの光学再生像を示す(図 9)。

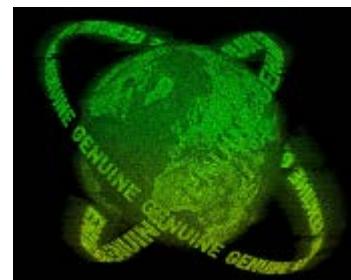
図 9(c)に示すように、干渉縞の階調数を 5 值としたイメージ型ホログラムを EB 描画装置で作製することで、再生像のぼけが少なく見やすい、かつ階調性の豊かな再生像が得られた。

6. むすび

高解像度記録が可能な EB 描画装置を用いて、



(a) 干渉縞の階調数が 2 値の場合



(b) 干渉縞の階調数が 5 值の場合



(c) 干渉縞の階調数が 256 値の場合

図 8 再生シミュレーション画像

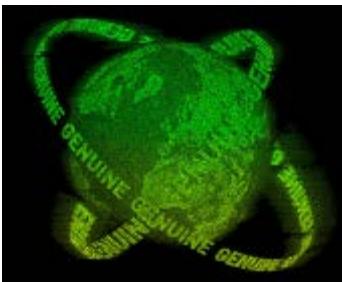
干渉縞を疑似 5 値記録することで、日常的な照明環境でもぼけが少なく見やすい、階調性の豊かな CGH を実現できることを示した。

参考文献

- [1] 五十嵐 俊亮, 中村 友哉, 石井 勢津子, 松島 恭治, 山口 雅浩: “計算機合成本



(a) 三次元物体画像



(b) 再生シミュレーション画像



(c) 光学再生像

図 9 干渉縞の階調数が 5 値の場合の
イメージ型ホログラムの再生像

ログラムにおける視点移動に伴う視覚効

果” , HODIC Circular Vol. 37, No. 3, pp. 2-5(2017)

- [2] 岩本 拓己, 山口 健, 吉川 浩: “縮小光学系のレンズ変更によるプリンジピタの高精細化”, HODIC Circular Vol. 37, No. 3, pp. 14-17(2017)
- [3] 安田 類己, 北村 満, 植田 健治, 積田 真人, 山口 健, 吉川 浩: “計算機合成ホログラムの再生シミュレーション”, 3次元画像コンファレンス 2008, P-7, pp. 111-114(2008)

「セキュリティ印刷市場におけるホログラムの現状」

鎌田康昌

凸版印刷株式会社 〒112-8531 東京都文京区水道 1-3-3

E-mail: yasumasa.kamata@toppan.co.jp

Current status of hologram in security printing market

Yasumasa.Kamata

Toppan Printing co.,ltd 1-3-3 Suido, bunkyo-ku,Tokyo,112-8531 Japan

Embossed holograms are considered to be small, light and thin from the perspective of hologram experts, and appear to be of a different kind from the three dimensional image of the display hologram.

However, it is said that it is the most successful field as a practical hologram application. In particular, holograms for document security applied to banknotes, cards and passports are familiar to people in their lives. I will explain the current situation of the hologram of this field which may not be known even by the members of HODIC.

はじめに

エンボスホログラムは、ホログラムの専門家からすれば浅薄な印象で、ディスプレイホログラムの三次元画像からはほど遠いものに見える。しかしホログラムのアプリケーションとしては商業的に最も成功した分野とも言われている。特に紙幣やカード、パスポートに付随する文書セキュリティ用途のホログラムは生活の中でも身近な存在である。HODIC の会員でも意外に知らないこの分野のホログラムの現状を紹介する。

偽変造・コピー防止機能

セキュリティ印刷で、ホログラムに求められる機能は、目視による偽変造防止機能、特にカラーコピーしたものに対する識別容易性である。1980 年代以降、世界的にカラーフォトコピー機の普及、個人で操作でき

るパソコンとスキャナの組み合わせ、カラープリンター出力による DTP の急速な進展があった。これらに対して既存のセキュリティ印刷技術は目視識別の点でコピー品との差異が減少して、相対的に機能が低下した。そこに、セキュリティ印刷用途のエンボスホログラムが導入されたのである。じつは導入の素地は出来上がっていた。紙に異素材を組み合わせる事は、紙幣発祥の頃から偽変造防止手法として認められていたし、紙基材にメタル様のフィルムを差し込む事、金属箔を表面に転写する試みが、ホログラム以前に行われていたのであるⁱ。これらは、コピーすると光源を反射し、真っ白にサチレーションを起こすか、センサが反射光を拾えず黒くなるか、真正品の目視と大きく異なる印象を与える事ができる。この金属箔に回折格子の絵付けによって個性を与え変化を加えたのがセキュリティ用

途のホログラムである。

偽変造防止技術には三つのファクターが必要と言われる。「材料・素材が特殊で一般的には入手困難である事」、「加工する技術が特殊で一般的には加工困難な事」、「生産設備が特殊で一般的には量産困難である事」。これらが相互に関連して偽変造耐性が生まれる。エンボスホログラムの場合、特に加工技術、生産技術の特殊性に強みがある。具体的には、ホログラムの原版作成のためにデザインパターンを任意に作成できる光学的知識が必要である。原版の複製にはホログラムの表面形状を精密に電鋳する技術が求められる。そして複製された刷版を用いて樹脂に熱圧加工を施し量産する技術が必要である。通常の文書の印刷工程では熱を加える工程は無い。つまりコールドプロセスである。これに対しエンボスホログラムの貼付工程では百数十度の熱と、面積当たり数十トンの圧力をかけるホットプレスプロセスを追加する必要がある。これらがセキュリティ印刷物の偽変造を試みるものにとって障壁となり、効果を持つのである。

ホログラムどうしの差別化の難しさ、 もはやホログラムでは無いもの

ホログラム有りと無しの印刷物では、明らかに違うものとして識別する事が容易である。しかし真正のホログラムと、似て非なるホログラムの識別は難しい。回折光の虹色が強烈で、視点によって常に変化する画像の特徴は、ホログラムどうしの差別化を難しくしている。もちろんホログラム画

像をきちんと観察すれば識別は可能な場合が多いが、時間による色や画像の変化は記憶しづらく、同様な構成からなるホログラムの一瞥での判別は難しい。

エンボスホログラムには、観察環境を選べないという事情がある。画像の観察時に、この角度から、この様な光を入れて見てくださいと指定することは難しい。印刷物に貼付されている場合は、文面や画像を見るのと同じ光源のもとで画像を評価される。蛍光灯の並ぶ事務所や、タクシーの中、食堂等、あらゆる環境下で視認可能でなければならない。このため、再生光に影響されにくいドット・マトリクスという手法が1990年代に考案された。ⁱⁱ輝度の高いシンプルな回折格子のドットや矩形を画素として、タイル状に並べて画像を構成する原版作成手法で、きわめて視認性が高く、汎用性があり、現在もなおエンボスホログラム原版を作成する多くの基本手法となっている。当然の事ながら、エンボスホログラムの市場が拡大するにつれて、このメジャー手法はパッケージ化され、効率的に原版を作成するために自動作成マシンとしてホログラム生産業者内で普及することとなった。

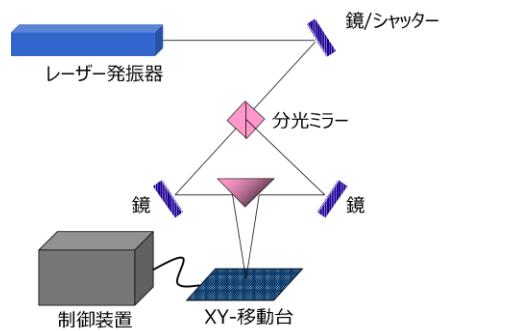


図1 ドット・マトリクス装置イラスト

ホログラムがホログラムに対して偽変造防止機能を維持するために、絵柄のバリエーションと画素となる回折構造に変化を付ける必要性が生じた。先ず、回折以外の特性を持つ微細構造として、拡散構造がある。ランダムまたは指向性をもった拡散構造を作る事で、虹色でない白やグレーの無彩色の画像が作成可能となった。次に、反射構造が加わる。回折光に比較して構造は荒いが、効率よく高い輝度を得る事ができる。さらに、回折構造の進化系として、ナノ構造を持ちこみ、より微細構造を正確に制御することで、黒や、パステル色を表現するものに至っている。2010年代凸版印刷の「アステリウム(ASTERIUM)」や「ジュエルトーン(JEWELTONE)」(図2)は、この類であるⁱⁱⁱ。もはや、ホログラムでは無いものが、セキュリティホログラムとして語られている。



図2 凸版印刷サンプルより

競合メディアの台頭

セキュリティ用のホログラムは、発生から30年以上活用されてきたが、期待する機能は偽変造防止であり、これに競合するものは必ずしもホログラムだけとは限らない。現在二つの技術が台頭している。一つはク

レインカレンシィ(CRANE CURRENCY)社のマイクロレンズアレイを用いた光学可変素子で、「モーション(MOTION)」と呼ばれている。モーションの画像は観察視点の移動によって、各マイクロレンズの焦点が像面を横切るため、結果として拡大された画像が、傾き角度に垂直な方向にフィルム表面を流れるように移動をするのが特徴である。紙基材の抄紙時に、このフィルムを漉き込む形で提供される。それ程薄く精度の高いマイクロレンズと微細な印刷位性がある。また、ホログラムほど観察環境を選ばない。



図3 CRANE MOTION サンプルより

モーションは2013年に改刷された米国的新100ドル紙幣に実装されている(発表では3-D Security Ribbonと表記されている)。

もう一つは、シクパ(SICPA)社の「spark」で、光学的可変磁気インキ(OVMI)である。同社の、見る角度によって色が変化するインキ(OVI)は、銀行券やパスポートなどに用いられるセキュリティインキとして歴史がある。色変化顔料と磁性体を組み合わせ、専用の印刷機で印刷する事によって、印刷されたインキが立体的に、動的な変化を伴って見える効果が出来上がる。インキを任意の形状に印刷すると同時に磁気を加えて配向し、その状態をUV

光で硬化する事により、独自のパターンを作成できる。顔料が光学薄膜層を持ってるので、入射する光の角度によって特定の波長を選択的に反射し、この入射角度が変化したときに別の特定波長を反射する。これによりインキの色が二色に変化して見える。これをカラーシフト効果という。更にこの顔料は磁性を持っているため、磁気でコントロールする事により、任意の配向パターンを作る事ができる。インキなので色調の選択肢、デザインの可変度、数量の調整し易さに優位性を持っている。



図 4 SICPA SPARK サンプルより

これらの新しい光学可変要素が、急速に存在を確立したセキュリティ用ホログラムの強力なライバルとして競い合っているのが、セキュリティ印刷市場の現状である。

おわりに

俯瞰して見ると、21世紀に入って10年を過ぎる頃から印刷物のデジタル化が一気に加速した様に思える。印刷物のデジタル化は偽変造防止ホログラムという市場を作り上げたが、

仮想通貨や、スマートフォン決済が拡大するなか、最終的にセキュリティ印刷物それ自体が減少していくれば、このニーズも変化し、デジタルデータの偽変造防止技術へと移行していくと思われる。しかし、それは

不可逆的流れではあるとしても、一朝一夕に起こるものではなく、紙幣、パスポート、カード個々の商材に於いても事情は異なるはずである。むしろ変化している今こそ、目視とデジタルを繋ぐものとしてのホログラムの存在があるのではないか。

2014年5月に、日本銀行五千円券のホログラムが変更された。変更点はホログラムの透明層の大きさと形状で、目の不自由な方々のために、印刷面との触感の違いで、券種の識別を容易にするための変更である。これは見方によれば、ホログラムが目視判別の偽変造防止機能に、触覚による判別機能を獲得した、とは言えないだろうか。こうした機能拡張こそ、今後のホログラムに求められるものである。そしてホログラムには、光、磁気、電波といった様々な機械判別手法に対応できる可能性が備わっている。

文献

- ⁱ RenesseL. vanRudolf. Optical Document Security. 2005.
- ⁱⁱ F.Iwata. Grating Image Technology.: SPIE Vol.2577 , 1995.
- ⁱⁱⁱ A.Nagano. Pastel,non-rainbow colored OVD based on diffraction optics, . : Optical Document Security.Paper19, 2012.

2種類のCGH用プリンタの開発と種々のCGHの出力例

山口 健[†] 吉川 浩[†]

† 日本大学理工学部応用情報工学科 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1

E-mail: †{yamaguchi.takeshi89,yoshikawa.hiroshi}@nihon-u.ac.jp

あらまし 近年計算機の進歩により、干渉縞を数値計算で求める計算機合成ホログラムにおいて、高画素のものが容易に計算できるようになってきている。しかし、再生する際に使用できる空間光変調器の解像度は200万～800万画素程度とホログラムの再生に十分な性能を有しているとは言えない。そのため、我々の研究グループでは高解像度の干渉縞を出力することが可能なホログラムプリンタの開発を行ってきた。これまでに、平面型ホログラムを出力可能なフリンジプリンタ、体積型ホログラムを出力可能な体積型ホログラムプリンタを提案している。本論文では、我々の研究グループの計算機合成ホログラムの製作の流れを説明するとともに、2種類のプリンタとその出力例について報告する。

キーワード 計算機合成ホログラム、干渉縞、フリンジプリンタ、体積型ホログラムプリンタ、平面型ホログラム、体積型ホログラム

Development of 2 types of CGH printers and its applications

Takeshi YAMAGUCHI[†] and Hiroshi YOSHIKAWA[†]

† Dept. of Computer Engineering College of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501 Japan

E-mail: †{yamaguchi.takeshi89,yoshikawa.hiroshi}@nihon-u.ac.jp

Abstract Development of the calculation device, the resolution of the computer-generated hologram becomes larger than before. However, the resolution of the spatial light modulator is not suitable for the hologram, the reconstructed image from the computer-generated hologram does not have enough size and viewing angle for practical use. Therefore, we have been developing the output device for the computer-generated hologram. We have proposed Fringe printer which outputs the plane type computer-generated hologram and Volume hologram printer which outputs the volume type hologram. This paper describes the flow of the output computer-generated hologram with our output system, and introduces application of these printers.

Key words Computer-Generated Hologram, Fringe pattern, Fringe printer, Volume hologram printer, Plane type hologram, Volume type hologram

1. はじめに

計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)は、ポリゴンデータなどの3次元形状データを元にして干渉縞を計算し出力することで3次元像を再生することが可能な3次元ディスプレイである。空間光変調器(SLM: Spatial Light Modulator)に直接干渉縞を表示し逐次干渉縞を変化させることで、動く立体像を再生することができるが、現在利用できるSLMの性能では十分な大きさと視域を持つ像の再生は行えない。このため、我々の研究グループでは高画素・高精細なCGHを出力することが可能なホログラム用のプリンタ研究を行っている。CGHの出力装置としては、CGHの種類に応じて平面型ホログラムを出力する方式と体積型ホログラムを出力方式に大別される。

平面型ホログラムを出力する方式としては、感光材料に干渉縞を露光する方式^[1,2]、半導体などマスクなどを作る微細加工機を利用する方式^[3,4]がある。著者らのグループは、市

販の光学部品を利用してSLMに表示した干渉縞画像を光学的に縮小し、0.35μmの画素ピッチのCGHの出力を可能にしたフリンジプリンタと呼ばれる装置の研究を行っている。計算した干渉縞を直接出力することができるため、干渉縞さえ計算することができればどのような種類の平面型CGHでも出力することができる。また、記録材料にフィルムなどのフレキシブルな材料を用いれば出来上がるCGHの形状もある程度自由に設定することができる。これまでに著者らのグループは、フレネル型^[5]、イメージ型^[6]、レインボウ型^[7]、円筒型^[8]、アルコープ型^[9]、ディスク型^[10]など様々なCGHの出力をを行ってきている。

体積型ホログラムプリンタは、体積型のホログラムを直接出力できるCGH用の出力装置である。平面型ホログラムは、干渉縞がホログラムの面方向に形成されるため、記録時と異なる波長で再生すると像が記録時とは異なる位置に異なる倍率で再生されてしまう。このため、白色光で再生された場合再生される像がぼやけてしまう。これに対して、干渉縞が記

記録材料の厚み方向に形成される体積ホログラム（厚いホログラム）は、波長選択性が優れているため白色光で再生しても記録波長の像を再生することができる。しかし、体積ホログラムを作るには干渉縞を記録材料の厚み方向に形成させなくてはならず、直接体積ホログラムを書き込むことは困難である。フリンジプリンタで出力した CGH から像を再生させ、参照光と干渉させることで体積ホログラムを作ることは可能である^[11]が、元にする CGH に合わせた転写を行う光学系を組む必要がある。そこで、部分ごとに光学転写を行いながら体積ホログラムを出力するような、装置の研究が行われている。文献[12, 13]の手法では、液晶パネルに表示する画像を多数の 2 次元画像から生成される光線画像とすることで、フルカラーのホログラフィックステレオグラムを出力ができる。文献[?, ?]は、SLM を用いて再生した物体波面を参照光と干渉させることで体積型 CGH の出力を実現している。

本稿では、我々の研究グループが研究をしている 2 種類のホログラムプリンタを紹介するとともに、各プリンタを用いた出力例について報告する。

2. 計算機合成ホログラム作製の流れ

計算機合成ホログラムの計算の流れを図 1 に示す。著者の研究グループは、物体を点光源の集まりと考えそれぞれの点光源から生じる球面波と参照光の干渉計算を行い、干渉縞を生成している。物体点光源群を生成する際、CG モデルを元に OpenGL を持つことで、ある視点の 2 次元透視図にデブスバッファから取得した奥行き情報を付加することで 3 次元座標の取得を行っている。さらに、2 次元透視図から得られるカラー情報を加えて、点光源の情報としている。近年の CGH では、視域も数十度とある程度確保することができるため、複数の視点からの物体点光源データを生成し計算することで、視点が移動した際にも正しい視差像が得られるよう計算を行っている。イメージ型の計算機合成ホログラムは、ホログラム面から像の位置が近いため回折角が大きくなる傾向がある。ホログラム面全体で干渉縞を計算した場合、現状の出力装置では空間分解能が不足することがある。そのため、それぞれの点光源データに計算領域を付加することで、現状の出力装置でも再生可能なイメージ型 CGH の計算を可能としている。物体点光源データ生成後は、出力するホログラムの種類に合わせた干渉縞の計算を行う。干渉縞計算においては近年、GPGPU (General-Purpose Computing on Graphics Processing units) によって 100 Gpixels を超える干渉縞の計算も比較的容易に行えるようになってきている。計算された干渉縞は、ホログラムの種類合わせてフリンジプリンタ、体積型ホログラムプリンタにより CGH として出力を行う。

2. 1. 干渉縞計算における各種ソフトウェア

我々の研究グループでは、干渉縞生成における計算においてそれぞれソフトウェアを開発している。3 次元 CG データの作成については、市販の LightWave やフリーソフトの Blenderなどを利用しているが、以降の①CG データから多



図 1 ホログラムプリンタを用いた計算機合成ホログラムの出力の流れ。

視点の点光源データへの変換、②一部のホログラムではあるが、点光源データへの計算範囲の付加、③点光源データから干渉縞の計算はそれぞれ別のソフトウェアを利用している。

①のソフトウェアの外観を図 2 に示す。本ソフトウェア^[14]は OpenGL を利用して CG データの表示を行っている。フリンジプリンタで出力可能な CGH の回折角は 40 度を越えるため、1 つの視点から生成した点光源データでは点同士の重なりや、視点移動による像の欠けが生じてしまう。そこで、視点位置をずらして異なる視点の点光源データを作成することで、どの視点からも正しく隠面処理した再生像が観察できるようにする。点光源データ生成のプロセスでは、設定した視点からの 2 次元透視図と奥行きマップを OpenGL 用いて生成する。得られた画像の内、色のある画素のオブジェクト座標を変換処理（アンプロジェクト処理）によって求めることで、点光源データを生成する。この時生成された点光源データは、点光源の座標 (x, y, z)、位相、振幅 (R, G, B) から構成されている。画像生成時にはどの視点でも CG モデル全体が見えなくてはならないため、大きなバッファを用意しなければ各視点の点光源数が少なくなってしまう。そのため、現在は各視点から CG モデルが見える範囲だけレンダリングすることで、小さいバッファで高解像度の点光源データを生成できるように工夫している。また、近年フォトリアリスティックな再生像の実現を目指し、点光源データ生成にフォトンマッピングの手法を用いたソフトウェアの開発も行っている^[15]。

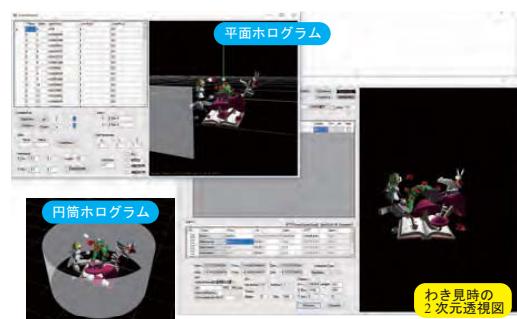


図 2 CG データから点光源データを作成するソフトウェア。

②のソフトウェアの外観を図3に示す。図3は、計算機合算レインボウホログラムのためのソフトウェアである。像がホログラム面付近に再生されるイメージ型では、出力装置の解像度が十分ではない場合干渉縞をホログラム面全体で計算してしまうと、回折光が所望の像を形成せずノイズとなってしまう。そこで、点光源データに計算される計算範囲を付加することで、再生像に寄与しない干渉縞を計算させないようにすることができる。



図3 点光源データに計算範囲を付加するソフトウェア。

③のソフトウェアの外観を図4に示す。図4の外観はC#で作られており、別途CUDAで作成した干渉縞計算のソフトウェアを管理している。レインボウホログラムだけは計算のアルゴリズム上CPUによる計算を行っている。CUDAを用いてGPU計算することで、干渉縞を高速に計算することができる。汎用的なPCでの計算を想定しているため、干渉縞はタイル状に分割された1つの要素ごとに計算される。このソフトウェアを用いて現在、フレネルホログラム、イメージ型ホログラム、レインボウホログラム、円筒ホログラム、アルコープホログラム、体積型ホログラムプリンタ用のマスターhoログラムの計算を行うことができる。



図4 点光源データから干渉縞を計算するソフトウェア。

3. 出力方式

著者のグループが開発を行っている出力装置は、平面型ホログラム用のフリンジプリンタ、体積型ホログラム用の体積型ホログラムプリンタである。それぞれ市販の光学部品を用いており、SLMに表示した干渉縞を利用して計算機合成ホログラムを出力する。

3. 1. フリンジプリンタ

フリンジプリンタの光学系を図5に示す。フリンジプリントは、SLMとしてのLCoS (Liquid Crystal on Silicon)、レーザ、X-Zステージ、レンズより構成されている。LCoSは、SONY社製のプロジェクタ(VPL-VW50)に搭載されている物を分解して使用している。このLCoSは解像度1,920x1,080 pixels、画素ピッチ7 μmの性能を有しているが、ホログラムの干渉縞を表示する物としては十分とは言えない。そこで、図5のレンズ3、レンズ4を用いて光学的にLCoSのサイズを縮小させている。この縮小倍率はレンズ3、レンズ4の焦点距離の比によって決定され、レンズ3、レンズ4の焦点距離をそれぞれ f_3, f_4 とすると、縮小倍率 M は以下の式のように求めることができる。

$$M = \frac{f_4}{f_3} \quad (1)$$

縮小光学系を用いることにより、高精細の干渉縞を記録することはできるがLCoSの画素数では数mm四方の小さなホログラムしか記録することができない。このため、広視域、高回折角のホログラム実現のためにはホログラムの高画素化は不可欠である。フリンジプリンタでは、X-Yステージを用いることにより、LCoSの解像度不足を補っている。計算機を用いて生成した干渉縞の一部をLCoSに表示させ、シャッターを制御して表示した干渉縞を記録材料に記録した後、X-Yステージにより記録材料を動かしLCoSに次の干渉縞を表示させ記録する。

フリンジプリンタの撮影のサイクルは、X-Yステージの移動、干渉縞画像の表示、ステージ移動後の振動低減のための待機時間(セトリング時間)、露光時間となっており、現在撮影時間の大半をX-Yステージの移動とセトリング時間が占めている。ステージの移動については、縮小倍率によって一度に露光できる領域が決まっているため、大きく変化させることはできない。セトリング時間に関しては、露光時間に比例してセトリング時間が長くなってしまう。光学的に撮影するホログラムの場合、経験的に露光時間の約10倍程度セトリング時間をとることが多いが、フリンジプリンタでは現在は8.0 msの露光時間に対して600 msのセトリング時間をとっている。露光時間は用いるレーザの出力に依存するため、高出力のレーザを用いることでさらなる出力時間の短縮が見込める。現在用いているX-Yステージとレーザはそれぞれ、X-Yステージ：駿河精機 KXL06300-N2-F, KXL06200-N2-M、レーザ：LASOS社 DPSS レーザ BLK73100TSを用いている。

表1にフリンジプリンタの現在の仕様を示す。現在の縮小倍率で0.35 μmのCGHの出力に成功している。

3. 2. 体積型ホログラムプリンタ

体積型ホログラムプリンタの光学系を図6に示す。体積型ホログラムプリンタもフリンジプリンタ同様、空間光変調器としてのLCoS、X-Zステージ、レンズなどの光学部品により構成される。体積型ホログラムプリンタは、光学転写の手

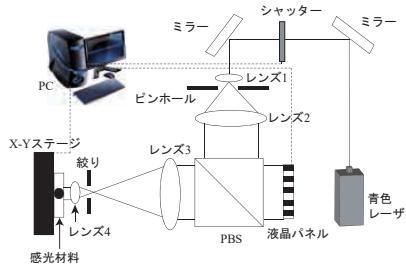


図 5 フリンジプリンタの光学系

表 1 フリンジプリンタの仕様

パラメータ名称	値
ステージ可動範囲 [mm ²]	200 × 200
焦点距離 (レンズ 3) [mm]	200
焦点距離 (レンズ 4) [mm]	10
縮小倍率	1/20
レーザ波長 [nm]	473
レーザ出力 [mW]	100

間を省き直接体積型ホログラムを出力することが目的である。しかし、記録材料の厚さ方向に直接縞を書き込むことはできない。そこで、LCoS に計算された平面型の干渉縞を表示させ、再生した物体波面と参照光を干渉させることで体積型ホログラムの記録を行う。この時、LCoS の画素間隔は干渉縞を表示するには広く、再生される像は小さい。また、LCoS の解像度も干渉縞を表示すのに十分な多さとは言えないため、出力可能な体積型ホログラムも小さく、視域も狭くなってしまう。

提案する光学系において、LCoS の大きさとレンズ 5 の焦点距離によって視域が決定されるため、LCoS の大きさを大きくレンズ 5 の焦点距離を短くすることで、広視域のホログラムを出力することができる。また、X-Y ステージを用いて分割露光することで、再生像の大きさを大きくすることができる。このとき、LCoS には計算した干渉縞の一部（本研究では要素ホログラムと呼ぶ）を表示し、物体光の一部を再生し参照光と干渉させ記録する。度に再生可能な物体光の大きさは、LCoS の画素ピッチの細かさに比例するため、現在の 7 μm では 2.0 mm × 1.4 mm 程度の大きさしか一度に記録することができない。

要素ホログラムの計算にはレンズレスフーリエ変換ホログラムの手法を用いている。そのため、計算時の光学モデルを忠実に再現するためには、LCoS 上にレンズ 5 を配置しなければならないが現実ではできない。そこで、レンズ 3、レンズ 4 により 4f 系を構築することで、LCoS に表示させた要素ホログラムを L3 上に等倍結像させている。

体積型ホログラムプリンタの撮影のサイクルもフリンジプリンタ同様、X-Y ステージの移動、干渉縞画像の表示セトリング時間、露光時間となっている。複数波長を記録する場合、干渉縞の表示と露光を複数回行うがフリンジプリンタ同様撮影時間の大半はセトリング時間と X-Y ステージの

移動時間が占めるため複数波長による撮影時間の増加は長くはない。体積型ホログラムプリンタで用いている X-Y ステージとレーザはそれぞれ、X-Y ステージ：中央精機株式会社 MSS-300CCM-NDF、レーザ R : LASOS 社 DPSS レーザ RLK40200TS、レーザ R : LASOS 社 DPSS レーザ GLK32300TS、レーザ R : LASOS 社 DPSS レーザ BLK73100TS を用いている。また、現在の体積型ホログラムプリンタの仕様を表 2 に示す。

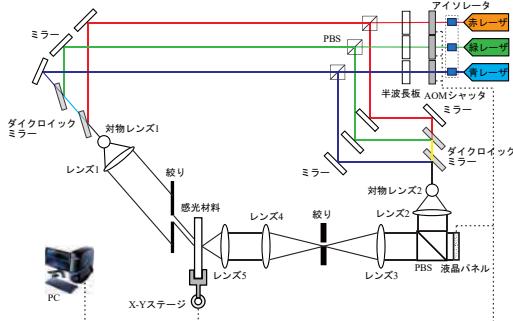


図 6 体積型ホログラムプリンタの光学系

表 2 体積型ホログラムプリンタの仕様

パラメータ名称	値
ステージ可動範囲 [mm ²]	300 × 300
焦点距離 (レンズ 3, 4) [mm]	200
焦点距離 (レンズ 5) [mm]	50
レーザ波長 (R, G, B) [nm]	640, 532, 473
レーザ出力 [mW]	200, 300, 100

4. 計算機合成ホログラムの出力例

フリンジプリンタはその性質上干渉縞さえ計算できればどのような平面型ホログラムでも出力することが可能である。そのため、これまでにフレネル型、イメージ型、レインボウ型、円筒型、ディスク型、アルコープ型の出力を報告してきた。これに足して体積型ホログラムプリンタは、現在平面の感材に出力する CGH の報告にとどまっている。

4. 1. フレネルホログラム（レンズレスフーリエ変換ホログラム）

CGH でフレネル型のホログラムを出力する場合、参照光を平行光とすると干渉縞に要求される画素ピッチが非常に細かくなる。そのため、図 7 のように参照光を点光源とし記録物体付近に配置するレンズレスフーリエ変換ホログラムの光学モデルを採用し、干渉縞に要求される画素ピッチを抑制する手法が多く取られている。図 8 は、解像度 288,000 × 237,600 pixels、ホログラム面からオブジェクトの距離を 150 mm として計算し出した CGH の再生像とその使用オブジェクトである。全方向視差を持つ像が再生できていることが確認できる。近年のフリンジプリンタの画素ピッチの性能が向上したため、参照光を平行光としたフレネルホログラムも今後製作していく予定である。

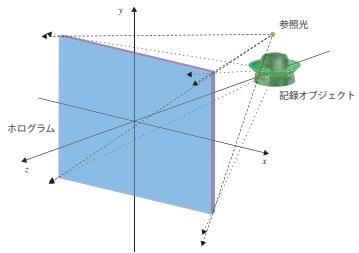


図 7 レンズレスフリーリエ変換ホログラムの光学モデル

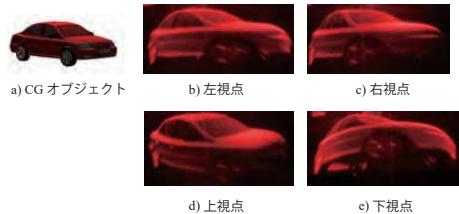


図 8 レンズレスフリーリエ変換ホログラムの再生像

4. 2. レインボウホログラム

平面型ホログラムでは波長選択制が基本的にはないため、フルカラーの像を再生するためにはハーフミラーを用いて再生像を重ねる方法^[6] やカラーフィルタを用いる^[16] 必要がある。平面型ホログラムにおいて白色光で簡単に照明できるホログラムとしては、レインボウホログラムが知られており我々の研究グループでは計算機合成レインボウホログラム (CGRH : Computer-Generated Rainbow Hologram) の研究を行ってきている。CGRH の計算では、図 9 のように視点位置に設置した仮想スリットを通る物体光と参照光による干渉計算を R, G, B 各波長で行い重ね合わせることで、仮想スリット位置でフルカラーの像を観察できるようになる。この仮想スリットは水平方向に開口しており、観察時には水平方向の視点移動には視差のある HPO(Horizontal Parallax Only) のホログラムとなる。また、CGRH は物体がホログラム面付近にあるため、仮想スリットの大きさを出力される CGH で回折可能な範囲に設定し、仮想スリットを通過する物体光だけが計算されるように点光源データに計算範囲を付加している。そのため、この仮想スリットを仮想窓と読んでいる。

図 10 は、解像度 $230,400 \times 230,400$ pixels、ホログラム面から 500 mm の位置で観察した CGRH の再生像とその使用オブジェクトである。白色光照明により、フルカラーの像が観察できていることがわかる。CGRH は、HPO であるため全方向視差を有する CGH よりも計算時間が早いという特徴がある。

4. 3. イメージ型ホログラム

イメージ型ホログラムは、フレネルホログラムと違い像がホログラム面付近に再生されるホログラムである。計算手法自体はフレネル型と同じであるが、各物体点光源に対してホログラム面全体で干渉計算を行うと出力装置の空間分解能の

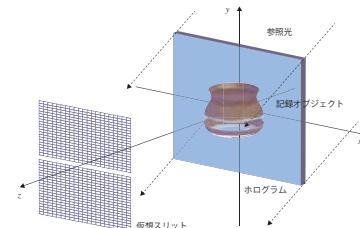


図 9 計算機合成レインボウホログラムの光学モデル



図 10 計算機合成レインボウホログラムの再生像

不足から、回折光が再生像に寄与されない部分まで計算してしまう。そこで、CGRH 同様仮想窓を用いて点光源データに計算範囲を付与することで、回折光が再生像に寄与する部分だけ干渉縞を計算するようしている。

図 12 は、解像度 $250,000 \times 160,000$ 、画素ピッチ $0.44 \mu\text{m}$ の計算機合成イメージホログラムの再生像とその使用オブジェクトである。イメージ型ホログラムは再生される像がホログラム面付近にあるため、波長の異なる照明光による像のボケが少なく白色光でも再生することが可能である。このため、LED 光源で再生しても像がぼけにくく、RGB の LED 光源とハーフミラーを組み合わせて全方向視差・フルカラーの像を再生することも可能である。(図 ??) また、前述のレインボウホログラムも像がホログラム面付近に再生されるため、イメージホログラムの一種と言える。

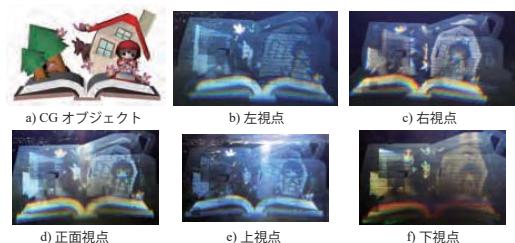


図 11 計算機合成イメージホログラムの再生像

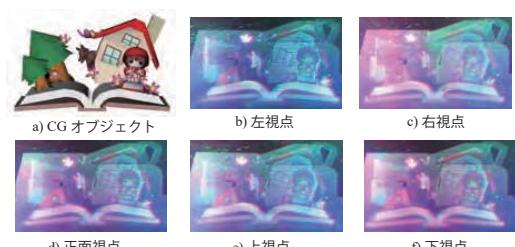


図 12 計算機合成イメージホログラムのフルカラー再生像

4. 4. 円筒ホログラム

CGH は出力装置の問題から視域が現在市販されている 2D ディスプレイに比べて広くないという現状がある。また、ホログラムはその特性上再生される像と視点の間にホログラム面がなければならず、広視域の CGH を実現することは難しい。そこで、図 13 のようにホログラムの形状を円筒状ホログラムの周り 360 度から再生される像を観察できるようにする円筒ホログラムを計算機合成ホログラムで実現した。CGH の周りどこからでも観察できるようにすることで、ホログラムの持つ回り込んで像を観察できるという特性を十分活かしたディスプレイとなる。

図 14 は、解像度 $1,248,000 \times 280,800$ pixels の計算機合成円筒ホログラムの再生像と使用オブジェクト出ある。図からもわかるように再生像の後ろなど広い範囲から像を観察することが可能となる。

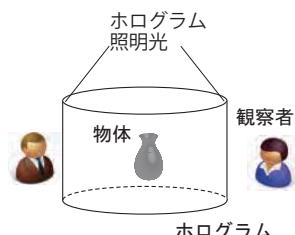


図 13 円筒ホログラムの光学モデル

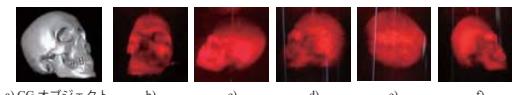


図 14 計算機合成円筒ホログラムの光学モデル

4. 5. ディスクホログラム

ディスクホログラムも広い範囲から再生像を観察できるようにしたホログラムで、図 15 のようにホログラムをのぞき込むような形で 360 度の視域を有している。ディスクホログラムは図 15 のようにホログラムの上部から照明するため、体積型ホログラムとして作ることが一般的である。そのため、CGH でディスクホログラムを作る場合、マスターホログラムを CGH として作製し光学転写を行い計算機合成ディスクホログラム (CGDH : Computer-Generated Disk Hologram) を作製する。

図 16 は、立方体のワイヤーフレームをオブジェクトとした CGDH の再生像である。マスターホログラムの解像度は、 $259,200 \times 259,200$ pixels であり、画素ピッチは $0.44 \mu\text{m}$ である。近年のプリンジプリンタの画素ピッチの性能が向上したため、新しく CGDH を作製する予定である。

4. 6. アルコーブホログラム

アルコーブホログラムは、図 17 のように半円筒形上のホログラム面を持つホログラムであり、観察者はホログラム面よりも手前に再生像を観察することができる。ホログラム面



図 15 円筒ホログラムの光学モデル

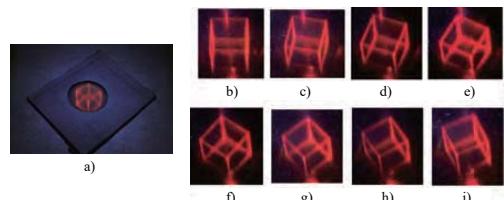


図 16 計算機合成円筒ホログラムの光学モデル

よりも像が手前にある場合、使用できる参照光の関係で像が奥にあるものに比べて干渉縞が要求する空間分解能が高くなる。光学的に記録するホログラムに比較すると、プリンジプリンタで出力できる画素ピッチは粗いため、視域や像の大きさを犠牲にしなくてはならない。我々が提案した計算機合成アルコーブホログラム (Computer-Generated Alcove Hologram) は、半円筒にすることで水平方向の広さに対する空間分解能の増加を抑制し、参照光もホログラム面よりも遠くに設定することができ参照光のホログラム面への入射角を浅くしている。

図 18 は、解像度 $714,240 \times 136,080$ pixels、画素ピッチ $0.44 \mu\text{m}$ の計算機合成アルコーブホログラム (Computer-Generated Alcove Hologram) の再生像と使用オブジェクトである。再生には図 19 の再生光学系を用いている。

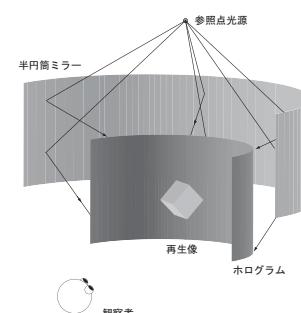


図 17 アルコーブホログラムの光学モデル

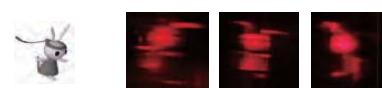


図 18 計算機合成アルコーブホログラムの再生像



図 19 計算機合成アルコープホログラムの再生光学系

4. 7. 体積型ホログラム

図 20 に体積型ホログラムプリンタを使用して出力した体積型ホログラムを示す。また、図 21 にフルカラーの再生像を示す。図 20 より、体積型ホログラムプリンタにより全方位向視差の体積型ホログラムの出力が行えていることが確認できる。図 21 については、色の再現性が不十分であり今後さらなる再生像の質向上に努めていく予定である。体積型ホログラムプリンタについては、フリングジプリンタのように様々な形状や計算方式の CGH の出力は行えていないが、今後安定的に体積型ホログラムが出力できるようになれば行っていきたいと考えている。

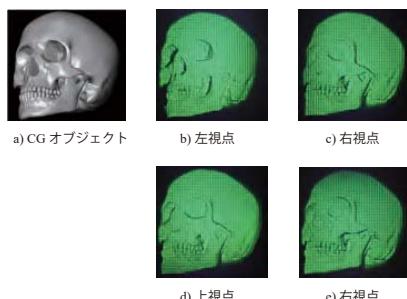


図 20 体積型ホログラムの再生像



図 21 体積型ホログラムのフルカラー再生像

5. む す び

本報告では、我々の研究グループにおける計算機合成ホログラムの出力までの流れを説明し、2種類の出力装置について説明した。さらにこれまでに出力した種々の CGH について、特徴とそれぞれの再生像について紹介した。フリングジプリンタについては、近年の高精細化に伴う各種 CGH の再出

力を今後していく予定である。体積型ホログラムプリンタについては、カラー出力の再生像の質が十分ではないため安定的にフルカラーの体積型ホログラムを出力できるようなシステムにしていきたい。

6. 謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16H02819 の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 小林, 松島, 宮内：“ドット描画式ドラム型フリングジプリンタ”，HODIC Circular, **25**, 3, pp. 2–7 (2005).
- [2] 岩本, 山口, 吉川：“縮小光学系のレンズ変更によるフリングジプリンタの高精細化”，HODIC Circular, **37**, 3, pp. 14–17 (2017).
- [3] T. Hamano and M. Kitamura: “Computer-generated holograms for reconstructing multi 3-D images by space-division recording method”, SPIE Proceedings of Practical Holography XXII, **3956**, pp. 23–32 (2000).
- [4] 中原, 松島：“レーザリソグラフィを用いた広視野角と視域拡大 cgh の作製”，HODIC Circular, **34**, 1, pp. 8–11 (2014).
- [5] 岩本, 山口, 吉川：“新フリングジプリンタを用いた種々の計算機合成ホログラムの出力”，映像情報メディア学会技術報告, 発表予定 (2018).
- [6] T. Yamaguchi and H. Yoshikawa: “Image type full-color computer-generated hologram”, No. 1, p. DWF1 (2011).
- [7] 中口, 山口, 吉川：“100GB を超える計算機合成レインボウホログラムの作製”，映像情報メディア学会技術報告, **34**, 15, pp. 39–42 (2010).
- [8] T. Yamaguchi, T. Fujii and H. Yoshikawa: “Fast calculation method for computer-generated cylindrical holograms”, Applied Optics, **47**, 19, pp. D63–D70 (2008).
- [9] Y. Takeshi, O. Hiroyuki and Y. Hiroshi: “Computer-generated “alcove” hologram to display floating image with wide viewing angle”, Proceedings of SPIE Practical Holography XXV, **7959**, pp. 795719(1–10) (2011).
- [10] T. Yamaguchi, T. Fujii and H. Yoshikawa: “Disk hologram made from a computer-generated hologram”, Applied optics, **48**, 34, pp. H16–22 (2009).
- [11] 伊藤, 藤井, 山口, 吉川：“高解像度 CGH によるマルチカラー ホログラムの作製”，映像情報メディア学会技術報告, **32**, 18, pp. 5–8 (2008).
- [12] S. Maruyama, Y. Ono and M. Yamaguchi: “High-density recording of full-color full-parallax holographic stereogram”, SPIE Proceedings of Practical Holography XXII, **6912**, .
- [13] 白倉：“Wowgram 技術とその応用”，HODIC Circular, **36**, 2 (2016).
- [14] 上野, 山口, 吉川：“計算機合成ホログラムのための点光源データ生成ソフトの開発”，映像情報メディア学会技術報告, **41**, 12, pp. 165–168 (2017).
- [15] 奥山, 山口, 吉川：“フォトシンマッピングを用いた計算機合成ホログラムのための写実的な点光源データの高速生成”，映像情報メディア学会技術報告, **42**, 4, pp. 99–104 (2018).
- [16] Y. Tsuchiyama and K. Matsushima: “Full-color large-scaled computer-generated holograms using rgb color filters”, Opt. Express, **25**, pp. 2016–2030 (2017).

ホログラムプリンタとスクリーンへの応用

Hologram printer and application for 3-D screen fabrication

大井 隆太朗¹, Boaz Jessie Jackin¹, 涌波 光喜¹,

市橋 保之¹, 奥井 誠人¹, 山本 健詞¹

¹国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）電磁波研究所 電磁波応用総合研究室
〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4丁目2番1号

Abstract : 電子ホログラフィの技術を応用して任意の物体光波面を SLM によって作り出し、フォトポリマーに体積ホログラムを記録するホログラムプリンタの研究がすすめられている。ホログラム波面プリンタは、正確な奥行を持つ 3-D 物体をホログラム記録することに使えるのみならず、複雑な光学素子アレイを作る目的にも使用できる。本稿では、ライトフィールドディスプレイなどで用いられる、マイクロ凹面鏡アレイをプリンタで作る方法を中心として、可視化用途のホログラムにおける視覚的なノイズを低減するための要素ホログラムのオーバーラップ法、低コストで HOE スクリーンを作るためのホログラム複製法について述べる。

1. はじめに

電子ホログラフィ[1, 2]は物理的に忠実な 3-D 動画の表示が可能な技術として知られており、初期の提案がなされて以降、およそ 30 年近くにわたって研究が進められている。空間光変調器(SLM)は近年のテレビのデジタル化等と相まって、多画素化・高フレームレート化が進んでいるが、それでも現在までのところ単体の SLM で電子ホログラフィに必要とされる情報量をカバーするまでには至っていない。近年、そこで培われた技術(SLM で任意波面を作り出す)を応用することで、体積型ホログラムをフォトポリマーなどの記録材料上にプリントする波面プリンタ[3-7]が複数提案されており、こちらは単体の SLM で作られる波面をコンピュータ制御された x·y ステージなどで移動させながら時分割で記録することで、トータルで十分な空間解像度を得ることが可能な状況となっている。

我々はボリュームホログラムプリンタで作られるホログラムによって 3-D オブジェクトの可視化応用、ホログラフィック光学素子(HOE)の作成応用、さらにそれらをコピーすることで大量生産する技術を総称して HOPTECH と呼んでいる。本稿では以下の各章で、

ホログラムプリンタの概要、3-D 物体の可視化用途で用いるオーバーラッププリントの概要、HOE の作成および作られた HOE による光線空間ディスプレイの一例、低コスト生産を目指したコンタクトコピー技術、について述べる。

2. ホログラフィック波面プリンタ

波面プリンタでは、SLM 上に表示した振幅ホロ・位相ホロなどで作り出した任意の波面（複素振幅分布）を参照光と共に記録材料の上で干渉させ体積ホログラムを記録することができる。一方、参照光が無く、干渉縞を直接縮小して記録するフリンジプリンタや、参照光は有るが2-Dの画像を縮小し方向画像として記録するいわゆるホログラフィックステレオグラムプリンタと比較した場合、波面プリンタの方が複雑な波面を記録することに向いているという特徴がある。また、体積記録であるので、例えば白色光再生ホログラムなどを記録することに向いている。

図1はホログラムプリンタの光学セットアップを示した図である。コリメートしたレーザーは偏光ビームスプリッタで参照光側の系（図で右側のパス）と、物体光側（図で左側）とに分けられる。この時、図中の半波長板の調整により、参照光と物体光のパワー比を適切に調整する。次に物体光側は SLM に表示した振幅ホログラム(256 階調・3840×2160 画素・29Hz, JVC ケンウッド製 DILA)によって変調をされ、任意波面を形成する。この時に発生する共役像や高次回折光を図の SSBF で除去し、所望の物体光だけを通過させる。さらに縮小光学系を通して記録材料(Bayfol HX-102)に投影する。

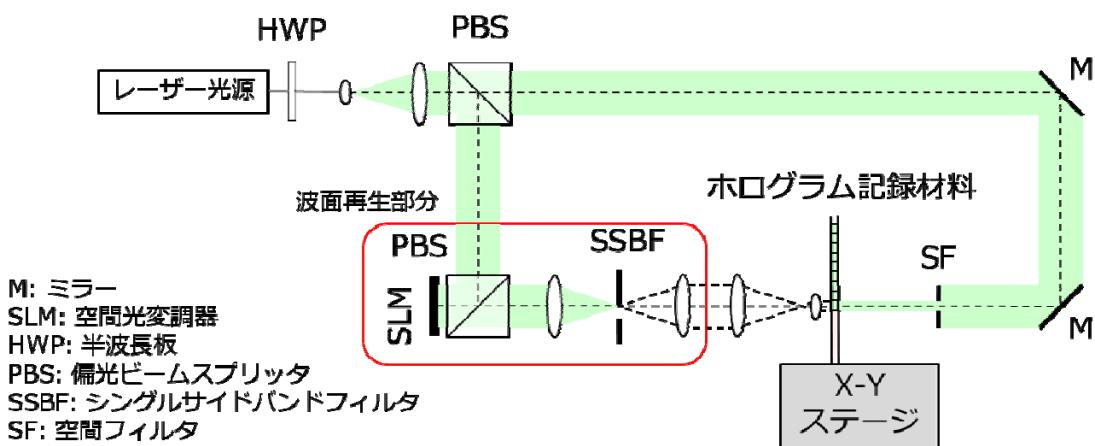


図1. 波面プリンタの光学セットアップ

一方の参照光は、材料の反対側からフォトポリマーに鉛直に入射するように投影されており、両者の干渉縞が材料に記録されることで反射型ホログラムを形成する。このようにして1つのホログラムセルの記録が終るとシャッター(図示されていない)が閉じられ、 $x-y$ ステージが移動して次のセルで同様の記録が行われる。図2はこのようにして記録した反射型ホログラムの再生像の一例である。 $x-y$ ステージの可動範囲が縦横とも30cmであるので、現状で最大30cm角のホログラムをプリントすることが可能である。



図2. 波面プリンタで作成されたホログラムの再生例 (Overlap 無し)

3. 可視化用途のためのオーバーラッププリント

図2では、再生像の手前に縦方向・横方向とも線状のノイズパターンが見える。これは、ホログラムを微小セルに分割して記録したため発生するもので、 $x-y$ ステージの繰り返し位置決め精度の不足や、複数のセルは記録時間が微妙に異なることなど、原因は複数ある。人間がホログラムを目視する、いわゆる可視化用途では、グリッドパターンを目立たなくするためにセルのサイズが小さい方が良いことが分かっている。一方でセルサイズが小さすぎるとホログラムから離れた位置にある点像がボケるという新たな問題が発生する。

最適なホログラムセルの大きさは、視距離や、物体が配置される奥行き、ホログラムの最大回折角などのパラメータによって変化するが、明視距離(30~40cm)において我々のホログラムプリンタのスペックでは両者をともに満足する丁度良いセルサイズがないことが明らかになっている[7, 8]。このため、1回の露光自体は大きなセルサイズを用いてホログラム記録を行い、 $x-y$ ステージの移動量は例えばセルサイズの1/2、1/3などとして、

複数のホログラムを重ねながら記録すれば、視覚的な問題をクリアすることが可能である[7-9]。図3にそのようにして記録した反射型ホログラムの再生例を示す。オーバーラップなしの時に目立っていたグリッド状のノイズは目立たなくなっていることが分かる。

図3で、ホログラムのセルサイズは $0.648\text{mm} \times 0.648\text{mm}$ である。また、x-yステージの移動量はx方向、y方向ともに 0.324mm であり、ちょうどセルサイズの半分ずつホログラムが合計4回重なるように制御をしている。このようにすることで、回折による像ボケを生じることなく、セル間の線状ノイズを目立たなくすることができる。フォトポリマー自体は材料のダイナミックレンジの範囲内で複数露光が可能であるため、オーバーラッププリントを使った場合のデメリットは、記録時間が延びるという問題のみである。



図3. 波面プリンタで記録されたホログラムの再生例（Overlap 有り）

4. デジタル設計された HOE の作成

ホログラムプリンタによって記録できるものは、3-Dオブジェクト（可視化用途）に限られない。例えば金型を作成するのが高価になりがちな、複雑かつ微小な光学素子アレイなどの生産にも応用することが可能である。オートステレオスコピックディスプレイの一つである光線空間ディスプレイでは、マイクロ凹面ミラーアレイや、マイクロ凸レンズアレイが良く用いられており、有望である。

近年は、マイクロミラーアレイを用いた透明なHOEスクリーンによって、実物と仮想物体を混合表示することが光線空間ディスプレイ[10, 11]などが提案されている。これらマイクロミラーアレイの製造方法は通常、既にあるマイクロレンズアレイの位相分布をコピーしたり、対物レンズの位相分布をコピーして、個レンズを構成し、x-yステージで移

動を行いアレイを作り上げるなどの方法がとられてきた。波面プリンタを用いることで、「型」となるレンズアレイや個レンズを用意しなくても、計算で作り出された理想的なレンズアレイをプリントすることができる。複数の異なる光学特性を持つレンズを1枚のHOEシートの上に混載させてレンズアレイを構成するなど、従来の金型を用いたレンズアレイの製作で難しいような、高度なレンズアレイを簡単に作り出すことができる。

図4はホログラムプリンタで試作したHOEマイクロ凹面ミラーアレイによって再生された光線再生像である。2つの幾何学物体はスクリーンの25 mm手前側と、スクリーンの25 mm奥側にそれぞれ配置されており、運動視差が再現できることが分かる。

このHOEの例では 187×93 個のマイクロ凹面ミラー（焦点距離2.16 mm）が配置されており、スクリーンの近くに配置したプロジェクターから出た 10° 前後の角度を持った光を観測者側に反射させて、光線空間像を歪みなく再生する機能を持っている。これにより、通常は必要となる原画のコリメート用光学系[11]や、プロジェクタースクリーン間の長い投影距離などが不要になるというメリットがある。

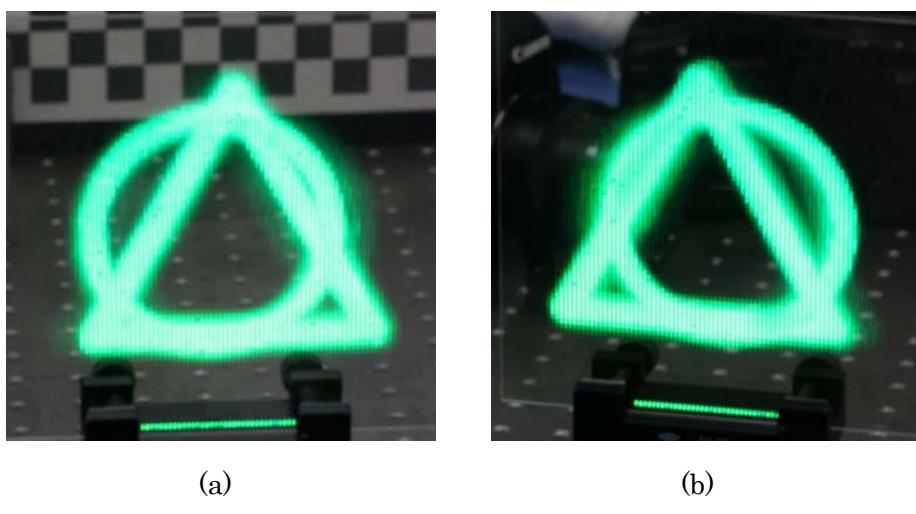
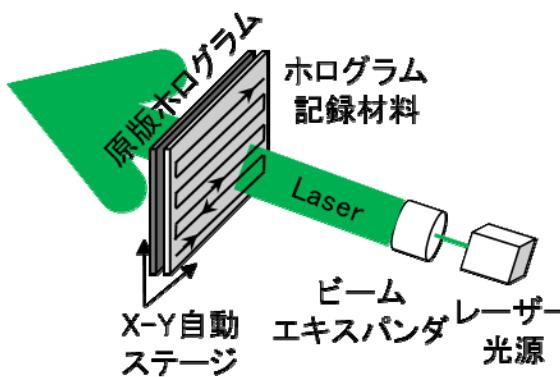


図4. HOEスクリーンを使って再構成された3-D像（運動視差の検証）

5. HOE作成のコスト低減のためのコンタクトコピー

ホログラムプリンタの欠点の1つは、プリントに時間がかかることがある。図4のHOEスクリーンを作成するためには、露光時間のほか、x-yステージの移動時間、光学系の制振時間が必要で、10cm角のスクリーン1枚のプリントには現状で約16時間かかる。この欠点を解決するためにHOEを効率良くコピーすることが重要になってくる。

ホログラムの面積が小さな場合には、低出力のレーザーで1度の露光でコンタクトコピーが可能である。しかし、ホログラムプリンタで作られる大面積の HOE のコピーのためには露光量を稼ぐためにシャッター時間が長くなり、制振に余計なコストがかかる。我々は図5(a)に示すように口径の小さな光学系でコリメートされたレーザーを順次走査し、ホログラム全体を複数のラインに分けてコピーする光学系を実装した。図5(b)は、水平9本のスキャンラインで分割してコンタクトコピーされたホログラム再生像の例である。レーザーのガウシアンビームの山と谷の重ね方により、トータルの露光量のリップルが最も少なくなる位置を用いて走査しているため、図5(b)でコピーに使った走査線は目視できない。



(a)



(b)

図5. 走査による HOE の複製と コピー後のホログラム再生像

6. おわりに

波面プリンタにより、計算で作られた任意波面をフォトポリマーにプリントし、光学素子アレイを作る試みについて紹介した。ホログラムプリンタで可視化用のホログラムを作る際に問題になる、セル間の線状ノイズを低減するため、オーバーラッププリントについて紹介した。また、ホログラムプリントによる HOE 作成で問題となるコスト低減を目指した体積ホログラムの複製方法について紹介した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤(A)16H01742、若手(B)16H01742 及び 総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) 162103005 の助成を受けて行われました。

参考文献

- [1] J. S. Kollin, S. A. Benton, M. L. Jepsen, "Real-Time Display Of 3-D Computed Holograms By Scanning The Image Of An Acousto-Optic Modulator", in Holographic Optics II: Principles and Applications, (SPIE 1136, Paris, France, October 1989), pp.178-185.
- [2] N.Hashimoto, S.Morokawa, K.Kitamura : "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM" , Proc. SPIE, No.1461-44, pp.291–300, (1992).
- [3] T. Yamaguchi, O. Miyamoto and H. Yoshikawa, "Volume hologram printer to record the wavefront of three-dimensional objects," Optical Engineering 51 (7), 075802 (2012).
- [4] Youngmin Kim, Elena Stoykova, Hoonjong Kang et al., "Seamless full color holographic printing method based on spatial partitioning of SLM," Opt. Exp. 23(1), 172 (2015).
- [5] W. Nishi and K. Matsushima, "A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms," in Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, (SPIE 9006, 90061F, San Francisco, California, United States, 2014), pp. 1-8.
- [6] H.Kang, E.Stoykoba, Y.Kim, S.Hong, J.Park and J.Hong, "Color Holographic Wavefront Printing Technique for Realistic Representation," IEEE Trans. Industrial Info., Vol.12, No.4, (2016).
- [7] K. Wakunami, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, and K. Yamamoto, "Wavefront printing technique with overlapping approach toward high definition holographic image reconstruction," in Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2016, (SPIE 9867, 98670J, 2016), pp.1-8.
- [8] K.Wakunami, Y.Ichihashi, H.Sasaki, R.Oi, T.Senoh and K.Yamamoto, "Wavefront Printer by Using Cell Overlapping Technique," IDMC'15 and 3DSA2015, AP6-005, (2015).
- [9] K.Hong, S.Park, J.Yeom, J.Kim, N.Chen, K.Pyun, C.Chi, S.Kim, J.An, H.Lee, U.Chung and B.Lee, "Resolution enhancement of holographic printer using a hogel overlapping method," Opt. Exp. 21(12), pp.14047-14055 (2013).
- [10] R.Higashida and M.Yamaguchi, "Automatic geometric calibration in full-parallax 3D display using holographic screen," Proc. ITE & SID International Display Workshop, 3Dp1-3, (2014).
- [11] Changwon Jang, Chang-Kun Lee, Jinsoo Jeong, Gang Li, Seungjae Lee, Jiwoon Yoem, Keehon Hong, and Byongho Lee, "Recent progress in see-through three-dimensional displays using holographic optical elements," Appl. Opt. 55(3), pp. A71-A85 (2016).

**ふるさと探検隊
2018長和子ども自然科学教室第5回開催**

イベントの趣旨、目的：子ども達に自然、科学、エネルギー、環境問題

公共交通に興味を持って貰う事

イベント参加者：長和町の小学生、保護者

イベントの内容：ホログラムの展示、ソーラーLRT の乗車体験

3D やじろべーの制作

開催日：2018年5月12日

開催場所：長野県小県郡長和長久保455 長門町民体育館

開催時間：AM10:00～12:00

視察、見学者の方は下記のメールアドレスまでご連絡ください。

教室開催責任者 竜野英則 E-mail: nagawa.holo@gmail.com

ホログラフィ関連の学会のお知らせ

11th International Symposium on Display Holography, 6月25日～29日

University of Aveiro, Aveiro City, Portgal, <http://www.isdh2018.pt/>

Digital Holography & 3D Imaging, 6月25日～28日

Wyndham Orlando Resort International Drive, Orlando, Florida United States

https://www.osa.org/en-us/meetings/osa_meetings/osa_imaging_and_applied_optics_congress/program/digital_holography_3-d_imaging/

三次元画像コンファレンス

7月5日（木）、6日（金）北海道大学 フロンティア応用科学研究棟

<http://www.3d-conf.org/>

International Conference on 3D Systems and Applications, 8月29日～30日

Taipei World Trade Center, Taiwan

<http://cf.tl.ntu.edu.tw/web/2018/3dsat2018/index.php>

平成 30 年第 1 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■日時： 2018 年 3 月 23 日 13:00～17:30

■場所： 印刷博物館（東京都文京区トップン小石川ビル内）
<http://www.printing-museum.org/index.html>

■テーマ 計算機合成ホログラムのプリントと作製

■プログラム

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）

ホログラフィーとライトフィールドの融合

— 3D ユーザ体験の高度化に向けたプリント技術からのアプローチ —

山口雅浩（東工大）

電子線描画装置による計算機合成ホログラム

北村 満（大日本印刷）

セキュリティ印刷市場におけるホログラムの現状

鎌田康昌（凸版印刷）

2 種類の CGH 用プリンタの開発と種々の CGH の出力例

山口 健, 吉川 浩（日本大学）

ホログラムプリンタとスクリーンへの応用

大井隆太朗, Boaz Jessie Jackin, 湧波 光喜,
市橋保之, 奥井誠人, 山本健詞（情報通信研究機構）

※休憩時間に印刷博物館の説明員による見学があります。

■研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）

■参加費 HODIC 会員 無料, 非会員 2,000 円, 学生で会報不要の場合は無料

■懇親会費：3,000 円（18:00-19:30）

■研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）

■参加費 会員 無料, 非会員 2,000 円, 学生は会報不要の場合は無料

■問合せ先 HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付

E-mail: office@hodic.org

平成 30 年第 2 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 日時： 2018 年 5 月下旬から 6 月上旬ころ 13:00～17:00 (予定)
- 場所： 日本大学理工学部駿河台キャンパス
<https://www.cst.nihon-u.ac.jp/campus/surugadai/>
- テーマ ホログラフィにおけるアートと教育
- プログラム 未定。最新情報は HODIC の WEB ページで公開いたします。
<http://www.hodic.org/>
- 研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）
- 参加費 会員 無料、非会員 2,000 円、学生で会報不要の場合は無料
- 問合せ先 HODIC 事務局
日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付
E-mail: office@hodic.org

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では、独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております。WEB ページのアドレス (URL) は

<http://www.hodic.org/>

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。HODIC からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からぬことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから maillist-req@hodic.org あてに、本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください。ご質問は、w3@hodic.org までお知らせください。

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻 内 順 平	会 長	伊 藤 智 義 (千葉大学)
副 会 長	山 本 健 詞 (情報通信研究機構)	前 会 長	橋 本 信 幸 (シチズン時計)
国 際 担 当	西 辻 崇 (三菱電機)	企 画 委 員 長	山 口 健 (日本大学)
会 計 幹 事	山 内 豪 (大日本印刷)	事 務 局 長	岸 本 康 (凸版印刷)
編 集 長	吉 川 浩 (日本大学)		

幹 事 (50音順)

石井勢津子 (美術家)	石川 淳 (石川光学造形研究所)	岩田 藤郎
植 田 健 治 (大日本印刷)	太 田 和 哉 (トリマティス)	鎌 田 康 昌 (凸版印刷)
久保田敏弘 (久保田ホログラム工房)	酒 井 朋 子 (千葉大学)	坂 本 雄 児 (北海道大学)
佐 藤 甲 癸	佐 藤 俊 一 (シャープ)	下 馬 場 朋 祿 (千葉大学)
白 倉 明 (アーティエンス・ラボ)	高 木 康 博 (農工大)	高 橋 進 (凸版印刷)
田 中 賢 一 (長崎総合科学大)	谷 口 幸 夫 (大日本印刷)	福 田 隆 史 (産総研)
本 田 捷 夫 (本田ひかり技研)	松 島 恭 治 (関西大学)	三 科 智 之 (日本放送協会)
森 田 正 紀 (アルファバグ)	山 口 雅 浩 (東京工業大学)	渡 邁 恵 理 子 (電気通信大学)

相 談 役 (50音順)

上 田 裕 昭 (ヨニカミルタブ・ラネタリウム)	小 野 雄 三 (立命館大学)	勝 間 ひ で と し (湘南 LRT 研究 G)
桑 山 哲 郎	永 田 忠 昭 (arts-unis)	三 田 村 畿 右
堀 内 道 夫 (光と風の研究所)		

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。
なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の1ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 38, No. 1 (Mar. 2018)

2018年3月23日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたはFAXにてお願ひいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

HODIC